

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Antropologie a genetika člověka

Studijní obor: Antropologie a genetika člověka



Mgr. Pavla Zedníková Malá

Rekonstrukce přibližné podoby člověka podle lebky:
kritické zhodnocení principů metody a analýza vybraných kraniofaciálních vztahů

Facial approximation:
An assessment of the principles of the method and analysis of the craniofacial
relationships

Disertační práce

Školitel: doc. RNDr. Jana Velemínská, Ph.D.

Praha, 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně s použitím citované literatury. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného či stejného akademického titulu.

V Praze, dne 5. 12. 2018

Mgr. Pavla Zedníková Malá

Mým rodičům

Poděkování

V první řadě bych ráda poděkovala své školitelce doc. RNDr. Janě Velemínské, PhD. za odborné vedení, cenné rady a náměty ke zlepšení, poskytnutí materiálu a za veškerou pomoc v průběhu postgraduálního studia. Velmi si vážím jejího chápajícího přístupu, psychické podpory, zastání, víry v mé schopnosti, a stálou motivaci při vzniku a dokončování této práce.

Děkuji také Mgr. Václavu Krajíčkovi, PhD. za statistické konzultace a pomoc zejména při finalizaci společného rukopisu.

Velké poděkování také patří členům oborové rady a jejímu předsedovi, doc. Mgr. Vladimíru Sládkovi, PhD., kteří prokázali velkou míru trpělivosti a lidský přístup při každoročním hodnocení mého studia.

Děkuji svému muži za trpělivost, toleranci, nadhled a humor, se kterým to vše absolvoval se mnou.

Nejsrdečněji pak děkuji svým rodičům za nekonečnou všestrannou podporu v průběhu všech mých studijních let a bez jejichž vydatné pomoci v roli prarodičů bych tuto práci nedokončila.

Abstrakt

Tato disertační práce je předkládána ve formě svazku odborných publikací spolu s teoretickým úvodem. V teoretickém úvodu je prezentován aktuální stav poznání problematiky faciální rekonstrukce. Stručně jsou popsány oblasti využití, principy metody a typy metod dle použitého média. Dále jsou popisovány spolehlivosti a omezení metod, které jsou zároveň východisky výzkumné části disertační práce.

Pro metodu rekonstrukce přibližné podoby člověka podle lebky je typická paralelní existence mnohonásobných predikčních pravidel, jejichž spolehlivost není známa nebo nebyla publikována. Cílem práce bylo otestovat spolehlivosti vybraných vodítek pro odhad polohy a velikosti částí obličeje (očí, nosu a rtů) a na základě výsledků doporučit, která vodítka přednostně používat. V druhé části výzkumu bylo cílem kvantifikovat těsnost vztahu mezi tvarem lebky a tvarem obličeje, tj. určit, do jaké míry a jakým způsobem tvar kostěného podkladu určuje (predikuje) tvar měkkých tkání, a to pomocí geometrické morfometrie.

Materiál pro tuto disertační práci tvořil soubor laterálních telorentgenových snímků 87 dospělých jedinců pořízený v letech 1977–1992. Soubor sestával z 52 mužů (21–43 let, průměrný věk: 30 let) a 35 žen (19–39 let, průměrný věk: 21 let) středoevropské populace. Jedinci ve zkoumaném vzorku nevykazovali žádnou obličejovou disharmonii nebo reverzní okluzi, nikdy nepodstoupili ortodontický zákrok. Na snímcích byla zachycena jak kontura lebky, tak kontura měkkých tkání obličeje.

Testovaná predikční pravidla zahrnovala následující znaky: protuse oční koule, vertikální poloha oční koule, prominence zevního nosu ve vertikální a horizontální rovině (tj. poloha bodu *pronasale*), poloha štěrbiny ústní, poloha okrajů a výška červeně rtů.

Jako nejspolehlivější metoda (s nejnižší standardní chybou odhadu, SEE) pro odhad protruse oční koule se ukázala metoda dle Guyomarc'h et al. (2012), která antero-posteriorní polohu oční koule vzhledem k nejvíce posteriornímu bodu na laterálním okraji očnice odhadovala poměrem z výšky orbity (51,3 % výšky očnice) s SEE = 1,9 mm. V případě vertikální polohy oční koule nejvyšší míru spolehlivosti (SEE = 0,3 mm) vykazovala metoda „centrální polohy“ oční koule v očnici dle Gatliff (1984), tj. střed zornice odpovídá středu očnice.

Jako nejvhodnější metoda určená k predikci anteriorní (ProAnt) a vertikální (ProVert) polohy bodu *pronasale* se ukázala metoda dle Rynn et al. (2010) používající soustavu jednoduchých regresních rovnic. Její spolehlivost, vyjádřená jako velikost průměrné diference mezi odhadovanou a skutečnou polohou a její směrodatné odchylky, dosahovala nejnižších hodnot, tj. -1,3 mm (SD = 2,4 mm) pro horizontální polohu a 0,04 mm (SD = 2,2 mm) pro vertikální polohu bodu *pronasale*. Velikost průměrné chyby nepřekročila 4,5 % (ProAnt) resp. 1 % (ProVert) skutečného rozměru.

Nejspolehlivější výsledky (vyjádřeny jako velikost průměru absolutní chyby) pro odhad polohy štěrbiny ústní vykazovalo pravidlo dle George (1987), kde byla zaznamenána chyba predikce

1,3 mm. Poloha štěrbiny ústní zde odpovídala hranici 3/4 výšky korunky horních mediálních řezáků. Toto pravidlo navržené pro muže bylo vhodnější k predikci polohy štěrbiny ústní i u žen.

Nejlepší odhad polohy okraje červené části horního rtu u mužů poskytovala metoda dle George (1987) s chybou predikce 1,7 mm, kde hranice horního rtu leží v úrovni rozhraní první a druhé čtvrtiny výšky korunky maxilárních řezáků. U žen hranice horního rtu ležela ještě výše, avšak ve většině případů (80 %) nepřekročila úroveň horního okraje korunky maxilárních řezáků. Pro odhad polohy hranice červené části dolního rtu se ukázala jako nejspolehlivější metoda dle Veselovskaya (2004, osobní sdělení), Fedosyutkin & Nainys (1993), Lebedinskaya (1998), Gatliff (1984) nebo Taylor (2001) s chybou predikce 2,3 mm, tj. ve většině případů odpovídala úrovni dolního okraje korunky mandibulárních řezáků.

Pro odhad výšky červeně horního a dolního rtu u žen byly nejspolehlivější výsledky dosaženy za použití regresních rovnic dle autorů Wilkinson et al. (2003), chyba predikce činila pro horní ret 0,9 mm (13 % skutečné výšky horního rtu) a 1,7 mm (18 %) pro dolní ret. Pro odhad výšky horního rtu u mužů byly nejspolehlivější výsledky dosaženy za použití metody dle George (1987) s chybou predikce 1,1 mm (19 % skutečné výšky), tj. výška horního rtu odpovídá polovině výšky korunky horního mediálního řezáku (vzdálenost mezi rozhraním 1/4 a rozhraním 3/4 výšky korunky). Výška dolního rtu u mužů byla nejlépe odhadnuta pomocí regresní rovnice dle Wilkinson et al. (2003) s chybou predikce 1,8 mm (21 % skutečné výšky rtu).

Ve druhé části výzkumu jsme se zaměřili na hodnocení míry asociace mezi konturou profilu lebky a konturou profilu obličeje pomocí geometrické morfometrie. Výsledky analýzy vzájemné kovariance tvaru kontury lebky a kontury měkkých tkání hlavy ukázaly, že měkké tkáně nemusí sledovat pod nimi ležící kostní struktury tak těsně, jak se předpokládalo. Nejtěsnější vztah mezi konturou měkké a tvrdé tkáně byl zjištěn v horní a dolní části obličeje (kořen nosu: prediktivní síla 40,2 %, RV koeficient = 0,42, $r_{PLS1} = 0,72$; dolní ret a brada: prediktivní síla 37,3 %, RV koeficient = 0,41, $r_{PLS1} = 0,65$). Střední část obličeje (chrupavčitá část nosu: prediktivní síla 5,8 %, RV = 0,05, $r_{PLS1} = 0,26$ a horní ret: prediktivní síla 9,6 %, RV = 0,14, $r_{PLS1} = 0,43$) vykazovala velmi malou míru tvarové kovariance. Tento závěr koresponduje s empirickým poznatkem, že tvar profilu nosu a horního rtu lze při vytváření faciální rekonstrukce jen velmi obtížně spolehlivě odhadnout.

Práci uzavírají dva publikované příklady praktické aplikace metody na historický kosterní materiál.

Klíčová slova

Faciální rekonstrukce, faciální aproximace, predikční pravidla, spolehlivost metody, kraniofaciální vztahy, geometrická morfometrie

Abstract

This doctoral thesis is submitted in the form of scientific publications together with theoretical introduction. The present state of knowledge of facial approximation methods is presented in the introduction. Areas of application, principles of the method and classification of the methods according to medium used are briefly described. Accuracy and limits of the method are further described as they form a base of the research of this thesis.

Simultaneous existence of multiple prediction guidelines, of which the accuracy is not known or published, is typical characteristic of the facial approximation method. The aim of this thesis was to assess the accuracy of the particular prediction rules for estimation of position and size of facial parts (eyes, nose, lips), and based on the results to recommend the most accurate and suitable guidelines for middle European population. An assessment of the strength of the association between craniofacial shape and the shape of soft tissues in the profile using geometric morphometric methods, and determination of the extent to which it might be possible to predict the latter from the former were the purpose of the second part of the research.

Material for this study consisted of 87 lateral head cephalograms of a recent adult Central European population (52 males and 35 females, aged between 19 and 43 years, 30 years – mean age for males and 21 years – mean age for females). The individuals in the sample were without obvious facial disharmony or reverse occlusion as well as never having undergone orthodontic treatment. The contour of the skull as well as the contour of the facial soft tissues were displayed in the radiographs.

Features included for accuracy tested prediction guidelines were: protrusion of the eye globe, vertical position of the eye globe, vertical and horizontal prominence of the external nose (position of *pronasale* point), the mouth fissure position, the upper and the lower vermilion line position, the height of the lips.

The most accurate method (i.e. displaying the least standard error of the estimate, SEE) for eyeball protrusion was the method of Guyomarc'h et al. (2012) displaying SEE = 1,9 mm. Anterior position of the eyeball from the most posterior point of the lateral orbital margin is estimated by proportion of the orbital height (51,3 %) according to this guideline. The vertical position of the eye globe was estimated the most accurately (SEE = 0,3 mm) using the method of "central position" (Gatliff, 1984), i.e. the midpoint of the pupil coincides with the midpoint of the orbit.

The most suitable method of prediction of vertical (ProVert) and anterior (ProAnt) position of the *pronasale* point seemed to be the method of Rynn et al. (2010), which is based on a set of simple regression equations. Its accuracy, expressed as the mean difference between the estimated and the actual position and its standard deviation, reached the lowest values of -1,3 mm (SD = 2,4 mm, ProAnt) and 0,04 mm (SD = 2,2 mm, ProVert). The magnitude of the mean error did not exceed 4,5 % (ProAnt) and 1 % (ProVert), respectively, of the actual dimension.

As for position of the mouth fissure the method of George (1987) performed with the greatest accuracy (error of prediction 1,3 mm), i.e. the position of mouth fissure corresponds to the

level of 3/4 mark of the central maxillary incisor height. This rule proposed for males worked accurately in females as well.

The best estimation (expressed as the absolute mean difference) of upper vermilion line position in males was produced using the guideline of Geroge (1987), performing with error of prediction of 1,7 mm, i.e. the upper lip margin was situated at the level of transition between the first and the second quarter of the central maxillary incisors. In females, the margin was positioned a little bit upwards, but mostly (in 80 %) did not exceed the level of the upper margin of the maxillary incisor crown. The lower vermilion line was predicted the most accurately using the method of Veselovskaya (2004, personal communication), Fedosyutkin & Nainys (1993), Lebedinskaya (1998), Gatliff (1984) or Taylor (2001), with error of prediction 2,3 mm, i.e. it corresponded to the level of lower edge of mandibular central incisor crown in the most of cases.

The height of upper and lower lip in females was the most accurately estimated by the method of Wilkinson et al. (2003). The error of prediction was 0,9 mm (13 % of the actual height) for the upper lip, and 1,7 mm (18 %) for the lower lip. The height of upper lip in males was the most accurately estimated by the method of George (1987), displaying difference of 1,1 mm (19 % of the actual height), i.e. the upper lip height is equal to a half of the maxillary central incisor height (a distance between 1/4 and 3/4 transition marks). The lower lip height in males was the most accurately predicted using a regression equation of Wilkinson et al. (2003) showing the error of prediction 1,8 mm (21 % of the actual lip height).

The second part of the research concerned with an assessment of the strength of the association between craniofacial shape and the shape of soft tissues in the profile via geometric morphometrics. The results of this study lead to the realization that soft tissues might not follow the underlying structures as closely as expected. The greatest amount of association between the skeletal contour and overlying soft tissues was exhibited by the region of the nasal root (predictive power: 40.2%, $RV = 0.42$, $r_{PLS1} = 0.72$) and the lower lip and chin (predictive power: 37.3%, $RV = 0.41$, $r_{PLS1} = 0.65$). The smallest statistically significant covariation was displayed by the upper lip and the maxilla (predictive power: 9.6%, $RV = 0.14$, $r_{PLS1} = 0.43$). The shape covariation between the nasal bridge and the tip and lateral border of the nasal aperture was found to be statistically insignificant (predictive power: 5.8%, $RV = 0.05$, $r_{PLS1} = 0.26$). These findings are in agreement with the experience that the shape of nose profile and upper lip are very difficult to be reconstructed accurately.

The thesis is closed by two examples of practical application of the method on historical osteological material.

Key words

Facial reconstruction, facial approximation, prediction guidelines, accuracy of the method, craniofacial relationships, geometric morphometrics

Obsah

1	Stručný vhled do problematiky	1
1.1	Definice	1
1.2	Oblasti využití	2
1.2.1	Forenzní faciální rekonstrukce	2
1.2.2	Faciální rekonstrukce v bioarcheologii	4
1.3	Principy metody	6
1.3.1	Predikční pravidla	6
1.3.2	Tloušťka měkké tkáně	9
1.4	Členění metod	13
2	Omezení metody a východiska disertační práce	19
2.1	Celková spolehlivost metody	19
2.2	Kraniofaciální vztahy	30
2.3	Cíle práce	40
3	Vlastní práce a výsledky	41
3.1	Materiál a metody	41
3.1.1	Materiál	41
3.1.2	Metody	41
3.2	Výsledky a diskuze predikčních pravidel	43
3.2.1	Prominence nosu	43
3.2.2	Poloha a výška rtů	60
3.2.3	Poloha oční koule v očnici	67
3.3	Vztah skeletálního a měkkého profilu obličeje	72
3.4	Příklady praktické aplikace metody	81
4	Shrnutí a závěr	83
	Použitá literatura	87
	Přílohy	101
	Seznam antropometrických bodů použitých v textu	102
	Seznam publikací	103

1 Stručný vhled do problematiky

1.1 Definice

Antropologická rekonstrukce přibližné podoby člověka podle lebky je v širším slova smyslu oblastí antropologie, která studuje vzájemnou souvislost mezi morfologií obličeje a morfologií lebky. Výzkumným cílem v této sféře je nejen snaha porozumět obecným pravidlům morfogeneze, ale řešit i řadu konkrétních teoretických a praktických problémů. Týká se také detailního zkoumání a měření tloušťky měkkých tkání obličeje. Je spojujícím článkem mezi somatologií a kraniologií v systému antropologických věd (Balueva et al., 1988). V kontextu interdisciplinárního přístupu antropologická rekonstrukce podoby člověka čerpá poznatky z věd biomedicínských (např. anatomie, ortodontie, plastická chirurgie, oční lékařství, biometrika, klinické lékařské studie), kořeny má v antropologii (studium lidské variability populací současných i minulých), inspiraci může nacházet ve vědách historických (archeologie), využívá moderních fyzikálních (počítačová tomografie, magnetická rezonance, ultrasonografie, rentgenografie) i statistických metod, prolíná se s uměním.

V užším slova smyslu je rekonstrukce přibližné podoby člověka podle lebky¹ (též faciální rekonstrukce, faciální aproximace²) metoda antropologie, jejímž předmětem je „znovuobnovení“ ztracených nebo neznámých rysů obličeje člověka na základě morfologie jeho lebky. Jedná se tedy o aplikaci poznatků zjištěných ve výše uvedených oborech v praxi. Dle Neave et al. (2002) je rekonstrukce podoby vědeckou interpretací lebky za účelem znovuvytvoření obličeje jedince. Lee et al. (2012) faciální rekonstrukci popisují jako techniku založenou jak na vědeckých standardech, tak na umělecké dovednosti. Jedná se o směs vědy a umění (Taylor, 2001), avšak názory na „množství“ obsažené vědy se různí (Stephan, 2003). Bez ohledu na „míru vědeckosti“ hlavním cílem faciální rekonstrukce zůstává znovuvytvořit *in vivo* obličej jedince, který se dostatečně podobá zemřelé osobě tak, aby jej bylo možno rozpoznat (Prag & Neave, 1997; Wilkinson, 2010).

Termín rekonstrukce či aproximace podoby označuje také výsledek celého procesu, tj. kresbu či model obličeje.

¹V následujícím textu bude uváděn zkrácený název „rekonstrukce podoby/obličeje“, „aproximace podoby/obličeje“ nebo pouze „rekonstrukce/aproximace“.

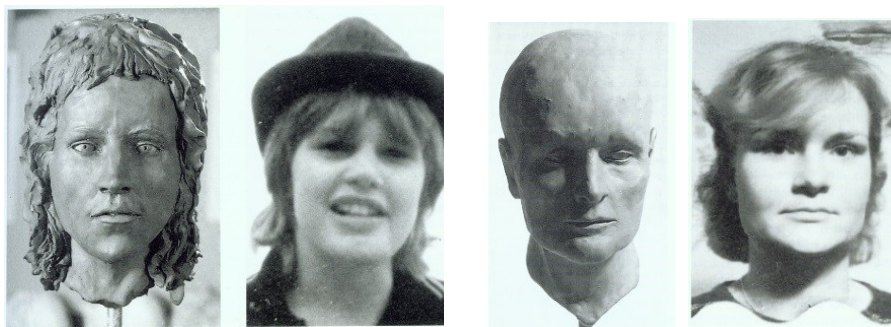
²Z anglického „facial reconstruction“, „facial approximation“ (např. Stephan, 2003a; Wilkinson, 2010), v tomto textu jsou oba termíny používány jako vzájemně zaměnitelné.

1.2 Oblasti využití

Metoda rekonstrukce podoby je využívána v kontextu forenzní antropologie a bioarcheologie.

1.2.1 Forenzní faciální rekonstrukce

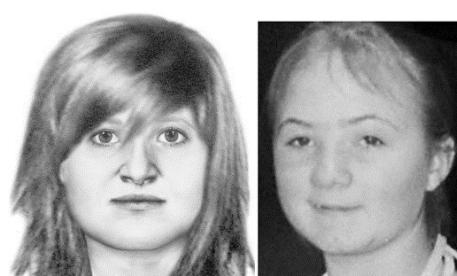
Forenzní faciální rekonstrukce (např. Haglund & Reay, 1991; Prag & Neave, 1997; Taylor, 2001; Stephan & Henneberg, 2006; Hayes, 2014), tj. rekonstrukce podoby vytvořená v rámci kriminalistického vyšetřování za účelem identifikace kosterních pozůstatků (Obr. 1–3), je využívána v případech, kdy policie nemá žádné další stopy vedoucí ke zjištění identity neznámé zemřelé osoby (Wilkinson et al., 2006). Proto bývá někdy označována jako „metoda poslední možnosti“ (Gatliff, 1984; Stephan & Henneberg, 2006). Základním cílem forenzní faciální rekonstrukce je vytvořit obličej jedince za jeho života, který nese dostatečnou podobu se zemřelou osobou a umožní tak členům rodiny nebo blízkým známým jeho rozpoznání (Wilkinson et al., 2006). Podle doporučení Vědecké pracovní skupiny pro forenzní antropologii (Scientific Working Group for Forensic Anthropology, SWGANTH, Guyomarc’h et al., 2014) jsou úkolem faciální rekonstrukce (a) odhadnout *ante mortem* podobu obličeje, (b) navrhnout možnou identitu, (c) upoutat pozornost veřejnosti. Taková rekonstrukce podoby může v některých případech pomoci i při vyloučení některé z pohřešovaných osob (Snow et al., 1970), zúžit okruh vytypovaných jedinců a nasměrovat další vyšetřování (Richard et al., 2014). Mezi forenzními antropology panuje všeobecný souhlas, že metoda faciální rekonstrukce nemůže poskytnout jednoznačnou pozitivní identifikaci. Ta musí být prokázána jinými spolehlivými forenzními metodami (např. DNA analýza, porovnání zubních záznamů či rentgenových snímků). Úspěšně vyřešené případy (tj. byla-li neznámá osoba identifikována) jsou jedinou zpětnou vazbou, že obličej rekonstruovaný podle lebky se skutečně podobal vzhledu dotyčné osoby za života. Nejedná se tedy o identifikační nástroj, nýbrž nástroj vyšetřovací – investigativní (Richard et al., 2014).



Obr. 1. Forezní faciální rekonstrukce a fotografie správně identifikovaných cílových osob. Převzato podle Prag & Neave (1997).



Obr. 2. Forezní faciální rekonstrukce a fotografie správně identifikované cílové osoby a její lebky. Převzato podle Taylor (2001).



Obr. 3. Forezní faciální rekonstrukce a fotografie správně identifikované cílové osoby. Převzato podle Hayes (2014).

V případě forezní faciální rekonstrukce je vyžadováno striktní dodržování daných postupů a respektování morfologie lebky ve snaze co nejvíce omezit subjektivní interpretaci výsledné podoby. Dle Taylor (2001) a Davy-Jow (2013) je nutné vyhnout se přílišné „finalizaci“ rekonstruovaného obličeje. Často je potřeba obětovat určitý stupeň realističnosti a zamezit přidávání detailů, které nemohou být odvozeny z kosterních pozůstatků. Ačkoliv neobvyklé, něčím zvláštní obličeje, jsou lépe rozpoznatelné (Valentine & Bruce, 1986), mnoho charakteristických znaků (jizvy, vrásky, tvar ušních boltců, obličejové ochlupení) není možno z morfologie lebky odhadnout. U znaků, pro které není dostatek opory v anatomii lebky či nálezových okolnostech (např. věkové změny, hustota obočí, apod.) a přesto je jejich zobrazení nevyhnutelné, Taylor (2001) doporučuje záměrně dvojznačné zobrazení daného znaku (např. jedno obočí lehce odlišné od druhého) nebo vytvoření anatomicky správného průměrného znaku (Taylor, 2001; George, 1987). Při rekonstrukci rekonstruovaného obličeje tak vznikne prostor pro přizpůsobení vnímané reality skutečné podobě a zvýšení šance na rozpoznání jedince. Například pouze naznačený styl úpravy vlasů (maskovaný nebo rozmazaný) vede ke snazšímu rozpoznání jedince (Frowd, 2012). V případech, kde nejsou dostupné informace o typu vlasů, dle autorů Fernandes et al. (2013) a Stephan & Henneberg (2006) rekonstrukce podoby prezentované bez vlasů dosahovaly lepších výsledků v rekogničních testech než rekonstrukce zobrazené

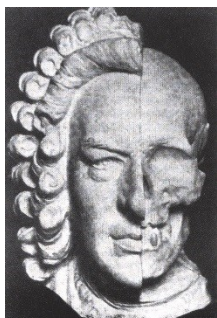
s vlasy. Obecně je také doporučováno zobrazení ve stupních šedi, které redukuje vnímání barvy vlasů, očí, kůže, v případech, kde tyto informace nejsou k dispozici (Davy-Jow, 2013). Také výraz by měl být neutrální, pouze v případech něčím typické dentice mohou být rty rozevřené (Davy-Jow, 2013). Toto se týká jak manuálních, tak počítačových metod. Použitá textura může iniciovat nesprávné rozpoznání. Chyby vnášené v této fázi do výsledné rekonstrukce mohou být zavádějící, a tak znemožňující identifikaci. V případě počítačových rekonstrukcí není doporučováno použití textury konkrétního žijícího jedince, protože do rekonstruovaného obličeje vnáší nechtěné jemné detaily (Claes et al., 2010a), které nemusí odpovídat skutečnosti (skutečné podobě neznámého jedince za jeho života).

1.2.2 *Faciální rekonstrukce v bioarcheologii*

V kontextu bioarcheologie jsou faciální rekonstrukce vytvářeny zejména pro publikační účely či muzejní expozice. Hlavním cílem vytvořených rekonstrukcí podoby je přitáhnout pozornost laické i vědecké veřejnosti, zatraktivnit výsledky archeologicko-antropologického výzkumu. Jejich podkladem je historický kosterní materiál. Zobrazují podobu obyčejných bezejmenných či nálezovými okolnostmi výjimečných jedinců minulých populací, jejichž ostatky byly odkryty při archeologických výzkumech (např. Králík et al., 2006; Vanek et al., 2015; Kustár, 1999; Prag & Neave, 1997). Doplnují také antropologicko-lékařské průzkumy historických osobností (Obr. 4–6; např. *Přemyslovci* – Vlček, 1999; *J. S. Bach* – Wilkinson, 2010; *Tycho Brahe* – Guyomarc'h et al., 2018; aj.). Metoda bývá využívána také pro ztvárnění obličejových rysů jedinců, například z anatomických muzejních sbírek, jejichž obličejový skelet je postižen výraznou patologií (Obr. 7–9; např. Klepáček & Malá, 2012; Gaytán et al., 2009; Wilkinson & Neave, 2003). Rekonstruovaná podoba pak může být porovnána s dobovým vyobrazením dané osobnosti. U mnoha historických osobností se však jejich skutečný vzhled nezachoval a jejich podoba tak, jak ji známe, je pouze výrazem tvůrčova cítění dle dobových uměleckých schémat či standardů. Obličej rekonstruovaný podle lebky poskytuje v podstatě větší informaci. Umožňuje porovnání fyziognomických typů soudobého obyvatelstva s populacemi minulými (Balueva & Veselovskaja, 2010). V paleoantropologii se metoda využívá k vytvoření podoby jedinců určitých vývojových fází evoluce člověka.



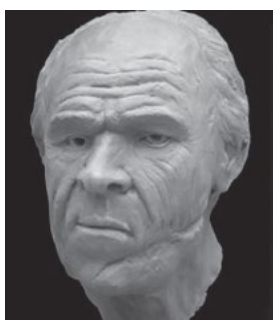
Obr. 4. Rekonstrukce podoby J. S. Bacha. Vlevo: autor – C. Wilkinson, převzato podle Wilkinson (2010). Vpravo: autor – W. His, převzato podle Prag & Neave (1997).



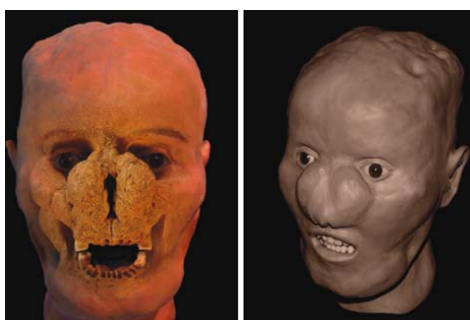
Obr. 5. Rekonstrukce podoby Tycho Brahe. Převzato podle Guyomarc'h et al. (2018).



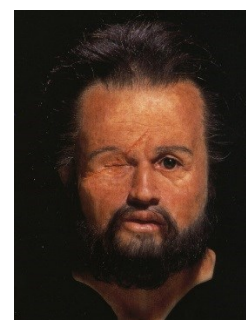
Obr. 6. Rekonstrukce podoby Richarda III. Autor – C. Wilkinson, převzato podle www.culture24.org.uk³



Obr. 7. Faciální rekonstrukce jedince, jehož lebka nese známky zhojeného sečného poranění dolní čelisti. Převzato podle Wilkinson (2010).



Obr. 8. Faciální rekonstrukce jedince, jehož lebka nese známky *leontiasis ossea*. Převzato podle Gaytán et al. (2009).



Obr. 9. Faciální rekonstrukce Filipa II. nesoucí známky zhojeného sečného poranění v oblasti pravé očnice. Převzato podle Prag & Neave (1997).

Oproti forenzní rekonstrukci je v případě rekonstrukcí založených na historickém kosterním materiálu tolerována větší volnost ve ztvárnění obličejových detailů, textury kůže nebo různých mimických výrazů, často vyvedených až hyperrealisticky, včetně barvy očí a vlasů (Wilkinson, 2010). Takové detaily, pro které není v morfologii lebky či nálezových okolnostech žádná opora, by jinak u rekonstrukcí pro forenzní účely mohly ztížit nebo znemožnit rozpoznání cílového jedince (Davy-Jow, 2013).

³ Culture24 Reporter. Head of Richard III reconstructed in four-hour operation based on DNA test results. In: *Culture24* [online]. 10 March 2015. [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: <http://www.culture24.org.uk/history-and-heritage/royal-history/art52050-head-of-richard-third-reconstructed-in-four-hour-operation-based-on-dna-test-results>

1.3 Principy metody

Faciální aproximace je založena a správné aplikaci predikčních pravidel v kombinaci s tloušťkou měkkých tkání obličeje. Predikční vodítka definují umístění očí, nosu, rtů a uší, a tloušťka měkkých tkání determinuje tvar měkkých tkání obalujících lebku (De Greef et al., 2009).

1.3.1 Predikční pravidla

Metoda rekonstrukce přibližné podoby podle lebky se na jedné straně opírá o skutečnost, že mezi velikostí a tvarem lebky (její obličejové části) a velikostí a tvarem obličeje (zejména obličejových prvků jako jsou oči, nos, rty, apod.) existují vzájemné vztahy. Tyto vztahy jsou popsány jako tzv. predikční vodítka nebo pravidla⁴ a jejich znalost je předpokladem pro vytvoření rekonstrukce podoby. Predikční vodítka vychází z anatomických poměrů lebky a obličeje („anatomická“⁵ vodítka) nebo jsou založena na výsledcích statistických analýz („statistická“ vodítka).

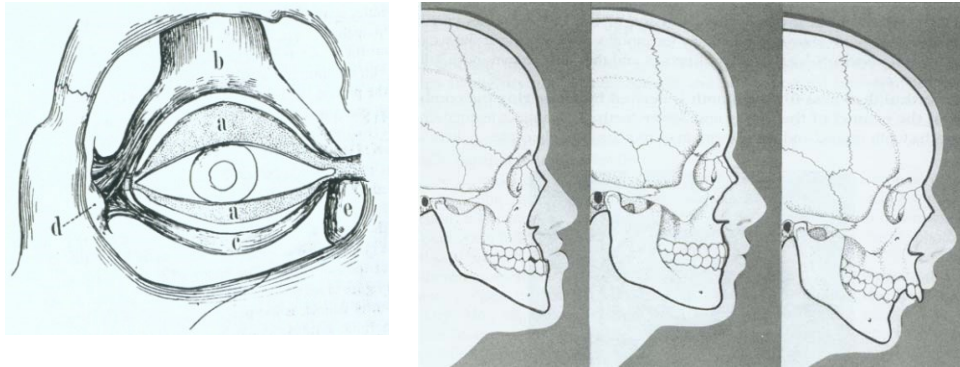
Dříve uvedený tzv. „anatomický“ typ vodítek popisuje jednoznačnou souvislost mezi znakem na obličeji (anatomickou strukturou měkké tkáně) a konkrétní strukturou na povrchu lebky nebo je dán těsným přiléháním měkké tkáně k povrchu kosti, kde je málo prostoru pro vyšší variabilitu měkké tkáně, která „kopíruje“ pod ní ležící tvar lebky (Obr. 10). Jedná se tedy o detailní znalosti anatomie lidské lebky a obličeje, které jsou uváděny v definicích či požadavcích na aplikaci rekonstrukčních metod. Popisy těchto vztahů jsou většinou výsledkem zkoumání pitevního materiálu (např. Anderson et al., 2008; Stephan & Devine, 2009). Příkladem prvního typu vodítka může být umístění vnějšího koutku oka, který bývá lokalizován do úrovně tzv. Whitnallova hrbolku⁶ (Stewart, 1983). Ten je přítomen u většiny jedinců (80 %, Stewart, 1983) a nachází na vnitřním povrchu laterální stěny očníce u jejího okraje právě v místě, kde se upíná *ligamentum palpebrale laterale*. Příkladem druhého typu vodítka může být závislost mezi prominujícími nadočnicovými oblouky na obličeji a na lebce, tvar profilu hřbetu nosu a tvar profilu nosních kostí, které jsou jeho podkladem, souvislost mezi celkovými tvarem obličeje a obrysem lebky při pohledu z *norma frontalis*, vzájemná pozice rtů a pozice horního

⁴ Z angl. „prediction guidelines“ (např. Stephan, 2003) nebo „prediction rules“ (např. Guyomarc’h & Stephan, 2012). Používáno jako synonyma.

⁵ Vlastní typologie

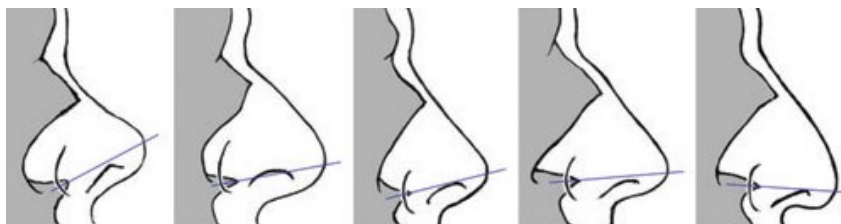
⁶ Též angl. „malar tubercule“, „zygomatic tubercule“ (Stewart, 1983) nebo *tuberculum orbitale* (Buschkowitsch, 1927, cit. dle Stewart, 1983)

a dolního zubního oblouku, aj. (další např. viz Fedosyutkin & Nainys, 1993; Stephan & Devine, 2009; Stephan, 2010).

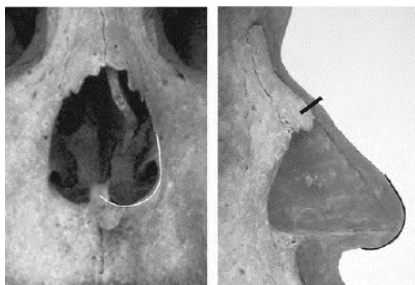


Obr. 10. Příklady „anatomických“ predikčních pravidel. Vlevo: Znáznornění tzv. Whitnallova hrbolku (ozn. písmenem d), převzato podle Stewart (1983). Vpravo: Vzájemné postavení horní a dolní čelisti a postavení horního a dolního rtu a celkový profil obličeje. Převzato podle Taylor (2001).

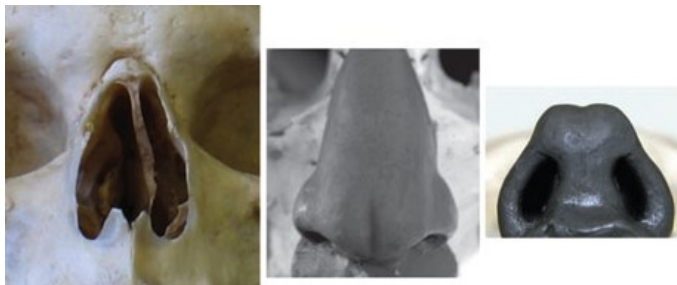
„Statistický“ typ vodítek představuje vzájemné vztahy mezi lebkou a obličejem, které jsou založeny na statisticky zjištěné korelaci v přítomnosti nebo velikosti (rozměru) daného znaku na obličeji a výzkumníkem vybraného znaku/rozměru na lebce. Taková pravidla popisují korelaci mezi výskytem určitých typů morfologických znaků (tzv. „kvalitativní“ vodítka) nebo mezi rozměry (tzv. „kvantitativní“ vodítka). Příkladem „kvalitativního statistického“ typu predikčního pravidla může být popisovaný vztah mezi směrem předního nosního trnu a směrem prominence hrotu nosu a s tím související tvar dolní části *apertura piriformis* a vzájemná pozice hrotu nosu, báze nosu a nosních křídel (Taylor, 2001; Fedosyutkin & Nainys, 1993) nebo frekvence výskytu kulatého či špičatého hrotu nosu a odpovídajícího tvaru obrysu dolní části okraje *apertura piriformis* (Rynn et al., 2010; Ullrich & Stephan, 2016) či zdvojená *spina nasalis anterior* a zdvojený hrot nosu (Rynn et al., 2010), viz Obr. 11–13.



Obr. 11. Znáznornění vztahu mezi směrem předního nosního trnu a směrem hrotu nosu. Převzato podle Wilkinson (2010).



Obr. 12. Vzájemná korespondence mezi tvarem okraje nosního otvoru a tvarem hrotu nosu z profilu dle Ullrich & Stephan (2016). Převzato podle Ullrich & Stephan (2016).



Obr. 13. Zdvojený přední nosní trn a zdvojený hrot nosu. Převzato podle Wilinon (2010).

„Kvantitativní statistická“ vodítka jsou využívána k predikci velikosti nebo pozice konkrétních obličejových znaků vzhledem k rozměrům kostního podkladu. Výsledkem statistických analýz jsou jednoduché nebo regresní rovnice. U recentně publikovaných pravidel jsou navíc známy informace o spolehlivosti, jejich aplikace je více méně jednoduchá, vypočítaná hodnota (tedy interpretace znaku na lebce) je jednoznačná. Například dle Rynn et al. (2010) nebo Prag & Neave (1997) šířka *apertury piriformis* odpovídá 3/5 maximální šířky chrupavčité části nosu (tj. vzdálenost bodů *alare*) nebo největší vzdálenost laterálních okrajů maxilárních špičáků odpovídá 75 % šířky rtů (tj. vzdálenost bodů *cheilion*, Stephan & Henneberg, 2003). Na tento typ predikčních pravidel je v současnosti zaměřena největší pozornost výzkumníků. Stávající vodítka jsou validována (např. Maltais Lapointe et al., 2016; Stephan, 2002b; Stephan, 2003b; Stephan et al., 2003; Rynn & Wilkinson, 2006; Mala, 2013; Zednikova Mala & Velemínska, 2016; Zednikova Mala & Velemínska, 2018), navrhována jsou vodítka nová (např. Inanda et al., 2009; Utsuno et al., 2008; Utsuno et al., 2016; Davy-Jow et al., 2012), což na jedné straně vede ke zvýšení spolehlivosti rekonstrukcí podoby, na druhé straně však nepřispívá ke zpřehlednění používaných postupů a jen zdůrazňuje fakt absence jakékoliv standardizace metody. V současné době jsou využívána predikční pravidla pro polohu oční koule v očníci (např. Guyomarc'h et al., 2012; Wilkinson & Mautner, 2003), polohu očních koutků (např. Stephan et al., 2009), šířku nosu (např. Rynn et al., 2010; Balueva et al., 2010), polohu hrotu nosu z profilu (např. Rynn et al., 2010; Stephan et al., 2003; Inanda et al., 2009; Lebedinskaya, 1998), tvar hrotu nosu z frontálního pohledu (Davy-Jow et al., 2012), tvar profilu nosu (Lebedinskaya, 1998; Balueva et al., 2009), polohu bodu *subnasale* (Utsuno et al., 2018), šířku rtů (např. Stephan & Henneberg, 2003; Stephan & Murphy, 2008), výšku rtů (např. Wilkinson et al., 2003; Lebedinskaya, 1998), polohu štěrbiny ústní (např. George, 1987; Fedosyutkin & Nainys, 1993). Z výčtu znaků je patrné, že tato vodítka postihují

základní proporce obličeje (níže popisované konturní schéma). Vzhledem ke složitosti tvaru lidského obličeje zbývá dost prostoru pro vlastní subjektivitu realizátora rekonstrukce.

1.3.2 *Tloušťka měkké tkáně*

Na druhé straně se metoda rekonstrukce přibližné podoby opírá o znalost tloušťky/hloubky⁷ měkkých tkání ve vybraných antropometrických bodech obličeje. Ta představuje kvantitativní a reliabilní bázi rekonstrukčních metod (De Greef et al., 2009). Výzkum tloušťky měkkých tkání je značně extenzivní, první studie spadají do konce 19. století (Kollman & Büchly, 1898, cit. dle Stephan & Simpson, 2008) a pokračují dodnes (Stephan & Preisler, 2018) a zahrnují celkem více než 105 000 jedinců (Stephan & Simpson, 2008; Stephan, 2014). Tloušťka měkké tkáně měřená na mrtvolách i žijících jedincích byla zjišťována u mnoha různých populací, např. Australanů (Stephan & Preisler, 2018), Afroameričanů (Rhine & Campbell, 1980, cit. dle Taylor, 2001), Belgičanů (De Greef et al., 2005), Britů (Wilkinson, 2002), Čechů (Drgáčová et al., 2016), Číňanů (Wang et al., 2016), Egypťanů (El-Mehallawi & Soliman, 2001), Japonců (Utsuno et al., 2010), Korejců (Hwang et al., 2012), Němců (Helmer, 1984), Rusů (Lebedinskaya et al., 1993), Slováků (Panenková et al., 2012), Zulu (Aulsebrook et al., 1996), aj. Vyčerpávající výčet publikací je uveden v pracích autorů Stephan & Simpson (2008), Stephan (2014), Stephan et al. (2016). K měření hodnot tloušťky měkkých tkání obličeje jsou využívány různé techniky – vpichy jehlou (na pitevním materiálu, např. Simpson & Henneberg, 2002), radiografie (např. George, 1987; Dumont, 1986), ultrazvuk (např. Lebedinskaya et al., 1993; De Greef et al., 2005; Stephan & Preisler, 2018), počítačová tomografie (např. Panenková et al., 2012; Drgáčová et al., 2016), magnetická rezonance (např. Sahni et al., 2008). Každá technika měření má své výhody a nevýhody (Stephan & Simpson, 2008). Získané hodnoty jsou pro každý landmark až na výjimky (např. Panenková et al., 2012; Stephan & Preisler, 2018) prezentovány formou tabelovaných hodnot aritmetických průměrů, standardních odchylek průměru, minimální a maximální změřené hodnoty.

Ve snaze o individualizaci průměrných hodnot a snížení chyby v odhadu tloušťky měkké tkáně u konkrétního jedince jsou data získaná na různě velkých vzorcích jednotlivými autory různě kategorizována, zejména pak dle pohlaví, věku, populační afinity a hmotnosti (body mass indexu – BMI). Jednotlivé studie se však liší ve způsobu stanovení věkových intervalů či volbou kritériích pro zařazení do skupin dle hmotnosti. Dalším

⁷ Z angl. „soft tissue thickness“, „soft tissue depth“; oba termíny jsou přípustné a v literatuře používané (Stephan & Preisler, 2018; Stephan & Guyomarc’h, 2016).

dělením se v jednotlivých kategoriích snižují počty měřených jedinců. Naměřená data jsou následně prezentována ve formě aritmetických průměrů bez ohledu na typ jejich rozložení (Stephan et al., 2013). Různí autoři také hodnoty tloušťky měkké tkáně obličeje zjišťují na odlišných souborech landmarků, čímž je omezena vzájemná porovnatelnost mezi skupinami. Některé definice bodů se opírají o samotné měkké tkáně (De Greef et al., 2005), které při vytváření rekonstrukcí podoby však nejsou k dispozici. Rovněž ne vždy jsou detailně popsány způsoby měření, resp. vztah bodu na lebce a bodu na obličeji, mezi kterými se měří vzdálenost, což může následně vést k chybné aplikaci daných hodnot. Rozdíly ve zjištěných hodnotách jsou dány také polohou měřeného obličeje (sedící/ležící jedinec, Munn & Stephan, 2018). Publikovaná data jsou tedy značně složitá, těžko porovnatelná a málo standardizovaná, což komplikuje výběr dat vhodných pro konkrétní forenzní případy.

O syntézu a zjednodušení se pokusili autoři Stephan & Simpson (2008) a v navazující studii Stephan (2014) analýzou chyby měření a variability dat v rámci a mezi jednotlivými kategoriemi z pohledu roku publikace, metody měření, „rasy“ a pohlaví. Své výsledky shrnují následovně: (1) nebyl zjištěn žádný jasný sekulární trend v tloušťce měkké tkáně obličeje, (2) bez ohledu na to, zda byla data získána na žijících jedincích nebo mrtvolách, byla zjištěna vysoká variabilita hodnot získaných různými technikami měření, (3) nebyly zjištěny jasné rozdíly mezi daty ne-Kavkazoidních populací a průměrnými hodnotami pro populace Kavkazoidní, (4) byly zjištěny pouze minoritní rozdíly mezi pohlavími. V dalších studiích (Stephan et al., 2016; Stephan et al., 2013; Stephan, 2017) bylo zjištěno značné překrývání naměřených hodnot pro muže a ženy i různé věkové kategorie (dospělých jedinců), variabilita v rámci stejného pohlaví byla vysoká oproti variabilitě mezi pohlavími. Stephan proto doporučuje sloučení všech dosud publikovaných hodnot do jednoho „supersouboru“ a další dělení dle pohlaví a věku (u dospělých jedinců) považuje za neopodstatněné.

De Greef et al. (2009) se pokusili zmapovat skutečný dopad vlastností jako je pohlaví, věk a BMI na tloušťku měkké tkáně obličeje pomocí multivariační analýzy hrubých dat získaných na 967 dospělých jedincích. Nejsilněji rozdíly v tloušťce měkké tkáně obličeje mezi jedinci ovlivňoval BMI. Věk a pohlaví měly z praktického hlediska na tloušťku měkké tkáně velmi malý vliv. Věkový rozdíl 50 let neznamenal u většiny sledovaných landmarků změnu větší než 1 mm. Rozdíl větší než 1 mm mezi pohlavími byl zaznamenán pouze v oblasti horního rtu a tváří. Autoři však zjistili, že vliv těchto vlastností není ve všech částech obličeje stejný a že úplné vyloučení faktorů jako věk a pohlaví musí být zvažováno s opatrností a určitě ne plošně u všech landmarků. Např. v oblasti horního rtu, kde BMI nemá žádný vliv, kombinace faktorů věku a pohlaví může vést k rozdílu až 2,1 mm mezi starým mužem a mladou ženou. Svůj výzkum doplňují regresními rovnicemi, které

umožňují spočítat individuální hodnoty tloušťky měkké tkáně v jednotlivých antropometrických bodech pro konkrétní případ dle BMI, věku a pohlaví (De Greef et al., 2009).

Vliv BMI na variabilitu tloušťky měkké tkáně a rozpoznatelnost obličeje rekonstruovaného na základě jedné a téže lebky zkoumali Starbuck & Ward (2007). Výsledky jejich výzkumu ukazují, že rozdíly v hmotnosti (hubený, normální, obézní jedinec) výrazně ovlivňují správnou rozpoznatelnost obličeje. Ačkoliv rysy obličeje, jako umístění očí a uší, velikost a tvar nosu a rtů, byly u všech tří porovnávaných rekonstrukcí shodné, většina (54 %) pozorovatelů je vnímala jako zcela odlišné osoby. Zdá se tedy, že velikost obličeje (tj. znázornění BMI) jsou pro správnou identifikaci obličeje důležitější než konfigurace obličejových rysů (Starbuck & Ward, 2007).

Vlivem použití populačně specifické tloušťky měkké tkáně na spolehlivost rekonstrukce se zabývali Wilkinson et al. (2002) a Fernandes et al. (2012). Wilkinson et al. (2002) testovali šest různých setů tloušťky měkké tkáně. Na základě hodnocení výsledných rekonstrukcí pomocí míry podobnosti a superimpozice uzavírají, že pro vytvoření rekonstrukce podoby jedince na základě lebky jsou správné hodnoty tloušťky měkkých tkání s ohledem na etnickou skupinu důležité (rekonstrukce dosahovala nejlepších výsledků), ale naznačují také, že přiměřené podobnosti může být dosaženo dokonce s použitím dat nesprávného etnického původu. Navrhují také, že je vhodné vyhnout se přísnému dodržování předepsané tloušťky měkké tkáně. Přednostně by se měla rekonstrukce podoby opírat o morfologii lebky a anatomii obličeje a tloušťka měkké tkáně by měla být využívána pouze jako pomocné vodítko (Wilkinson et al., 2002). Fernandes et al. (2012) porovnávali pomocí rekogničních testů rekonstruovaných obličejů (viz kapitola 2.1. Celková spolehlivost metody) brazilský vs. mezinárodní set tloušťky měkké tkáně. Ačkoliv rekonstrukce vytvořená na základě brazilských dat (lebka cílového jedince patřila brazilské ženě) vykazovala lepší výsledky, tyto nebyly statisticky významně odlišné od míry identifikace dosažené s použitím mezinárodního setu (Fernandes et al., 2012).

Důkladný výzkum problematiky tloušťky měkkých tkání obličeje vedl k založení on-line úložiště pro hrubá data, která mohou výzkumníci dobrovolně sdílet a využívat pro své vlastní výzkumné účely (www.CRANIOFACIALidentification.com), a navržení jednotné terminologie a definic landmarků (Cagle & Stephan, 2016), kterou autoři doporučují využívat v dalších výzkumech a podpořit tak vyšší standardizaci a porovnatelnost. Stephan (Stephan et al., 2013; Stephan & Guyomarc'h, 2016) dále pro reprezentaci hodnoty tloušťky měkké tkáně navrhuje nahrazení aritmetického průměru jinými metrikami.

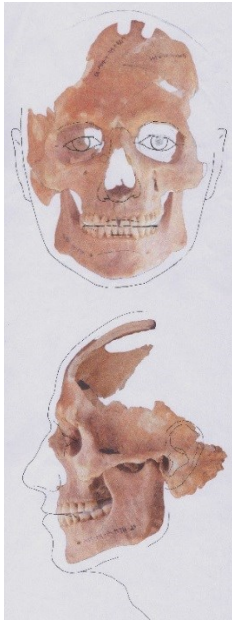
Jiný přístup k individualizaci průměrných hodnot tloušťky měkké tkáně obličeje zvolili Simpson & Henneberg (2002). Na základě nalezené statistické korelace mezi

tloušťkou měkké tkáně a lineárními rozměry lebky u třiceti mrtvol navrhli regresní rovnice pro odhad tloušťky měkké tkáně v jednotlivých antropometrických bodech právě z lebečních rozměrů. Jejich rovnice byly validovány autory Stephan & Sievwright (2018) na souboru 71 žijících jedinců měřených ultrazvukem. Rovnice publikované v roce 2002 poskytly horší výsledky odhadované tloušťky měkké tkáně než použití aritmetického průměru, nově zjištěné korelace byly obecně nízké a původní regresní model se nepodařilo na aktuálních datech reprodukovat. Autoři (Stephan & Sievwright, 2018) uzavírají, že použití základních kraniálních rozměrů nevedlo ke zdokonalení odhadu tloušťky měkkých tkání obličeje a že vztahy mezi lebečními rozměry a tloušťkou měkké tkáně obličeje jsou mnohem slabší a méně spolehlivé, než se dříve myslelo.

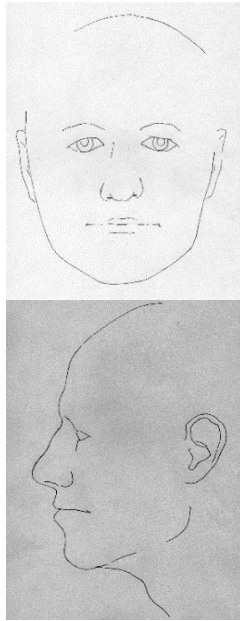
1.4 Členění metod

K vytvoření faciální rekonstrukce lze přistoupit několika způsoby. Všechny jsou v současné době využívány a jejich volba závisí na preferencích realizátora rekonstrukce, technickém a softwarovém vybavení pracoviště či charakteru vstupních dat (fyzická lebka nebo její replika, virtuální model lebky, fotografie lebky, rentgenové snímky lebky). Obecně se rozlišují rekonstrukce dvojrozměrné (2D) a trojrozměrné (3D), manuální a počítačové. Uvedené přístupy lze vzájemně kombinovat.

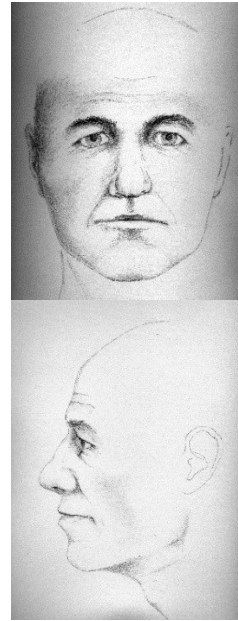
Základem pro jakoukoliv manuální rekonstrukci podoby je vytvoření kontury (konturní rekonstrukce) či schématu při pohledu zepředu a z profilu, které zachycuje základní rysy obličeje, tedy oči, nos, rty, obočí, uši a proporce mezi nimi (Obr. 14a, 14b, 17a). To je získáno aplikací konkrétních predikčních pravidel a tloušťky měkké tkáně ve vybraných antropometrických bodech. Takové konturní schéma může sloužit jako podklad pro kresebnou rekonstrukci (tj. zachycení objemu obličeje vystínováním; Obr. 15; např. Taylor, 2001; Králík et al., 2006), 2D rekonstrukci s počítačovou podporou (sestavení obličeje v grafickém editoru skládáním jednotlivých rysů z databáze jejich kreseb či fotografií; Obr. 17b, 18; např. Ubelaker & O'Donnell, 1992; Miyasaka et al., 1995; Wittwer & Backofen, 2011; Hayes, 2014) nebo 3D sochařskou (manuální) rekonstrukci (nanášení plastické hmoty přímo na lebku a modelace jednotlivých obličejových prvků (Obr. 16; např. Gatliff, 1984; Prag & Neave, 1997; Taylor, 2001; Wilkinson, 2004). Konturní schéma je dle našeho názoru základ, který v rámci manuálních metod reprezentuje nejspolehlivější a nejobjektivněji dosažitelný výsledek. V dalších fázích stínováním nebo modelováním již nevyhnutelně realizátor vnáší do procesu rekonstrukce chybu, která je dána subjektivitou dalšího postupu.



Obr. 14a. Superimpozice kontury měkkých tkání a lebky. Archiv autorky.



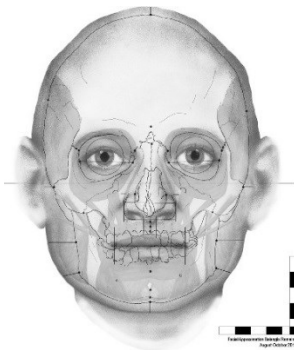
Obr. 14b. Konturní rekonstrukce podoby. Archiv autorky.



Obr. 15. Kresebná rekonstrukce podoby. Archiv autorky.



Obr. 16. 3D manuální sochařská rekonstrukce podoby. Archiv autorky.



Obr. 17a. Superimpozice lebky, obličejových prvků dle vyznačených predikčních pravidel a svalů hlavy. Převzato podle Hayes (2014).

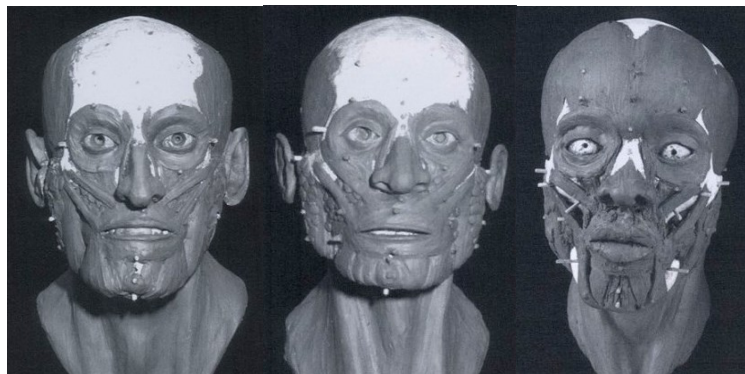


Obr. 17b. 2D počítačová rekonstrukce podoby. Převzato podle Hayes (2014).

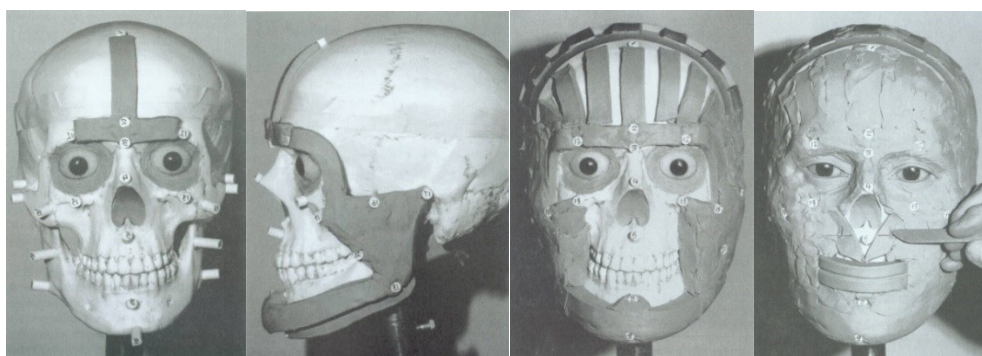


Obr. 18. 2D počítačová rekonstrukce podoby. Archiv autorky.

Manuální 3D metody jsou v literatuře (Taylor, 2001; Wilkinson, 2004; Stephan & Henneberg, 2001; Aulsebrook et al., 1995; Claes et al., 2010b) rozdělovány podle toho, zda se opírají o anatomii hlavy a krku (modelování zvykacích a mimických svalů, žláz, tukové tkáně, kůže), tj. metody „morfoskopické/anatomické“ (Obr. 19), nebo vychází z antropometrie hlavy (nanášení plastické hmoty dle průměrné tloušťky měkkých tkání hlavy; např. Taylor, 2001), tj. metody „morfometrické/hloubky měkkých tkání“ (Obr. 20).



Obr. 19. Ilustrace přístupu „morfoskopického/anatomického“. Převzato podle Wilkinson (2004).

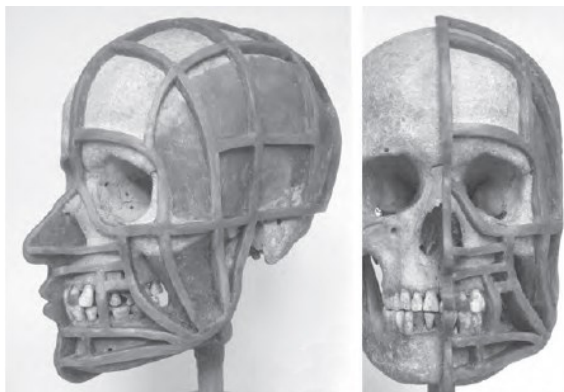


Obr. 20. Ilustrace přístupu „morfoformertrického/hloubky měkkých tkání“. Převzato podle Taylor (2001).

Tyto přístupy jsou často ztotožňovány s odkazy na „ruskou metodu“ (anatomický přístup) a „americkou metodu“ (přístup hloubky měkkých tkání) podle geografického umístění pracoviště autorů, kteří tyto metody vytvořili nebo významně rozvíjeli (M. M. Gerasimov a W. M. Krogman). Jejich spojením pak měla vzniknout tzv. „kombinovaná“ metoda či „britská/Manchesterská“ dle místa vzniku a pracoviště R. Neava, jejího tvůrce (Prag & Neave, 1997). Takové členění bylo po mnoho let přebíráno z publikace do publikace bez hlubšího vhledu do podstaty jednotlivých metod. K tomu jistě přispěla i nepřístupnost (jazyková i politická) originálních rusky psaných prací M. M. Gerasimova „západní“, anglicky komunikující vědecké komunitě. Na neadekvátnost takové klasifikace poprvé upozornil širší vědeckou veřejnost až Stephan v roce 2006 (Stephan, 2006).

Metoda vypracovaná M. M. Gerasimovem byla „západu“ známa např. z německy psaných publikací (Ullrich, 1958), popisována je rovněž českými autory (Titlbachová, 1986). Přesto bývá charakterizována jako postup, při němž je podoba obličeje rekonstruována vybudováním anatomie hlavy způsobem „sval za svaem“ (Taylor, 2001, str. 341; Wilkinson, 2004, str. 49) bez použití průměrných hodnot tloušťky měkkých tkání (Stephan, 2006). Ve skutečnosti jsou podle „ruské školy“ modelovány pouze žvýkací svaly *m. masseter* a *m. temporalis* a modelace mimických svalů se nedoporučuje (Titlbachová, 1986)

z důvodu vysoké nespolehlivosti (Ulrich, 1958). Současně jsou využívány hodnoty tloušťky měkkých tkání obličeje, které jsou simulovány cca 1 cm širokými pásky plastelíny, kterými jsou propojeny jednotlivé regiony rekonstruovaného obličeje (Obr. 21).

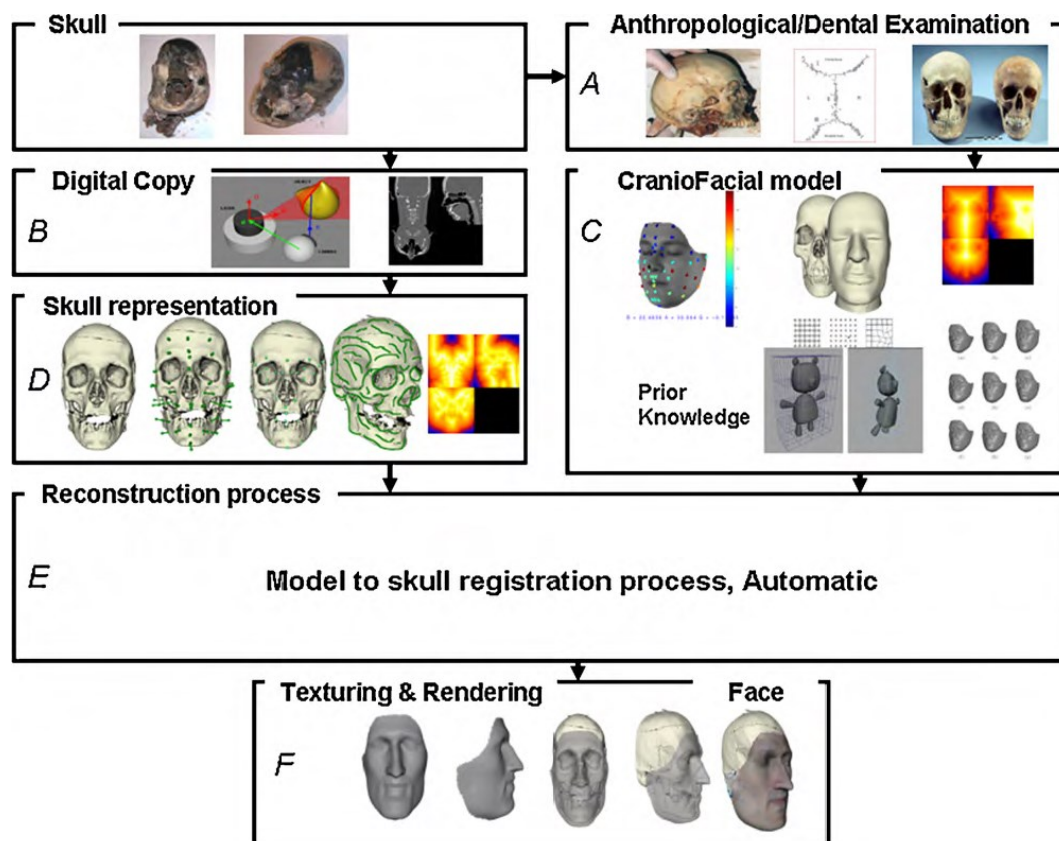


Obr. 21. Ilustrace Gerasimovy metody. Převzato podle Ullrich & Stephan (2016).

Na druhé straně ani „morfometrický přístup“ nespočívá pouze v aplikaci odpovídající tloušťky měkké tkáně. I v tomto případě je vyžadována znalost anatomie pro správný způsob propojení tloušťky měkké tkáně ve vzdálených antropometrických bodech, tak aby byly kontury obličeje zachyceny realisticky (Taylor, 2001; Stephan, 2006). Všechny 3D manuální metody jsou založeny znalostí anatomie obličeje a lebky a průměrné tloušťky měkké tkáně obličeje, tedy kombinují obojí, pouze je kladen různý důraz na jednu nebo druhou stranu. Stephan (2006) proto doporučuje takovou klasifikaci metod rekonstrukce nevyužívat a každý použitý postup by měl být spíše detailně popsán dle konkrétního případu.

3D počítačové rekonstrukce (Wilkinson, 2005; Claes et al., 2010b) se pak odlišují dle stupně automatizace a možnosti uživatele zasáhnout do procesu rekonstrukce a upravit jej. Metody založené na virtuálním sochařství (Wilkinson, 2003; Wilkinson et al., 2006; Short et al., 2014; Lee et al., 2012) napodobují postup manuální sochařské techniky. Plně či částečně automatizované systémy (např. Vanezis et al., 2000; Claes et al., 2006; Claes et al., 2010a; Shrimpton et al., 2014; Guyomarc'h et al., 2014; Berar et al., 2011; Duan et al., 2015; Parks et al., 2013) pojí shodné pracovní schéma (Obr. 22). Jádrem všech metod je kraniofaciální model (CFM). Ten může být přirovnán k expertovi vytvářejícímu manuální rekonstrukci (Claes et al., 2010b). CFM sestává ze tří komponent: kraniofaciální templát (CFT), kraniofaciální informace (CFI) a kraniofaciální deformace (CFD). Kraniofaciální templát je výchozí referenční obličej nebo hlava, která může být reprezentována specifickým jedincem vybraným z databáze dle vlastností jako jsou pohlaví, věk, populační afinita, rozměry neznámé lebky (Vanezis et al., 2000) nebo obecným/průměrným (generickým) obličejem

nebo statistickým modelem (Claes et al., 2006). Kraniofaciální informace popisuje vztah mezi obličejem a lebkou. Takovým vztahem jsou obvykle informace o tvaru povrchu obličeje, povrchu lebky, obličejových svalech, hodnoty tloušťky měkké tkáně obličeje (Shrimpton et al., 2014; Guyomarc'h et al., 2014), výsledky analýzy hlavních komponent modelů hlavy (Berar et al., 2006), výsledky funkčního mapování tvaru lebky do tvaru obličeje, přičemž tato funkce je získána například pomocí metod regresní analýzy (Berar et al., 2011; Duan et al., 2015; Parks et al., 2013; Guyomarc'h et al., 2014), aj. Rekonstrukce podoby je pak získána nalezením geometrické souvislosti mezi CFM a neznámou lebkou a její následnou aplikací. CFD popisuje způsob transformace použitý k lícování kraniofaciálního templátu na lebku neznámého jedince (Claes et al., 2010b). Všechny metody využívají rigidní a afinní transformaci ke sjednocení koordinátového systému lebky a templátu. Na toto základní „hrubé“ napasování navazují nerigidní a neafinní způsoby deformace zajišťující jemné lokální změny a přesné lícování (deformace generické, Parks et al., 2013; Vandermeulen et al., 2006; nebo obličejově specifické, Claes et al., 2006; Claes et al., 2010b).



Obr. 22. Obecné pracovní schéma počítačových rekonstrukcí podoby. Převzato podle Claes et al. (2010b).

Metody počítačové rekonstrukce jsou pak buď holistické, pracují s celou lebkou a celým obličejem najednou (Guyomarc'h et al., 2014) nebo regionální, které model obličeje i lebky rozdělují do několika oblastí, které jsou analyzovány a rekonstruovány nezávisle a opětovně spojeny dohromady do výsledné rekonstrukce (Tilotta et al., 2010; Deng et al., 2016).

Vizuální kvalita počítačové rekonstrukce se odvíjí od kvality vzorků (CFT) v referenční databázi (Claes et al., 2010b) a na použitém algoritmu (typ templátu, způsob deformace). Správná geometrie rekonstruovaného obličeje náležejícího cílové lebce je nejdůležitějším cílem počítačové rekonstrukce, nicméně k získání přirozeného vzhledu rekonstruovaného obličeje může být potřeba aplikace textury (pigmentace kůže).

Ve srovnání s manuálními metodami jsou počítačové metody konzistentní, objektivní, efektivnější (Deng et al., 2016). Manipulace a transformace obličejových rysů a tloušťky měkkých tkání je rychlá, výstupem může být několik verzí jedné rekonstruované podoby (Starbuck & Ward, 2007), které mohou zvýšit pravděpodobnost identifikace rekonstruovaného obličeje (Vanezis et al., 1989). Nevýhodou je v případě omezené databáze obličejů podobnost rekonstrukce s použitým templátem (Vandermeulen et al., 2006). Manuální metody vyžadují vysoký stupeň anatomických znalostí a uměleckých schopností, jejich použití je obtížné, dosažený výsledek subjektivní a variabilní (Claes et al., 2010b). Jsou časově náročné, tedy drahé (Stephan & Henneberg, 2001) a výstupem je jedna odhadovaná podoba (Vandermeulen et al., 2006). Výsledná podoba však může působit realističtější dojmem, což může být přínosné zejména u rekonstrukcí pro expoziční účely. Ačkoliv výhody počítačových metod převažují, je nutno zmínit, že doposud nebyla vytvořena jedna metoda, která by byla vědeckou veřejností jednotně přijímána a která by vykazovala konzistentní a vysokou míru spolehlivosti. Do ceny počítačových rekonstrukcí je také třeba započítat nemalé náklady na pořízení či vyvinutí softwaru a pořízení rozsáhlé databáze virtuálních modelů lebek a příslušných obličejů.

2 Omezení metody a východiska disertační práce

2.1 Celková spolehlivost metody

Spolehlivost, s jakou může být odhadnuta (predikována) podoba obličeje na základě lebky, je téma diskutované již od roku 1913 (např. Von Eggeling, 1913, cit. dle Wilkinson et al., 2006; Snow et al., 1970; Stephan & Henneberg, 2001). Názory na potenciál metody rekonstrukce se pohybují od skepticismu (lze rekonstruovat pouze hrubé rysy obličeje, např. tvar obrysu obličeje, Kollman & Büchly, 1898, cit. dle Stephan & Cicolini, 2010) po idealismus (lze vytvořit podobu, která je snadno, správně a jednoznačně rozpoznatelná jako osoba, které lebka patřila, Prag & Neave, 1997; Wilkinson, 2004).

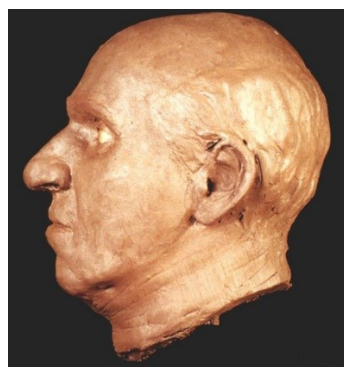
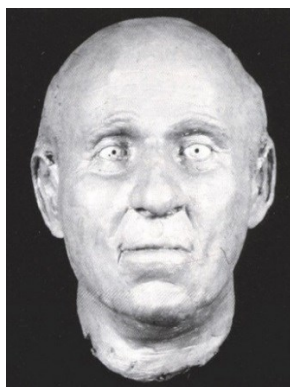
K „měření“ spolehlivosti metody rekonstrukce se využívají různé nástroje. Jednotlivé způsoby její kvantifikace se liší podle toho, jak je spolehlivost (angl. *accuracy*) rekonstrukce definována (Stephan & Cicolini, 2010): (1) jako anatomická podobnost (velikost rozdílu) s *ante mortem* obličejem správně identifikovaného jedince, (2) jako schopnost vygenerovat úspěšný forenzní případ, (3) jako schopnost samotné rekonstrukce podoby bez dalších kontextuálních informací vyvolat jednoznačné a správné rozpoznání jedince.

První způsob se děje přímým párovým porovnáváním rekonstruované podoby se skutečnou podobou cílového jedince⁸ (Obr. 23 a 24) za jeho života (fotografie, Prag & Neave, 1997; virtuální 3D model, Wilkinson et al., 2006) nebo těsně po smrti (posmrtná maska, Von Eggeling 1913, cit. dle Wilkinson et al., 2006; Titlbachová, 1986). Hodnocení vzájemné podobnosti je provedeno kvalitativně slovním popisem nebo kvantitativně na několikabodové škále (např. 1 = velká podobnost, 2 = blízká podobnost, 3 = přibližná podobnost, 4 = malá podobnost, 5 = žádná podobnost, Helmer et al., 1993). Tento způsob hodnocení spolehlivosti je založen na premise, že pokud jsou dva obličeje podobné, jsou i rozpoznatelné (Lee et al., 2012). Výsledkem je tzv. „míra podobnosti“⁹. Tento postup byl využíván např. v experimentech R. Helmera (Helmer et al., 1993) nebo R. Neava (Prag & Neave, 1997). Takové hodnocení je značně subjektivní a nespolehlivé. Stephan & Henneberg (2002) se pokusili zodpovědět otázku, zda míra podobnosti skutečně měří spolehlivost rekonstrukcí podoby, resp. zda je podobnost rovna rozpoznatelnosti. Ve svých

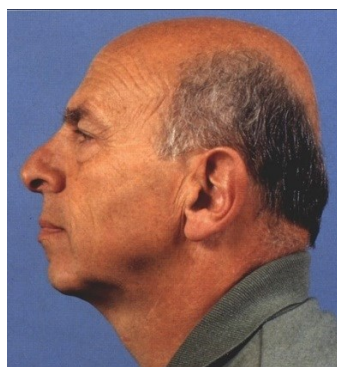
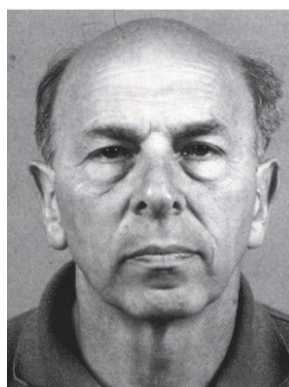
⁸ Tj. ten, kterému lebka, jež se stala podkladem rekonstrukce, patří nebo patřila; správně identifikovaný jedinec.

⁹ Z angl. „resemblance rate“.

experimentech zjistili, že průměrná míra podobnosti vyjádřená na škále od 0 do 10 se u správně pozitivně identifikovaných jedinců neliší od jedinců identifikovaných falešně pozitivně. Míra podobnosti tedy nic nevyovídá o potenciálu rekonstrukce být rozpoznán. Navíc se nejedná o relativní nástroj měření, protože nezohledňuje ne-cílové jedince, kteří mohou být stejně nebo dokonce více podobní rekonstruovanému obličejí a tedy rozpoznatelnější (Stephan & Henneberg, 2002). Zároveň i málo kvalitně zobrazený obličej (nízké rozlišení či pixelizované zobrazení) nebo takový obličej, který nese malou anatomickou podobnost s cílovým jedincem (karikatura) může být ještě stále dobře a správně rozpoznatelný jako cílový jedinec (Stephan & Henneberg, 2006; Benson & Perrett, 1991).



Obr. 23. Faciální rekonstrukce dle lebky žijícího jedince. Převzato podle Prag & Neave (1997).



Obr. 24. Fotografie cílového jedince. Převzato podle Prag & Neave (1997).

Úspěšně zakončené forenzní případy (např. Prag & Neave, 1997; Taylor, 2001, Hayes, 2014), ve kterých byla využita faciální rekonstrukce, jsou některými autory používány k potvrzení spolehlivosti metody. Publikovaná úspěšnost se pohybuje od 100 % (Gerasimov, 1955, cit. dle Stephan & Henneberg, 2001), přes 75 % (Wilkinson & Whittaker, 2002), 70 % (Gatliff & Snow, 1979), po 50–60 % (Prag & Neave, 1997), nicméně tato tvrzení nejsou podložena skutečnými čísly vyšetřovaných případů (Stephan & Henneberg, 2001).

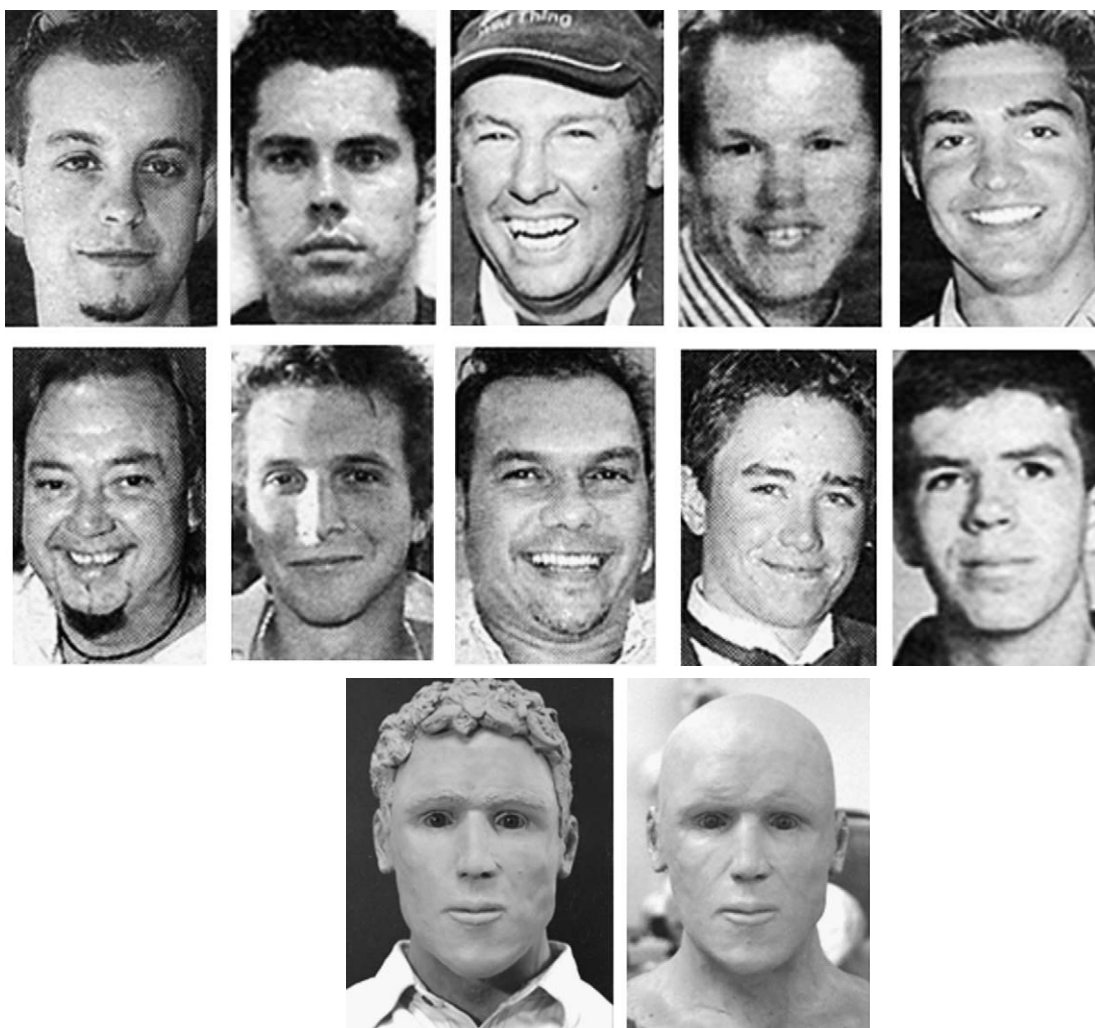
Navíc úspěšnost faciální rekonstrukce, která spočívá v rozpoznání cílového jedince, je třeba odlišit od úspěšnosti forenzního případu, kde správné vytypování cílového jedince může souviset se zveřejněním dalších kontextuálních informací, jako jsou např. oblečení, šperky a jiné osobní věci (Haglund & Reay, 1991), a není tedy podmíněna výlučně rozpoznáním rekonstruovaného obličeje. Úspěšnost faciální rekonstrukce je také závislá na způsobu zveřejnění aproximace podoby, na šíři vysílání, jeho načasování, na publiku a jeho ochotou kontaktovat policii (Stephan & Henneberg, 2006). Také je vhodné zmínit, že kromě úspěšných forenzních případů existují i případy, ve kterých rekonstrukce podoby úspěšná nebyla (Haglund & Reay, 1991; Stephan & Henneberg, 2006) a je pravděpodobné, že mnoho nevyřešených případů zůstalo nezveřejněných (Stephan & Henneberg, 2001).

Cílem forenzní rekonstrukce obličeje je vytvořit podobu, která bude specificky a cíleně rozpoznána jako osoba, které lebka patřila. Spolehlivá rekonstrukce podoby je tedy taková, která je snadno a správně rozpoznatelná (Stephan & Henneberg, 2001). Právě míra, s jakou je obličejová aproximace správně rozpoznána, vyjadřuje spolehlivost metody. Ta je zjišťována experimentálním uspořádáním, kdy je rekonstruovaný obličej porovnáván s několika dalšími obličejí současně. Při realizaci tohoto rekogničního testu v laboratorních podmínkách je rekonstrukce podoby předvedena skupině posuzovatelů, kteří se pokouší identifikovat¹⁰ cílového jedince z předloženého souboru několika dalších osob, tzv. „face poolu“. Tento výběrový soubor je tvořen několika fotografiemi či 3D modely obličejů ne-cílových jedinců stejného věku, pohlaví a populační afinity jako je cílový jedinec (Obr. 25). Záleží na experimentálních podmínkách, zda bude do výběrového souboru zahrnut i cílový jedinec, zda musí být volba (identifikace) provedena nebo nemusí, zda jsou fotografie prezentovány všechny najednou (simultánní uspořádání) nebo postupně (sekvenční¹¹ uspořádání, Stephan & Cicolini, 2008; Stephan & Cicolini 2010), zda mohou posuzovatelé vybrat více než jednoho cílového jedince (Richard et al., 2014), zda posuzovatelé rekonstruovaného jedince znají nebo neznají. Poté je vypočtena pravděpodobnost, s jakou jsou jednotliví jedinci z „face poolu“ vybráni jako nejpodobnější rekonstruovanému obličejí. Ta může být rovna, menší či větší, než je statisticky očekávaná pravděpodobnost výběru (náhoda) daného jedince. Čím je tato „míra identifikace“, „míra rozpoznatelnosti“ či „míra rekognice“ („identification rate“, Stephan, 2002; „hit rate“, Wilkinson & Whittaker, 2002;

¹⁰ Ve studiích zabývajících se měřením spolehlivosti metody rekonstrukce je termín „identifikovat/identifikace“ používán ve smyslu subjektivního rozhodnutí posuzovatele, že se jedná právě o daného jedince („to je on“) a nikoliv ve smyslu identifikace neznámých kosterních pozůstatků spolehlivými forenzními metodami. Obdobně je termín „identifikovat/identifikace“ používán v tomto textu.

¹¹ Bylo zjištěno, že sekvenční uspořádání dramaticky snižuje počet falešně pozitivních identifikací (Lindsay et al., 1991).

„recognition rate“, Stephan et al., 2005) cílového jedince statisticky významně vyšší než očekávaná hodnota, tím je aproximace obličeje spolehlivější.



Obr. 25. Soubor deseti fotografií pro rekogniční test (nahore a uprostřed) a rekonstrukce podoby obličeje (dole). Cílový jedinec je zobrazen v horní řadě druhý zprava. Převzato podle Stephan & Henneberg (2006).

Míra identifikace (míra rekognice, rekogniční skóre) se u publikovaných experimentů pohybuje mezi 81 % (Claes et al., 2006) a 8 % (Stephan & Henneberg, 2001). Až na jednu studii (Claes et al., 2006) nepřekračuje hranici 50 % nad očekávanou mírou (náhodou), v průměru pak dosahuje 25 % nad očekávanou míru. Přehled výsledků publikovaných studií je uveden v Tabulce 1. I když jsou rekonstrukce podoby obličeje v těchto studiích rozpoznávány nad očekávanou mírou pravděpodobnosti, získané hodnoty míry identifikace jsou obecně nízké (Stephan et al., 2005). Nejvyšší dosažitelnou míru rozpoznatelnosti, kterou je možné očekávat od 2D faciálních rekonstrukcí, se pokusili

stanovit Stephan et al. (2005) a zároveň porovnat výsledky dvou experimentálních scénářů, tj. rozpoznání známého/neznámého obličeje, a zhodnotit tak reprezentativnost výsledků výše uvedených studií (viz Tabulka 1) pro skutečnou forenzní situaci¹². Pomocí metod počítačové grafiky uměle vytvořili „rekonstrukce – obličeje“, jejichž tvar a proporce jednotlivých znaků byly přesnou kopií skutečných obličejů žijících jedinců, jen textura a barva obličeje byly nespecifické – průměrné, tedy takové, jak se zobrazují v případech forenzních rekonstrukcí podoby. Výsledky byly následující: (1) Většina jedinců byla správně rozpoznána. (2) Celkový rozsah míry identifikace byl značný, některé rekonstrukce byly rozpoznány snadno, jiné obtížně. (3) Průměrná míra rozpoznatelnosti činila 42 % pro známý obličej a 43 % pro neznámý obličej. (4) Vliv (ne)známosti daného obličeje na jeho rozpoznání byl malý. Zajímavostí je, že ve dvou případech ani sourozenec jedince, jehož obličej byl „rekonstruován“, nečinil správnou identifikaci. Nicméně, tento experiment byl proveden na třech „rekonstrukcích“ podoby, a tedy i výsledky musí být interpretovány s velkou opatrností. Autoři shrnují, že zjištěná míra rozpoznání rekonstrukce zachycující přesný tvar a velikost obličejových rysů je obecně nízká, což není přívětivý výsledek pro reálné rekonstrukce podoby vytvářené dle tradičních metod, u nichž přesný tvar a velikost obličejových rysů není znám (Stephan et al., 2005). Míra rekognice by měla být vyšší než pravděpodobnost rovna náhodě a zřejmě by měla přesahovat 50 %, aby i v případě, kdy pouze jeden člověk v rekonstruovaném obličejí někoho rozpozná, bylo možno očekávat, že tento pokus o identifikaci bude úspěšný (Stephan & Arthur, 2006).

¹² Rozpoznávání známých a neznámých obličejů se liší (Hancock et al., 2000), známé obličeje jsou rozpoznávány zejména podle interních znaků (oči, nos, ústa), zatímco rozpoznávání neznámých obličejů se opírá zejména o externí rysy (obrys dolní čelisti, vlasová linie). Ve skutečné forenzní situaci lidé, kteří oběť znají, ji obvykle v rekonstruované podobě rozpoznají. Výše uvedených studiích se většinou účastní posuzovatelé, kteří hledanou (cílovou) osobu neznají. Tedy výsledky těchto experimentů nemusí být reprezentativní pro skutečné forenzní případy (Stephan & Henneberg, 2001).

Tabulka 1. Přehled výsledků měření spolehlivosti metod rekonstrukce pomocí "míry rozpoznatelnosti" v publikovaných studiích.

Autor	Počet posuzovaných rekonstrukcí	Počet hodnotitelů	Minimální dosažená míra rekognice (%)	Maximální dosažená míra rekognice (%)	Průměrná míra rekognice (%)	Průměrná míra rekognice nad hranicí náhody (%)
Snow et al. (1970)	n = 2	102–200	26	68	47	33
Van Rensburg (1993)**	n = 15				26	19
Stephan & Henneberg (2001)	n = 16	37			8	3
Wilkinson & Whittaker (2002)	n = 5	50	32	56	44	34
Stephan et al. (2005)	n = 3	43	28	56	43	35
Wilkinson et al. (2006)	n = 2	52	69	71	70	50
Claes et al. (2006)	n = 18	28			81	72
Stephan & Arthur (2006)	n = 1	51			12	6
Stephan & Henneberg (2006)	n = 1	20			25	15
Stephan & Cicolini (2008)	n = 1	48			21	11
Richard et al. (2014)	n = 5	80	0	50	25	16
Stephan et al. (2005)	n = 3	4–7*	0	86	42	34
Fernandes et al. (2012)	n = 3	22*	20	27	24	13
Fernandes et al (2013)	n = 3	31*	32	41	35	25
Richard & Monson (2017)	n = 8	158*	0	26	11	2
Průměr všech studií					34	25

*Posuzovatelé znali cílového jedince. ** cit. dle Wilkinson et al. 2006.

Výsledky výzkumů zaměřených na metody hodnocení spolehlivosti faciálních rekonstrukcí ukazují, že rekogniční testy jsou nadřazené testům hodnotícím podobnost (Stephan & Arthur, 2006; Stephan, 2002; Stephan & Henneberg, 2006). Důkazem je opakovaně zjištěná skutečnost, že správně rozpoznáním rekonstrukcím obličeje není

přisuzováno vyšší skóre podobnosti než rekonstrukcím nesprávně (falešně pozitivně) rozpoznáním (Stephan, 2002; Stephan & Henneberg, 2006; Stephan & Cicolini, 2008), a že rekonstrukce obličeje hodnocené jako vysoce podobné cílovému jedinci nemusí být vždy správně rozpoznány nad očekávanou mírou identifikace (pravděpodobnost rovna náhodě, Stephan & Henneberg, 2006). Tato neshoda ve výsledcích dvou různých metod používaných k hodnocení spolehlivosti faciálních rekonstrukcí ukazuje, že v nejlepším případě přisuzují stejné proměnné jinou váhu, nebo, v horším případě, měří zcela rozdílnou proměnnou (Stephan & Cicolini, 2008). Podle Richard et al. (2014) je tato skutečnost jasným důkazem rozdílu mezi tím, jak pozorovatel vnímá kvalitu faciální rekonstrukce a podle jakých kritérií posuzuje, zda rekonstrukce reprezentuje cílového jedince či nikoliv. Při použití ordinální škály pro hodnocení podobnosti se navíc často projevuje chyba centrální tendence (Stephan & Arthur, 2006; Stephan & Cicolini, 2008), kdy se posuzovatelé vyhýbají volbě krajních hodnot škály a přednostně volí hodnoty střední. Stejný nebo srovnatelný výsledek pak mohou mít: (a) rekonstrukce, které nedosáhly v rekogničních testech ani úrovně náhody, (b) rekonstrukce, které byly rozpoznány nad úrovní náhody, (c) rekonstrukce správně identifikované i (d) rekonstrukce nesprávně (falešně pozitivně) identifikované (Stephan & Cicolini, 2008).

Přesto i rekogniční testy mají svá omezení. Výsledky mohou být ovlivněny zejména kvalitou zobrazení a výběrem ne-cílových jedinců do posuzovaného souboru (face poolu) (Stephan & Henneberg, 2006). Některé fotografie v souboru mohou být lehce odlišné např. rozlišením, polohou hlavy, mimickým výrazem či podmínkami fotografování. Tento jemný rozdíl může způsobit, že tato „jiná“ fotografie je hodnotiteli častěji vybírána jako nejpodobnější cílovému jedinci než ostatní fotografie (Stephan & Henneberg, 2006, Stephan & Cicolini, 2008). Obličeje ne-cílových jedinců v souboru pak mohou být morfologicky výrazně odlišné od obličeje cílového jedince a ten je pak vybírán častěji. Vliv na výsledek může mít i informovanost posuzovatelů o samotné metodě rekonstrukce podoby, o tom, které znaky lze spolehlivě odhadnout a které nikoliv, a tedy na které znaky se při hodnocení zaměřit a o které opřít své rozhodnutí (Stephan & Henneberg, 2006). Jelikož jsou i výsledky rekogničních testů založeny na subjektivním hodnocení většinou malé skupiny posuzovatelů (<150 jedinců), pokusili se autoři Stephan & Cicolini (2010) zjistit jejich spolehlivost opakováním dříve publikovaných experimentů s různě velkým souborem posuzovatelů. Rozdíly v míře rozpoznatelnosti jednotlivých rekonstrukcí podoby se mezi jednotlivými skupinami hodnotitelů pohybovaly od 0 % do 30 %. Rozdíly v dosaženém skóre u obličejů, které byly běžně hodnoceny vysoko, činily až 18 %. Svou studii autoři uzavírají, že výsledky rekogničních testů s méně než 115 posuzovateli by měly být považovány pouze za přibližné, a že rozdíl v míře rozpoznatelnosti, který nepřesáhne 18 % by měl být

považován za zanedbatelný (Stephan & Cicolini, 2010). Na široké rozpětí míry rozpoznatelnosti a tedy absenci dostatečné senzitivity tohoto nástroje pro měření spolehlivosti rekonstrukcí poukazují i autoři Short et al. (2014).

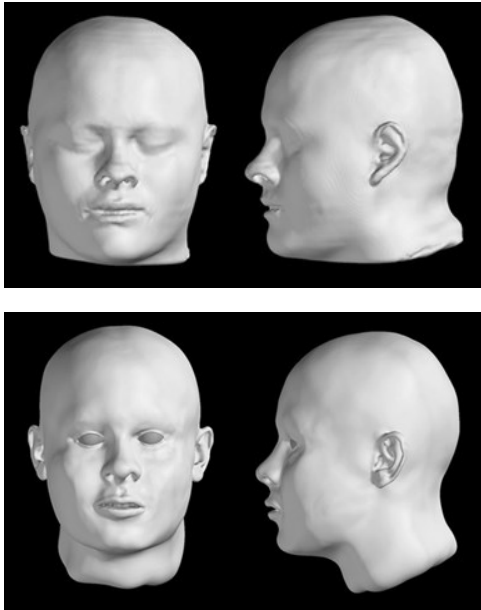
Výsledek rekogničních testů může být také ovlivněn počtem a typem prezentovaných rekonstrukcí. Richard et al. (2014) uvádí ve shodě s poznatky Starbuck & Ward (2007), že prezentace více než jedné verze rekonstrukce podoby může zvýšit její rekogniční potenciál. Optimální je pak prezentace dvou až tří verzí, např. en face, profil a 3/4 pohled nebo verze s vyšším BMI. Haglund & Reay (1991) rovněž tvrdí, že kvůli subjektivní povaze faciálních aproximací by měla být pro zvýšení šance rozpoznání prezentována více než jedna verze rekonstruovaného obličeje.

Richard et al. (2014) dále zjistili, že na výslednou hodnotu rekogničního skóre (míry identifikace) má vliv také experimentální uspořádání testů, zejména pak podmínky stanovené pro volbu cílového jedince. Rekogniční testy doposud používané jsou založeny na standardech pro rozpoznání a identifikaci pachatele očitým svědkem, kdy svědek musí provést jedinou definitivní (absolutní) volbu. Nicméně tato situace není reprezentativní pro skutečnou roli faciální rekonstrukce při forenzním vyšetřování, protože vytvořená rekonstrukce slouží pouze jako „vyšetřovací“ prostředek k nasměrování dalšího pátrání nikoliv k pozitivní identifikaci. Falešně pozitivní identifikace (rozpoznání) hledané osoby je následným porovnáním *ante mortem* a *post mortem* údajů odhalena a pátrání může pokračovat dalším možným směrem (není odsouzen nevinný člověk). Richard et al. (2014) uvádí, že pokud měli pozorovatelé možnost vybrat více než jednoho cílového jedince, byli pak při následném porovnávání takto „předvybraných“ obličejů konsistentně úspěšnější v identifikaci správného cílového jedince. Titíž autoři pak představili další ukazatele spolehlivosti faciálních rekonstrukcí měřené rekogničními testy: (a) senzitivita = správné pozitivní odpovědi / (správné pozitivní odpovědi + falešně negativní odpovědi), (b) specifita = správné negativní odpovědi / (správné negativní odpovědi + falešně pozitivní odpovědi (Richard et al., 2014).

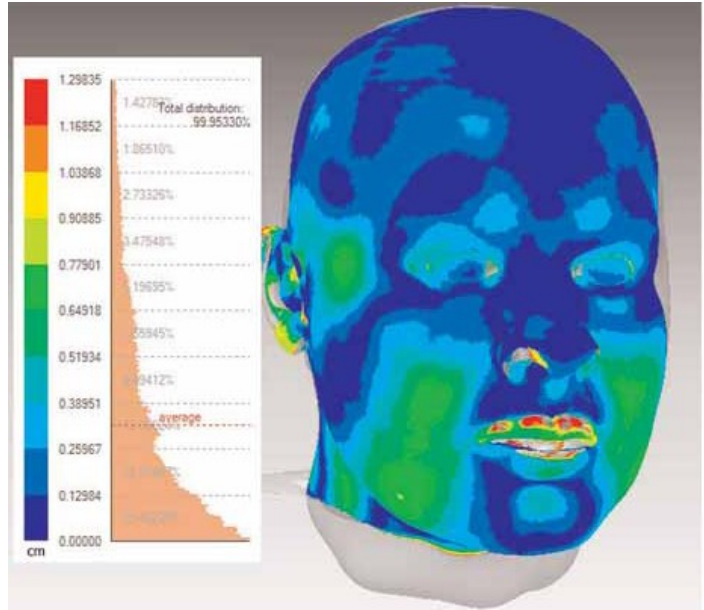
Ačkoliv výsledky všech experimentů Stephana a spoluautorů ukazují, že zjištěné identifikační ukazatele jsou nízké, neznamená to, že metoda rekonstrukce podoby je zcela neúčinná, že je její použití ve forenzním prostředí spíše na závalu nebo že nikdy nepovede k úspěšnému rozpoznání. I přesto, že je celková souhrnná míra identifikace v rekogničních testech nízká, má tendenci být vyšší než její statisticky očekávaná hodnota. To znamená, že někteří posuzovatelé v rekonstrukci specificky a jednoznačně rozpoznali cílového jedince a že metody rekonstrukce podoby člověka na základě lebky, přestože jsou nespolehlivé, ve skutečnosti fungují (Stephan, 2002c). Avšak nízká frekvence správné identifikace cílového jedince ukazuje, že schopnost faciální rekonstrukce vyvolat spolehlivé rozpoznání

není silná (Stephan & Henneberg, 2006). Existuje-li však jeden člověk, který v rekonstruovaném obličejí rozpozná někoho známého a oznámí to policii, která provede následně identifikaci kosterních pozůstatků, můžeme metody rekonstrukce podoby považovat za užitečný nástroj. V případě experimentu Stephana & Henneberga (2001) by pak bylo správně rozpoznáno a identifikováno celkem 13 z 16 rekonstrukcí (81 %).

Moderní zobrazovací metody umožnily sofistikovanější znázornění a objektivní kvantifikaci míry podobnosti 3D metod rekonstrukce. Tyto experimentální studie porovnávají pomocí superimpozice celý povrch rekonstruovaného obličejí s naskenovaným povrchem obličejí žijícího jedince, jehož virtuální model lebky byl podkladem pro vytvoření rekonstrukce (Wilkinson et al., 2006; Lee et al., 2012; Short et al., 2014). Výsledkem přímého porovnání jsou pak numerické hodnoty průměrné absolutní chyby a standardní odchylky chyby překrývajících se povrchů, procentuální vyjádření chyby konkrétně zvolené velikosti (např. <2,5 mm). Vizualizací metricky vyjádřených rozdílů na barevných prostorových mapách je možno posoudit distribuci chyby v rámci celého obličejí a odhalit oblasti rekonstruované s nižší spolehlivostí (Obr. 26 a 27). Výsledky porovnání jsou ovlivněny způsobem získání virtuálního modelu skutečného obličejí (poloha v leže při použití klasické počítačové tomografie (CT), Wilkinson et al., 2006, vs. vertikální poloha při použití Cone-beam počítačové tomografie (CBCT), Lee et al., 2012; Short et al., 2014) či zvoleným způsobem lícování dvou porovnávaných povrchů (dle landmarků na lebce, dle landmarků na měkké tkáni obličejí, pomocí Prokrustovské superimpozice). Nevýhoda měření rozdílů mezi dvěma povrchy je ta, že software měří vzdálenost mezi dvěma nejbližšími body, které nemusí být nutně body navzájem anatomicky korespondující (Short et al., 2014). Také doposud nebylo jednoznačně zjištěno, jak spolu korelují stupeň metrické odchylky rekonstruovaného obličejí od obličejí skutečného a rekogniční potenciál faciální rekonstrukce. Pouze Wilkinson et al. (2006) ve své studii zjišťovali jak metrickou chybu dvou rekonstruovaných obličejů, tak míru jejich rozpoznatelnosti, nicméně dále nezkoumali vzájemnou souvislost těchto dvou ukazatelů spolehlivosti. Richard & Monson (2017) ve své studii zjistili, že faciální aproximace s nejvyšší senzitivitou a mírou rozpoznatelnosti zároveň vykazovaly největší průměrnou chybu mezi aproximací a skutečnou podobou, tedy spolehlivější rekonstrukce podoby nemusí být nutně zároveň ta rozpoznatelnější. Jedná se však o výsledky jedné studie a jedné konkrétní metody počítačové rekonstrukce (ReFace).



Obr. 26. Nahoře: 3D model skutečného obličeje. Dole: 3D model rekonstruovaného obličeje. Převzato podle Wilkinson et al. (2006).



Obr. 27. Porovnání povrchu rekonstruovaného obličeje s povrchem skutečného obličeje. Znáznorněny jsou absolutní hodnoty rozdílu. Převzato podle Wilkinson et al. (2006).

Tabulka 2. Přehled výsledků měření spolehlivosti metod rekonstrukce pomocí superimpozice povrchů rekonstruovaného a skutečného obličeje v publikovaných studiích.

Autor	Rekonstrukce podoby	Podíl z povrchu s rozdílem do $\pm 2,5$ mm (%)	Podíl z povrchu s rozdílem do ± 5 mm (%)	Průměrná chyba; SD (mm)	Oblasti obličeje vykazující největší rozdíl (>4 mm)
Wilkinson et al. (2006)	1	62	90		hrot nosu, část ušních boltců,
	2	54	75		horní ret, nosní křídla, ušní boltce, tváře
Lee et al. (2012)	A	54	88	-0,46; SD 2,81	hrot nosu, tváře
	B	65	97	-0,31; SD 2,40	nosní křídla, tváře
	C	77	95	-0,49; SD 2,16	horní víčko
Short et al. (2014)	1	81			hrot nosu, nosní křídla, dolní ret
	2	71			oční víčka, hrot nosu, nosní křídla, oblast lícních kostí, koutky úst
	3	61			oči, tváře
	4	58			oční víčka, dolní ret, oblast lícních kostí a tváře
	5	56			oči, hrot nosu, nosní křídla, <i>philtrum</i> ,
	6	90			horní víčka, oblast koutků úst
	7	64			oči, hřbet nosu a hrot nosu, oblast lícních kostí a tváře
	8	68			hrot nosu, nosní křídla, oblast lícních kostí
	9	80			horní ret
	10	80			hrot nosu, oblast koutků úst
Claes et al. (2006)	n = 118			1,14; SD 1,04	
Decker et al. (2013)	1		76		horní víčka, nos, <i>philtrum</i> , brada
	2		67		tváře, horní a dolní ret
	3		62		oblast čela, rtů a brady
	4		61		horní a dolní ret, tváře
Richard et al. (2014)	n = 5			-3,1; SD 4,2	uši, tváře, rty, hrot nosu
Richard & Monson (2017)	n = 8			0,6; SD 7,2	uši, tváře, rty, hrot nosu

Jak je patrné z výše uvedeného, doposud nebyl stanoven jeden standardizovaný a spolehlivý nástroj pro „měření“ spolehlivosti metody rekonstrukce. Dosavadní výsledky vykazují velmi široké rozpětí hodnot, ať už jde o jakýkoliv ukazatel. V celém procesu faciální rekonstrukce (manuální) je zahrnuto mnoho obtížně kontrolovatelných zdrojů chyb a variability výsledných výtvorů.

2.2 Kraniofaciální vztahy

Predikce polohy, velikosti a morfologie obličejových znaků (oči, nos, rty a uši) je pro spolehlivost a úspěšnost faciální rekonstrukce zásadní (Lee et al., 2012; Maltais Lapointe et al., 2016). Je stejně důležitá nebo i důležitější než skutečná tloušťka měkké tkáně (Macho, 1989; Wilkinson, 2004).

Podle autorů Stephan & Henneberg (2001) vedou faciální rekonstrukce jen málokdy ke specifickému a jednoznačnému rozpoznání obličeje jako cílového jedince. Hlavním bodem kritiky rekonstrukčních metod je malá nebo neznámá míra korelace mezi kostními strukturami lebky a obličejovými rysy. Brues (1958) uvádí, že oblasti obličeje jako jsou hrot nosu, rty a tváře nelze na základě lebky odhadovat, a trojdimenzionální manuální metody je vhodnější přenechat autorům detektivní fikce. Stephan (2002) tvrdí, že tradiční metodu faciální aproximace ve své celistvosti je vhodnější popisovat jako pseudovědu. Nemožnost predikovat rysy obličeje zmiňují i Haglund & Reay (1991). Quatrehomme et al. (1997) upozorňují, že vytvořit spolehlivou faciální rekonstrukci není jednoduché, protože existuje mnoho variant jednoho obličeje, zvláště s ohledem na stav výživy a rozdíly v projevech a intenzitě stárnutí. Navíc, detaily nosu, očí, uší, rtů a brady nemohou být rekonstruovány přesně pouze na základě charakteristik lebky. Souhlasně i Richard & Monson (2017) komentují svá zjištění tím, že největší odchylky mezi rekonstrukcemi a skutečnými obličejí v oblasti uší, rtů, hrotu nosu a tváří nejsou překvapivé, protože všechny tyto regiony postrádají silnou korelaci s charakteristikami lebky. Decker et al. (2013) ve své komparativní studii poukazují na nedostatek formálních výzkumů zaměřených na vzájemné kraniofaciální vztahy a nutnost spoléhat se na expertovu zkušenost právě při rekonstrukci těch oblastí obličeje, které vykazovaly největší odchylku od skutečnosti (viz tabulka 2).

Například Suk (1935) na základě svého výzkumu vzájemného vztahu mezi šířkou *apertura piriformis* a největší šířkou nosu jakoukoliv existenci vzájemné korelace popírá. Rovněž Balueva et al. (2009) nezjistili žádnou závislost šířky nosu na šířce nosního otvoru. Naopak Rynn et al. (2010) ve svém výzkumu potvrzují existenci a platnost konkrétní závislosti (šířka *apertura piriformis* = 3/5 šířky nosu), kterou dříve popisují Prag & Neave

(1997). Short et al. (2014) ve své studii konstatují, že použití výše uvedeného vodítka (dle Rynn et al., 2010) naopak vedlo konsistentně k nadhodnocenému odhadu šířky nosu. Ani výsledky výzkumů testujících spolehlivost predikce prominence nosu (Stephan et al., 2003; Rynn & Wilkinson 2006; Mala, 2013) nejsou jednotné. Hrot nosu patří mezi nejfrekventovaněji uváděnou část obličeje, která při porovnávání rekonstrukcí se skutečnou podobou vykazuje značnou odchylku. Predikční vodítka pro odhad velikosti a tvaru nosu představují pouze příklad rozporných názorů, které mohou vyplývat ze skutečnosti, že variabilita měkkých tkání je mnohem vyšší než variabilita kostního podkladu a že vzájemné vztahy mezi lebkou a obličejem nejsou až tak těsné. V některých případech opravdu nezbyvá, než se opírat o intuici či vlastní zkušenost.

Pokud se má spolehlivost metody faciální aproximace zvýšit ze současné úrovně, je nutné vytvořit více vědecky ověřených vodítek pro odhad obličejových znaků a klást menší důraz na „umělecká/subjektivní vodítka“, jejichž spolehlivost testována nebyla (Stephan, 2002c). Metody faciální aproximace by neměly zahrnovat žádný kreativní aspekt, ale měly by vyžadovat vysokou úroveň zručnosti (manuální metody) a striktní dodržování vědecky ověřených principů, tj. vztahů mezi tvrdými a měkkými tkáněmi obličeje (Stephan, 2002c).

Jak bylo uvedeno v kapitole 1.3.1. Predikční pravidla, v současnosti je možno při vytváření rekonstrukce podoby podle lebky odhadovat následující znaky, jejichž predikční vodítka jsou publikována v literatuře: poloha oční koule v očnici (např. Guyomarc'h et al., 2012; Wilkinson & Mautner, 2003), poloha očních koutků (např. Stephan et al., 2009; Stewart, 1983), výška nosu (Macho, 1986), šířka nosu (např. Rynn et al., 2010; Balueva et al., 2010; Taylor, 2001; Fedosyutkin & Nainys; 1993), poloha hrotu nosu z profilu (např. Rynn et al., 2010; Stephan et al., 2003; Inanda et al., 2009; Lebedinskaya, 1998), tvar hrotu nosu z frontálního pohledu (Davy-Jow et al., 2012), směr hrotu nosu (např. George, 1987; Taylor, 2001; Rynn et al., 2010), tvar profilu nosu (Lebedinskaya, 1998; Balueva et al., 2009), výška nosních křídel (Lebedinskaya, 1998), poloha bodu *subnasale* (Utsuno et al., 2018), šířka rtů (např. Stephan & Henneberg, 2003; Stephan & Murphy, 2008), výška rtů (např. Wilkinson et al., 2003; Lebedinskaya, 1998), poloha štěrbiny ústní (např. George, 1987; Fedosyutkin & Nainys, 1993), vybrané charakteristiky ušního boltce (Guyomarc'h & Stephan, 2012). Z výčtu je patrné, že se jedná převážně o principy, pomocí nichž lze odhadnout rozměry nebo polohu obličejového prvku, méně již tvar daného znaku. Ne u všech metod jsou publikována data o jejich spolehlivosti.

V souhrnných publikacích (Fedosyutkin & Nainys, 1993; Taylor, 2001; Wilkinson, 2004) najdeme i zmínku o dalších kraniofaciálních vztazích, často popisujících morfologickou souvislost (např. existence vzájemné souvislosti mezi tvarem obočí a reliéfem nadočnicových oblouků a horního okraje očnice, tvar fixní části horního víčka

kopíruje tvar horního okraje očnice, existence vzájemné souvislosti mezi charakterem dolního okraje *apertury piriformis* a polohou nozder, šířka *philtru* je rovna vzdálenosti středu mediálních horních řezáků, tvar linie procházející horním okrajem skloviny předních zubů odpovídá tvaru okraje horního rtu, výrazný okraj frontální části alveolárního výběžku dolní čelisti je spojen s prominujícím dolním rtem, a jiné), nicméně tato vodítka nejsou často doprovázena odkazy na původní výzkumy či jiný empirický důkaz o jejich existenci.

U mnoha predikčních vodítek nevíme, zda nejsou založena pouze na osobním pozorování či zkušenosti (tzv. „rules of thumb“¹³, Taylor, 2001), nevíme, na jakém vzorku a jakými metodami byly dané vztahy zjištěny, zda mají anatomický základ nebo jsou založeny na statistické korelaci vybraných znaků, neznáme jejich spolehlivost. Stephan (2003) zdůrazňuje, že při použití subjektivních pravidel nemůžeme očekávat spolehlivý výsledek. I když použijeme tato subjektivní vodítka, stále zůstává značná část obličejové anatomie, která je ponechána na intuici realizátora rekonstrukce (Stephan, 2003). Na druhé straně Short et al. (2014) uvádí, že i tzv. „rules of thumb“ – přibližná pravidla – aplikovaná jako anatomické principy poskytují obstojný odhad obličejových rysů. A ačkoliv nejsou zcela spolehlivá, mohou být dostatečně blízka skutečnosti, aby výsledná rekonstrukce podoby splnila svůj cíl. Hayes (2014) konstatuje, že použití neověřeného pravidla je lepší, než pravidlo žádné.

V současné době největší kritik metody rekonstrukce C. N. Stephan (2002) uvádí, že současný stav poznání¹⁴ o spolehlivých vztazích mezi lebkou a obličejem není úplný, a tedy následně a nevyhnutelně samotný proces vytváření rekonstrukce podoby vyžaduje mnoho subjektivní interpretace. Naopak Wilkinson (2010), která popisuje a využívá vodítka pro odhad týchž znaků, jako jsou výše uvedené, uvádí, že při jejich použití vzniká jen velmi malý prostor pro uměleckou interpretaci (s výjimkou rtů a ušních boltců).

Pomineme-li diskuzi o (ne)dostatečnosti množství predikčních pravidel pro odhad komplexní morfologie obličeje, pak dalším problémem, se kterým se u metody rekonstrukce setkáváme, je existence několika různých predikčních vodítek pro jeden a tentýž znak. Mnohonásobnost predikčních pravidel se týká většiny odhadovaných metrických znaků (viz výše). Tato skutečnost explicitně a nepochybně ukazuje na nedostatečnou znalost vztahů mezi tvrdými a měkkými tkáněmi obličeje (Stephan, 2003a). Je logicky a prakticky nemožné, aby všechna tato mnohonásobná vodítka byla správná, pokud dávají rozdílné výsledky. Rozhodnutí, které vodítko použít pro maximalizaci

¹³ Z angl. překladu – pravidlo, které není založeno na vědecké teorii nebo přesném měření, ale spíše na zkušenosti; hrubý odhad.

¹⁴ Ačkoliv jde o konstatování z roku 2002, do současnosti se počet znaků, které lze „z lebky“ odhadnout, příliš nenavýšil, novější výzkumy byly a jsou zaměřeny zejména na testování spolehlivosti vodítek původních.

celkové spolehlivosti výsledné rekonstrukce, nelze bez znalosti spolehlivosti jednotlivých vodiček zodpovědně provést. Neznáme velikost chyby vnášené každým takovým vodičkem do výsledné rekonstrukce podoby. Celková přesnost rekonstrukce pak závisí na kombinaci použitých pravidel a jejich odchylek od skutečnosti.

Příklady mnohonásobných vodiček například pro predikci šířky rtů a šířky nosu jsou uvedeny níže v tabulkách 3 a 4. Pro ilustraci rozdílnosti výsledků byly změřeny relevantní rozměry na jedné konkrétní lebce muže výborného stavu zachovalosti. Rozdíl mezi maximální a minimální odhadovanou hodnotou pro šířku nosu je 10,9 mm, pro šířku úst 24,6 mm. Jiným příkladem mohou být vodička pro rekonstrukci polohy bodu *pronasale*¹⁵ (prominence hrotu nosu). Rozdílnost výsledků jejich aplikace je znázorněna na Obr. 28 a 29.

Tabulka 3. Přehled predikčních pravidel pro odhad šířky nosu a příklad získaných výsledků.

Predikční pravidlo pro šířku nosu (<i>alare – alare</i>)	Reference	Odhad (mm)
Šířka <i>apertura piriformis</i> + 9,9 mm	Schultz (1918)	34,8
3/5 vzdálenosti mezi duhovkami ^a	Farkas & Monro (1987)	30,6
Šířka <i>apertura piriformis</i> * 1,51	Hoffman et al. (1991)	37,6
Šířka <i>apertura piriformis</i> + 12,2 mm	Hoffman et al. (1991)	37,1
Šířka <i>apertura piriformis</i> = 3/5 šířky nosu	Prag & Neave (1997)	41,5
Vzdálenost mezi středy horních špičáků nebo jejich alveolů	Fedosyutkin & Nainys (1993)	34,9
Vzdálenost mezi <i>juga alveolaria</i> špičáků v úrovni bodu <i>subspinale</i>	Lebedinskaya (1998)	31,7
Šířka <i>apertura piriformis</i> + 10 mm	Taylor (2001)	34,9
Š. nosu = 18,035 + 0,444*vzdálenost mezi body <i>canine</i> ^b	Balueva et al. (2010)	32,1

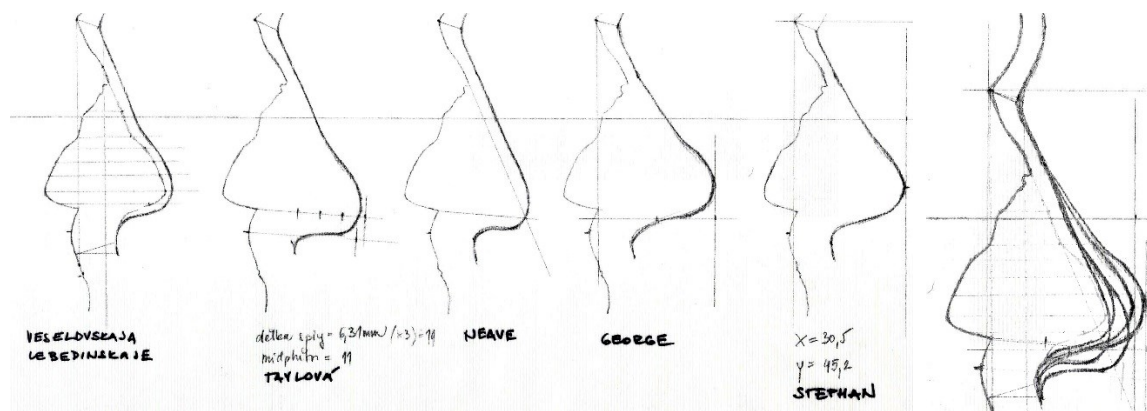
^aPoloha oční koule stanovena dle Taylor (2001); ^b*canine* = bod na *juga alveolaria* horního špičáku v úrovni bodu *subspinale* (Balueva et al., 2009).

¹⁵ Seznam antropometrických bodů a jejich definic je uveden v příloze.

Tabulka 4. Přehled predikčních pravidel pro odhad šířky rtů a příklad získaných výsledků.

Predikční pravidlo pro šířku rtů (<i>cheilion – cheilion</i>)	Reference	Odhad (mm)
Vzdálenost mezi středy zornic ^a	Krogman & İşcan (1962)	63,1
Vzdálenost mezi průsečíky spojnice <i>foram. infraorbitale</i> a <i>foram. mentale</i> s linií zubní okluze	Angel (1978)	47,8
Vzdálenost mezi druhými horními moláry	Fedosyutkin & Nainys (1993)	52,2
Vzdálenost mezi mediálními okraji duhovky ^a	Prag & Neave (1997)	50,4
Vzdálenost rozhraní mezi prvním a druhým horním premolárem	Lebedinskaya (1998)	44,1
Vzdálenost mezi laterálními okraji horních špičáků	Taylor (2001)	38,5
Vzdálenost mezi laterálními okraji špičáků / 0,75	Stephan & Henneberg (2003)	51,3
Koutky úst leží na liniích kolmých k zubnímu oblouku vycházejících z bodu dotyku mezi horním špičákem a prvním premolárem	Wilkinson (2004)	50,1
Vzdálenost mezi levým a pravým <i>foram. infraorbitale</i>	Stephan & Murphy (2008)	48,8
Š. rtů = 21,817 + 0,7* šířka horního zubního oblouku mezi druhými premoláry	Balueva et al. (2010)	54,2

^aPoloha oční koule stanovena dle Taylor (2001).



Obr. 28. Příklady rekonstrukce profilu nosu, resp. polohy bodu *pronasale* (nejvíce anteriorního bodu na kontuře nosu při orientaci lebky dle frankfurtské horizontály). Zleva: metoda dle Balueva et al. (2009), Taylor (2001), Prag & Neave (1997), George (1987), Stephan et al. (2003). Archiv autorky.

Obr. 29. Překrytí kontur profilu nosu z obr. 28. odhadnutých podle pěti různých postupů. Archiv autorky.

Teprve během posledních patnácti let (od roku 2003) se v literatuře objevují výzkumy, v nichž se autoři zabývají testováním spolehlivosti v minulosti používaných vodítek. Jejich přehled je uveden v tabulce 5. Vznikají také vodítka nová, některá populačně specifická (např. Lee et al., 2014; Utsuno et al., 2018; Ridel et al., 2018; Sarilita et al., 2018),

některá pro subadultní jedince (Utsuno et al., 2008; Allam et al., 2018), u nichž je již známa chyba, s jakou daný znak odhadují. Některá však stále čekají na ověření jejich platnosti na jiném populačním vzorku. Přehled „nových“ vodítek je uveden v tabulce 6.

Tabulka 5. Přehled studií zaměřených na testování spolehlivosti vybraných predikčních pravidel.

Testovaný znak	Studie	Materiál
Poloha bodu <i>superciliare</i>	Stephan (2002)	n = 128, fotografie
	Stephan (2002)	n = 1174, rešerše literatury
	Wilkinson & Mautner (2003)	n = 78, MRI skeny
Poloha oční koule v očnici	Stephan & Davidson (2008)	n = 4, pitevní materiál
	Stephan et al. (2009)	n = 9, pitevní materiál
	Guyomarc'h et al. (2012)	n = 375, CT skeny
	Zednikova Mala & Veleminska (2018)	n = 80, laterální RTG
Poloha očních koutků	Stephan & Davidson (2008)	n = 4, pitevní materiál
	Stephan et al. (2009)	n = 9, pitevní materiál
Prominence nosu (poloha bodu <i>pronasale</i>)	Stephan et al. (2003)	n = 59, laterální RTG
	Rynn & Wilkinson (2006)	n = 122, laterální RTG
	Rynn et al. (2010)	n = 42, CT skeny
	Lopez et al. (2010)	n = 34, laterální RTG
	Mala (2013)	n = 86, laterální RTG
	Maltais Lapointe et al. (2016)	n = 66, <i>post mortem</i> CT skeny
	Sarilita et al. (2018)	n = 421, laterální RTG
Šířka nosu	Hoffman et al. (1991)	n = 182, lebky a posmrtné masky
	Rynn et al. (2010)	n = 79, CT skeny
Šířka rtů	Stephan (2003)	n = 136, fotografie obličejů
	Stephan & Murphy (2008)	n = 9, pitevní materiál
	Wilkinson et al. (2003)	n = 95, fotografie, měření <i>in vivo</i>
Výška rtů	Wilkinson et al. (2003)	n = 95, fotografie, měření <i>in vivo</i>
	Zednikova Mala & Veleminska (2016)	n = 86, laterální RTG
Morfometrie a morfologie ušního boltce	Guyomarc'h & Stephan (2012)	n = 78, CT skeny

CT = počítačová tomografie, RTG = radiografie, rentgenové snímky, MRI = magnetická rezonance.

Tabulka 6, část I. Přehled publikovaných nově navržených predikčních pravidel (od roku 2003).

Predikční pravidlo	Autor	Materiál			Chyba predikce (mm)				Validace ^b
		n	typ	populace ^a	hodnota	SD	ukazatel	upřesnění	
Poloha oční koule v očnici	Guyomarc'h et al. (2012)	375	CT skeny	Francie (mix)	1,4		SEE	SI směr	X
					1,3		SEE	ML směr	X
					2,3		SEE	AP směr	X
	Wilkinson & Mautner (2003)	78	MRI skeny	Velká Británie (WS)	X				X
Prominence nosu (poloha bodu <i>pronasale</i>)	Stephan et al. (2003)	59	laterální RTG	Evropa	0,1	2,4	md	osa x	X
					0,1	2	md	osa y	X
	Rynn et al. (2010)	139	CT skeny a laterální RTG	Spojené Státy Americké + Velká Británie (mix)	-0,5	1,4	md	osa x	n = 5, jiný vzorek
					-0,4	1,1	md	osa y	
	Sarilita et al. (2018)	335	laterální RTG	Indonésie	-0,2	2,3	md	osa x	X
					0,3	2	md	osa y	X
	Lee et al. (2014)	60	CBCT skeny	Korea	2,4		SEE		X
	Utsuno et al. (2016)	55	laterální RTG	Japonsko	-0,9		md	osa x	n = 12, jiný vzorek
					-0,7		md	osa y	
Tedeschi-Oliviera et al. (2016)	600	laterální RTG	Brazílie	0,6	1,6	md		X	
Ridel et al. (2018)	120	CBCT skeny	Jižní Afrika (BS)	2		MSE		LOOCV	
			Jižní Afrika (WS)	1,8		MSE		LOOCV	

^a označení studovaného vzorku převzato z originálních studií, WS = *white sample*, BS = *black sample*; mix = jedinci různé populační afinity; ^b tj. validace provedená autory studie; CT = počítačová tomografie, CBCT = *Cone-beam* počítačová tomografie, RTG = rentgenové snímky, SD = *standard deviation*, SEE = *standard error of the estimate*, md = *mean difference*, MSE = *mean square error*, LOOCV = *leave-one-out cross-validation*; X = neuváděno, SI = superio-inferiorní, ML = medio-laterální, AP = anterio-posteriorní, osa x = poloha v horizontálním směru, osa y = poloha ve vertikálním směru. Šedě jsou označena námi testovaná predikční pravidla.

Tabulka 6, část II. Přehled publikovaných nově navržených predikčních pravidel (od roku 2003). Pokračování předchozí části tabulky.

Predikční pravidlo	Autor	Materiál			Chyba predikce (mm)				Validace ^b
		n	typ	populace ^a	hodnota	SD	ukazatel	upřesnění	
Poloha bodu <i>subnasale</i>	Utsuno et al. (2018)	190	laterální RTG	Japonsko	1,3		SE	V-Sn rozměr	n = 153, jiný vzorek
					1,3		SE	H-Sn rozměr	
	Lee et al. (2014)	60	CBCT skeny	Korea	3,3		SEE		X
	Ridel et al. (2018)	120	CBCT skeny	Jižní Afrika (BS)	2		MSE		LOOCV
Jižní Afrika (WS)				1,6		MSE		LOOCV	
Tvar hrotu nosu z frontálního pohledu	Davy-Jow et al. (2012)	25	CT skeny	<i>neuveдено</i>	X				X
Šířka nosu	Hoffman et al. (1991)	182	lebky a posmrtné masky	Terryho sbírka (WS + BS)	X				X
	Lee et al. (2014)	60	CBCT skeny	Korea	2		SEE		X
	Ridel et al. (2018)	120	CBCT skeny	Jižní Afrika (BS)	1,8		MSE		LOOCV
				Jižní Afrika (WS)	2,1		MSE		LOOCV
Šířka rtů	Stephan & Henneberg (2003)	93	fotografie	Evropa	-0,2	3,5	md		X
	Stephan & Murphy (2008)	9	pítevní materiál	Evropa	3,3		md		X
Výška rtů	Wilkinson et al. (2003)	95	fotografie, měření <i>in vivo</i>	Evropa (WS) + Asie	X				X
Výška ušního boltce	Guyomarc'h & Stephan (2012)	78	CT skeny	Francie	4,4–6,9		SEE	5 regr. rovnic	n = 4653, jiný vzorek
Šířka ušního boltce	Guyomarc'h & Stephan (2012)	78	CT skeny	Francie	3–3,5		SEE	3 regr. rovnice	n = 125, jiný vzorek

^a označení studovaného vzorku převzato z originálních studií, WS = *white sample*, BS = *black sample*; mix = jedinci různé populační afinity; ^b tj. validace provedená autory studie; CT = počítačová tomografie, CBCT = *Cone-beam* počítačová tomografie, RTG = rentgenové snímky, SD = *standard deviation*, SEE = *standard error of the estimate*, md = *mean difference*, MSE = *mean square error*, LOOCV = *leave-one-out cross-validation*; X = *neuveдено*, V-Sn a H-Sn = označení rozměru dle originální studie. Šedě jsou označena námi testovaná predikční pravidla.

Výše uvedené problémy, jako omezené množství predikčních pravidel pro odhad tak složitého útvaru jako je lidský obličej, mnohonásobná predikční vodítka pro jeden a tentýž znak často s neznámou spolehlivostí a absence standardizace, s sebou nevyhnutelně přináší značnou inter-observační chybu. To, že různí praktici vytvoří na základě jedné a téže lebky více či méně podobné/odlišné obličej, je v antropologických kruzích natolik známá skutečnost, že je tato inter-observační chyba již přijímána jako nedílná součást metody.

O kvantifikaci této chyby se pokusil málokdo. Většinou se v literatuře setkáme s grafickým vyobrazením několika verzí obličej rekonstruovaného různými autory používajícími různé metody (Obr. 31–33; např. Stephan & Henneberg, 2001; Stephan & Henneberg, 2006; Haglund & Reay, 1991; Decker et al., 2013). Výjimku představuje experiment R. Helmera (Helmer et al., 1993) z roku 1984, ve kterém dva autoři srovnatelných technických a sochařských dovedností vytvořili dle stejného postupu nezávisle na sobě každý 12 rekonstrukcí podoby na základě shodného souboru lebek (Obr. 30). Hodnocení vzájemné podobnosti bylo provedeno na pětibodové škále (1 = velká podobnost, 2 = blízká podobnost, 3 = přibližná podobnost, 4 = malá podobnost, 5 = žádná podobnost). Vzájemné srovnání rekonstrukcí poskytlo následující výsledky: 50 % případů vykazovalo přibližnou podobnost, 33 % ukazovalo blízkou podobnost. Ve dvou případech (17 %) byla dosažena pouze malá podobnost. Nejfrekventovanější a největší diskrepance byly spatřovány v oblasti úst a očí, zatímco nos byl ve většině případů rekonstruován s přibližnou nebo blízkou podobností.



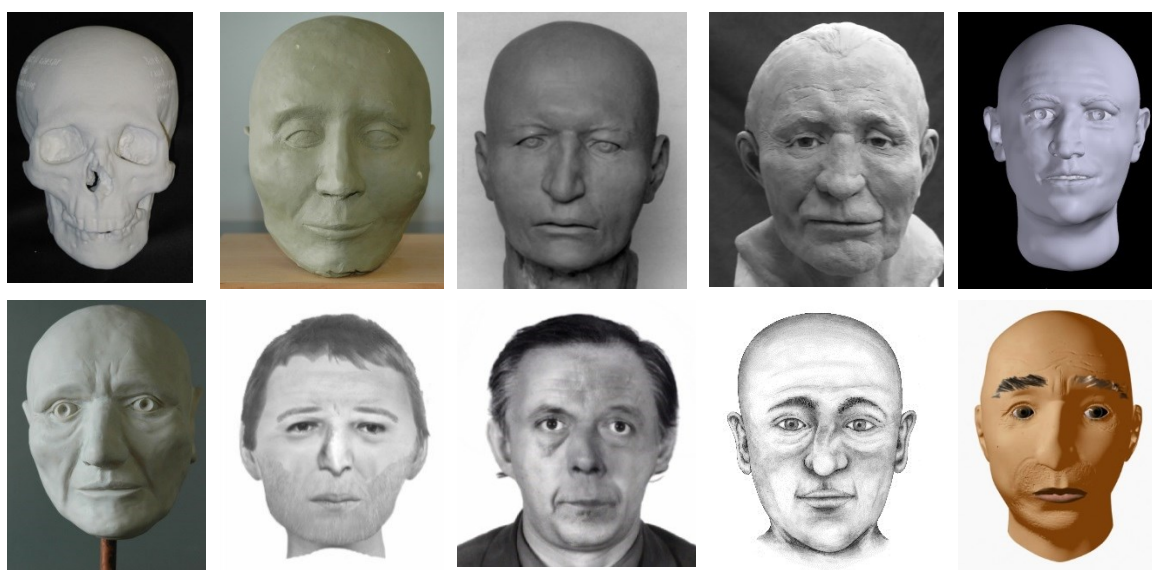
Obr. 30. Dva příklady obličejů rekonstruovaných na základě jedné a téže lebky vytvořených dvěma různými autory (fotografie vlevo a vpravo) a fotografie skutečné podoby daného jedince (uprostřed). Převzato podle Helmer et al. (1993).



Obr. 31. Faciální aproximace na základě jedné a téže lebky vytvořené různými autory a vpravo fotografie cílového jedince. Převzato podle Stephan & Henneberg (2006).



Obr. 32. Rekonstrukce podoby vytvořené různými autory podle jedné a téže lebky neidentifikovaného jedince. Převzato podle Haglung & Reay (1991).



Obr. 33. Rekonstrukce podoby vytvořené různými autory podle jedné a téže lebky (vlevo nahoře) neidentifikovaného jedince, prezentované na 2nd International Conference on Reconstruction of Soft Facial Parts (RSFP), 17.–18. březen 2005, Remagen, Německo. Archiv autorky.

2.3 Cíle práce

Cíle výzkumu disertační práce byly stanoveny následující:

První část výzkumu

Kritické zhodnocení rekonstrukčních principů

- Otestovat spolehlivost vybraných vodítek pro odhad polohy a velikosti částí obličeje.
- Doporučit, která vodítka přednostně používat.

Druhá část výzkumu

Analýza vybraných kraniofaciálních vztahů pomocí geometrické morfometrie

- Popsat variabilitu jednotlivých úseků profilu obličeje a lebky.
- Kvantifikovat těsnost vztahu mezi tvarem lebky a tvarem obličeje, tj. určit, do jaké míry tvar kostěného podkladu určuje (predikuje) tvar měkkých tkání a jakým způsobem.

3 Vlastní práce a výsledky

3.1 Materiál a metody

3.1.1 Materiál

Materiál pro tuto disertační práci tvoří soubor laterálních telorentgenových snímků 87 zdravých dospělých jedinců. Soubor sestává z 52 mužů (21–43 let, průměrný věk: 30 let) a 35 žen (19–39 let, průměrný věk: 21 let). Věkové složení souboru je více méně homogenní s převahou jedinců mladší dospělosti, což umožnilo minimalizovat vliv projevů stárnutí na tvar a velikost obličejových znaků. Počty jedinců v jednotlivých částech výzkumu se nepatrně liší (viz konkrétní publikace) v závislosti na kvalitě zobrazení právě hodnoceného znaku.

Snímky byly pořízeny mezi roky 1977 a 1992 na Stomatologické klinice, Královské Vinohrady, v Praze, jako kontrolní vzorek pro výzkum pacientů s vrozenými vadami faciálního skeletu a nyní jsou součástí sbírek Katedry antropologie a genetiky člověka, Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Jedinci ve zkoumaném vzorku nevykazují žádnou obličejovou disharmonii nebo reverzní okluzi, nikdy nepodstoupili ortodontický zákrok (Šmahel & Brejcha, 1983).

Snímky byly pořízeny za standardizovaných podmínek (Šmahel & Brejcha, 1983): centrální okluze s hlavou fixovanou ve stabilní poloze pomocí cephalostatu, obrazovou ohniskovou vzdáleností 400 cm a předmětovou ohniskovou vzdáleností 30 cm, s konstantním zvětšením 8,1 %. Výhodou telorentgenografie je velmi malá distorze obrazu a ostré kontury zachycených struktur (Macková & Velemínská, 2007). Na snímcích je zachycena jak kontura lebky, tak kontura měkkých tkání obličeje.

3.1.2 Metody

Kontura měkkého a tvrdého profilu obličeje byla z rentgenových snímků manuálně překreslena na pauzovací papír tužkou 0,5 HB v na světelném panelu v zatemněné místnosti. Liniové kresby byly následně s měřítkem naskenovány v rozlišení 300 dpi a dále upraveny v grafickém editoru Adobe Photoshop CS2. Součástí úprav byla změna kontrastu, rotace obrazu (zarovnání dle frankfurtské horizontály) a ořez obrazu. Tento postup

odpovídal postupu v obdobných studiích (Stephan et al., 2003; Rynn & Wilkinson, 2006). Současně byly k měření vybraných hodnot využity i rentgenové snímky v digitalizované podobě, které byly upraveny shodným způsobem jako překreslené kontury. Měření bylo provedeno přímo v grafickém editoru pomocí příslušného nástroje. Získané lineární rozměry byly následně korigovány s ohledem na zvětšení (8,1 %) originálních rentgenových snímků.

Povaha výše popsaného materiálu předurčila výběr testovaných predikčních pravidel. Na profilových snímcích jsou zachyceny následující znaky: poloha oční koule v antero-posteriorním (AP) směru a superio-inferiorním (SI) směru, prominence nosu (poloha bodu *pronasale*), poloha štěrbiny ústní, poloha okrajů červené části rtů, výška rtů. Konkrétní predikční pravidla (metody), která byla předmětem testování spolehlivosti, jsou uvedena v souhrnném textu k jednotlivým publikacím (viz níže).

Statistická analýza použitá k vyhodnocení spolehlivosti predikčních pravidel (Mala, 2013; Zednikova Mala & Velemínska, 2016; Zednikova Mala & Velemínska, 2018) byla převzata z publikací Stephan et al. (2003), Rynn & Wilkinson (2006) a zahrnovala vyhodnocení rozložení dat, výpočet deskriptivních statistik, výpočet korelací a porovnání průměrů skutečných a predikovaných hodnot pomocí párového t-testu. Rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou hodnotou konkrétního rozměru (průměrná diference, průměrná absolutní hodnota diference, standardní chyba odhadu) byl současně vyjádřen jako procento z průměru odpovídajícího skutečného rozměru. Dále byl vypočten podíl jedinců s nadhodnocenou nebo podhodnocenou hodnotou znaku, podíl jedinců s chybou predikce $\leq 5\%$ a s nulovou chybou predikce.

K segmentaci a extrakci souřadnic landmarků pro analýzu profilové křivky obličeje a obličejového skeletu byl využit software Morphome3cs (verze 2.0).

Statistická analýza použitá k vyhodnocení síly vzájemného vztahu mezi konturou měkkého a tvrdého profilu obličeje pomocí geometrické morfometrie (Zedníková Malá et al., 2018) byla převzata z publikací Halazonetis (2007), Rohlf & Corti (2000) a Klingenberg (2009) a zahrnovala analýzu hlavních komponent (Principal Component Analysis – PCA), mnohonásobnou lineární regresi, Partial Least Squares (PLS) analýzu a výpočet RV koeficientu.

K výpočtům byly využity programy Statistica 7.0., MS Excel 2010, Morphomet3cs (2.0), Morpho J (1.05d), PAST (2.17b) a balík programů Thin-Plate Spline.

3.2 Výsledky a diskuze predikčních pravidel

3.2.1 Prominence nosu

Na testování spolehlivosti predikčních pravidel pro odhad polohy bodu *pronasale* jsme se zaměřili v publikaci **Mala, P. Z. (2013). Pronasale position. An appraisal of two recently proposed methods for predicting nasal projection in facial reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 58, 957–963** (Příloha A).

Ačkoliv mají tvar a velikost nosu relativně malý význam při rozpoznávání obličeje zepředu (Haig, 1984; Haig, 1986), důležitou roli hrají v případě prezentace obličeje z profilu, poloprofilu nebo ve formě trojrozměrného modelu. Avšak i při prezentaci obličeje z frontálního pohledu jsou znaky přímo viditelné pouze z profilu (např. tvar profilu nosu, výška kořene nosu, prominence nosu či směr hrotu nosu) důležité pro správné zachycení morfologie nosu prostřednictvím stínování.

Rekonstrukce profilu nosu je předmětem zájmu mnoha autorů. Do současné doby bylo publikováno celkem 12 metod (predikčních pravidel) pro odhad polohy hrotu nosu, (tj. polohy bodu *pronasale*¹⁶) u dospělých jedinců a zahrnují postupy navržené následujícími autory: Gerasimov (1955, cit. dle Ullrich & Stephan, 2011), Krogman & Işcan (1962, cit. dle Stephan et al., 2003), Macho (1986), George (1987), Lebedinskaya (1998)¹⁷, Stephan et al. (2003), Rynn et al. (2010), Lee et al. (2014), Utsuno et al. (2016), Tedeschi-Oliviera et al. (2016), Ridel et al. (2018), a Sarilita et al. (2018).

Spolehlivost některých metod (Gerasimov 1955, cit. dle Ullrich & Stephan, 2011; Krogman & Işcan, 1962, cit. dle Stephan et al., 2003; George, 1987; Lebedinskaya, 1998) byla opakovaně testována již dříve ve třech studiích (Stephan et al., 2003; Rynn & Wilkinson, 2006; López et al., 2010). V publikaci Mala (2013) jsme se proto zaměřili na dvě, v době vzniku publikace nejaktuálnější, metody – dle Stephan et al. (2003) a dle Rynn et al. (2010).

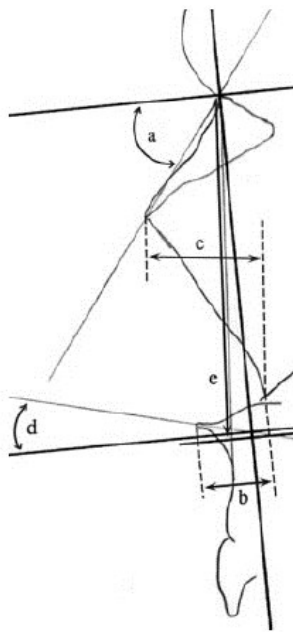
Metoda dle Stephan et al. (2003) je založena na korelacích mezi rozměry kostěného podkladu nosu a polohou bodu *pronasale*, které byly zjištěny na profilových rentgenových snímcích 59 dospělých jedinců. Regresní rovnice pro predikci prominence nosu v horizontálním směru (podél osy x) je specifická pro muže a pro ženy a vyžaduje dosazení

¹⁶ Nejvíce dopředu vyčnívající bod na kontuře profilu nosu při orientaci lebky dle frankfurtské horizontály. Antropometrické body použité v textu disertace jsou popsány v příloze práce.

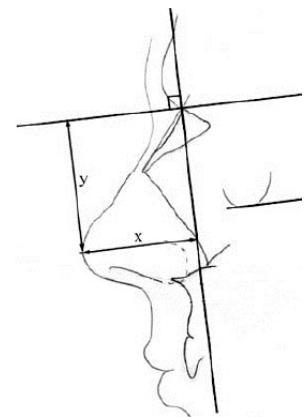
¹⁷ V publikacích (např. Stephan et al., 2003; Rynn & Wilkinson, 2006) často uváděna jako metoda autorů Prokopec & Ubelaker (2002).

hodnot tří rozměrů (a, b, c; Obr. 34). Regresní rovnice pro predikci prominence nosu ve vertikálním směru (podél osy y) je na pohlaví jedince nezávislá a vyžaduje dosazení hodnot dvou rozměrů (d, e; Obr. 34). Poloha bodu *pronasale* je dána vypočítanými souřadnicemi x a y orientovanými dle frankfurtské horizontály s počátkem v bodě *nasion* (Obr. 35).

Spolehlivost metody uváděná samotným autorem (zjišťována na totožném vzorku) vyjádřená jako průměrná diference činí 0,1 mm (SD = 2,7 mm) pro x souřadnici a 0,1 mm (SD = 2,2 mm) pro y souřadnici.



Obr. 34. Metoda predikce prominence nosu dle Stephan et al. (2003). Rozměry (mm) vstupující do regresních rovnic. (a) – úhel nosních kostí (*nasion–rhinion*) vzhledem k frankfurtské horizontále, (b) – vzdálenost špičky předního nosního trnu od okraje nosního otvoru při jeho bázi, (c) – vzdálenost bodu *rhinion* od nejvíce posteriorního bodu na okraji nosního otvoru, měřeno kolmo k rovině *nasion–prosthion*, (d) – úhel předního nosního trnu vzhledem k frankfurtské horizontále, pozitivní nad horizontálou, negativní pod horizontálou, (e) – vzdálenost NX (dle metody George, 1987). Převzato podle Stephan et al. (2003).

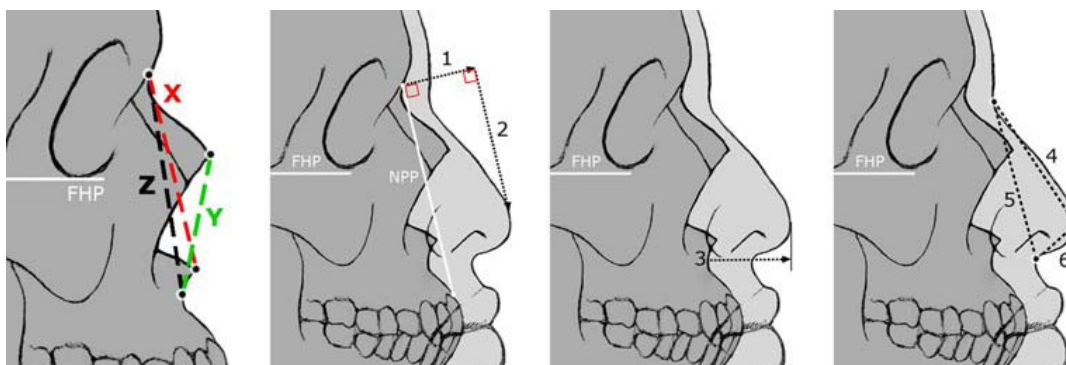


Obr. 35. Odhadované souřadnice x a y dle metody Stephana et al. (2003) paralelní nebo kolmé k frankfurtské horizontále. Převzato podle Stephan et al. (2003).

Spolehlivost metody dle Stephan et al. (2003) byla také testována autory Rynn & Wilkinson (2006). Rynn & Wilkinson (2006) zjišťovali chybu predikce (průměrnou diferenci) pouze pro souřadnici x. Metoda dle Stephan et al. (2003) prominenci nosu podhodnocovala statisticky významně v průměru o 1,6 mm (SD = 4 mm), u žen byla průměrná diference -1,1 mm (SD = 3,2 mm) a u mužů -2,2 mm (SD = 4,9 mm).

Metoda predikce polohy bodu *pronasale* a rozměrů zevního nosu autorů Rynn et al. (2010) byla vytvořena na základě studia vzájemných korelací mezi rozměry kostěného a zevního nosu u 139 jedinců (Obr. 36). Autoři se zaměřili na odhad celkem šesti rozměrů pomocí jednoduchých regresních rovnic. Anteriorní (ProAnt) a vertikální (ProVert) poloha bodu *pronasale* (odpovídá souřadnicím x a y) vzhledem k bodu *nasion* je predikována v systému souřadnic paralelních či kolmých k linii *nasion–prosthion* (NPP). Anteriorní polohu bodu *pronasale* (ProP) lze také rekonstruovat podél linie paralelní s frankfurtskou

horizontálou vzhledem k bodu *subspinale*. Poslední tři rovnice jsou navrženy k odhadu délky, výšky a hloubky zevního nosu podobně jako u metody dle Macho (1986), viz dále.



Obr. 36. Měřené kraniální rozměry a rozměry odhadované pomocí regresních rovnic dle metody Rynn et al. (2010). (X) – *nasion–akanthion*, (Y) – *rhinion–subspinale*, (Z) – *nasion–subspinale*, (1) – anteriorní prominence bodu *pronasale* kolmo k ose *nasion–prosthion* (ProAnt), (2) – vertikální poloha bodu *pronasale* paralelně k ose *nasion–prosthion* (ProVert), (3) – anteriorní prominence bodu *pronasale* paralelně k frankfurtské horizontále (ProP), (4) – délka nosu, (5) – výška nosu, (6) – hloubka nosu. Převzato podle Rynn et al. (2010).

Spolehlivost metody byla testována samotnými tvůrci metody na pěti jedincích, kteří nebyli součástí zkoumaného vzorku použitého k odvození regresních rovnic. Autoři hodnotí metodu jako spolehlivou, jelikož pouze 5 z 30 odhadovaných rozměrů překročilo chybu ± 2 mm (Rynn et al., 2010).

V předkládané studii Mala (2013) byla spolehlivost dvou výše popsaných metod hodnocena na základě velikosti průměrné diference a její směrodatné odchylky. Dospěli jsme k následujícím výsledkům.

Anteriorní poloha bodu *pronasale*

Výsledky ukázaly, že metoda dle Stephan et al. (2003) prominenci nosu v průměru podhodnocuje (ve skutečnosti je nos více prominující) o 2,1 mm (SD = 3,1 mm) u mužů a o 0,8 mm (SD = 2,1 mm) u žen, v obou případech statisticky významně. Velikost chyby v predikci u mužů nepřekročila 6,3 % skutečné průměrné hodnoty x , u žen 2,7 %. Odhad anteriorní polohy v rámci chyby ≤ 5 % skutečného průměrného rozměru byl učiněn u 38 % jedinců (31 % mužů a 46 % žen).

Výsledky porovnání skutečných hodnot a hodnot predikovaných pomocí metody dle Rynn et al. (2010) ukázaly, že anteriorní prominence nosu v NPP (ProAnt) byla podhodnocena o 1,4 mm (SD = 2,5 mm) u mužů a o 1,3 mm (SD = 2,5 mm) u žen, v obou případech statisticky významně. Jelikož originální metoda nerozlišuje mezi pohlavími, byla

provedena analýza i na celém studovaném vzorku. Chyba predikce ProAnt pak činila -1,3 mm (SD = 2,4 mm; statisticky významný rozdíl). Velikost průměrné chyby ProAnt nepřekročila 4,5 % skutečného rozměru. Odhad anteriorní polohy v rámci chyby ≤ 5 % skutečného průměrného rozměru byl učiněn u 45 % jedinců (40 % mužů a 46 % žen).

Regresní rovnice pro odhad anteriorní prominence bodu *pronasale* od bodu *subspinale* podél frankfurtské horizontály (ProP) dle Rynn et al. (2010) vykazovala nejhorší výsledky v rámci testovaných rovnic. Průměrná diference pro celý vzorek -2,3 mm (SD = 2,7 mm) představovala 6,9 % skutečného rozměru. Odhad ProP v rámci chyby ≤ 5 % skutečného průměrného rozměru byl učiněn u 26 % jedinců (33 % mužů a 17 % žen).

Vertikální poloha bodu *pronasale*

Vertikální umístění bodu *pronasale* dané hodnotou y bylo metodou dle Stephan et al. (2003) v průměru nadhodnoceno (ve skutečnosti bod leží výše) o 1,4 mm (SD = 3 mm) u mužů a 0,7 mm (SD = 2,3 mm) u žen, statisticky významně pouze u mužů. Velikost průměrné chyby v predikci u mužů nepřekročila 3,1 % skutečné průměrné hodnoty y , u žen 1,7 %. Odhad vertikální polohy v rámci chyby ≤ 5 % byl učiněn u 52 % jedinců (46 % mužů a 60 % žen). Jelikož se při odhadu vertikální polohy bodu *pronasale* dle originální metody Stephan et al. (2003) nerozlišuje mezi pohlavími, byla provedena analýza i na celém studovaném vzorku. Chyba predikce pak činila 1,1 mm (SD = 2,7 mm; statisticky významný rozdíl).

Odhad vertikální polohy bodu *pronasale* v NPP (ProVert) dle metody Rynn et al. (2010) odpovídal jeho skutečné poloze. Průměrná diference u mužů činila 0,3 mm (SD = 2,3 mm) a u žen -0,4 mm (SD = 1,9 mm), v obou případech se lišila statisticky nevýznamně. Originální metoda nerozlišuje mezi pohlavími, tudíž byla provedena analýza i na celém studovaném vzorku. Chyba predikce ProVert pak činila 0,04 mm (SD = 2,2 mm; statisticky nevýznamný rozdíl). Velikost průměrné chyby ProVert nepřekročila u obou pohlaví 1 % skutečného rozměru. Odhad vertikální polohy v rámci chyby ≤ 5 % skutečného průměrného rozměru byl učiněn u 66 % jedinců (65 % mužů a 66 % žen).

Rozměry zevního nosu

Autoři Rynn et al. (2010) navrhli regresní rovnice i pro predikci výšky, délky a hloubky zevního nosu. Z regresních rovnic pro odhad rozměrů zevního nosu nejlépe fungovala rovnice pro výšku nosu. Porovnávané průměry nebyly u obou pohlaví statisticky významně rozdílné a průměrná diference nepřekročila 1,3 % skutečného rozměru. Naopak

nejméně spolehlivá predikce se týkala hloubky nosu. Průměrná diference u mužů činila 1,4 mm (SD = 2,3 mm) a 1,1 mm (SD = 1,7 mm) u žen, což představuje 6 %, resp. 7 %, skutečné průměrné hloubky nosu. Délka nosu byla o obou pohlaví podhodnocena o 1,8 mm (SD = 3 mm), což představuje přibližně 4 % skutečné průměrné délky nosu. Výsledky všech tří regresních rovnic byly lepší ve srovnání s výsledky metody dle Macho (1986) hodnocené ve studii Rynn & Wilkinson (2006).

Nově byla spolehlivost metody dle Rynn et al. (2010) testována na vzorku 86 subadultních jedinců (obyvatelé Skotska) a vzorku 335 adultních jedinců z Indonésie (Sarilita et al., 2018).

V případě subadultní populace metoda vykazovala velmi dobrou spolehlivost. Statisticky významný rozdíl mezi predikovanou a skutečnou hodnotou byl zjištěn pouze u vertikální polohy bodu *pronasale* v NPP a výšky a hloubky nosu. S výjimkou hloubky nosu (průměrná diference byla rovna -2,4 mm, SD = 1,8 mm, 14,1 % skutečného rozměru) hodnoty průměrné diference u všech predikovaných rozměrů nepřesáhly 0,7 mm (1,5 % skutečného rozměru). Odhad anteriorní polohy v rámci chyby ≤ 5 % skutečného průměrného rozměru byl učiněn u 41 % jedinců, v případě vertikální polohy pak u 62 % jedinců (Sarilita et al., 2018). Tyto výsledky jsou srovnatelné s našimi výsledky (Mala, 2013).

V případě vzorku z Indonésie spolehlivost metody klesla. U všech porovnávaných rozměrů byl zjištěn statisticky významný rozdíl, průměrná chyba se pohybovala v rozmezí 1–5,5 mm (2,9–17 % skutečného rozměru), což vedlo k odvození nových regresních rovnic při zachování stejných vstupních proměnných (rozměrů X, Y, Z). Odvozené regresní rovnice vedly ke snížení chyby v predikci a zvýšení spolehlivosti metody, nebyly však zatím ověřeny na jiném vzorku.

Hodnocení a doporučení na základě vlastních výsledků a publikovaných studií:

Obě námi testované metody (Stephan et al., 2003; Rynn et al., 2010) pracovaly lépe v případě žen (s výjimkou rozměru ProAnt) a odhad vertikální polohy bodu *pronasale* byl spolehlivější než odhad anteriorní prominence nosu.

Ve srovnání s metodou dle Stephan et al. (2003), vykazuje metoda dle Rynn et al. (2010) menší průměrnou chybu v predikci vertikální polohy bodu *pronasale* u obou pohlaví a v predikci anteriorní polohy u mužů. Při zohlednění počtu jedinců, u nichž byly požadované hodnoty odhadnuty s chybou ≤ 5 %, se metoda dle Rynn et al. (2010) však ukázala jako spolehlivější ve všech proměnných. Měla by být používána přednostně.

Metoda dle Rynn et al. (2010) se jeví jako dostatečně spolehlivá jak pro dospělé, tak subadultní populaci evropského původu. Studie autorů Sarilita et al. (2018) však prokázala její populační specifitu.

V následucím textu shrnujeme poznatky k dalším metodám predikce prominence nosu, které vychází z rešerše literatury. Ačkoliv se nejedná o výsledky vlastního výzkumu, považujeme za důležité poskytnout kompletní údaje k daným metodám. V následujícím přehledu je každá z metod krátce popsána a dále je uvedena a diskutována její spolehlivost. Takový ucelený přehled v odborné literatuře zatím chybí a zájemcům o metody faciální rekonstrukce tak poskytujeme relevantní informaci na jednom místě.

Metoda dle Gerasimov (1995, cit. dle Ullrich & Stephan, 2011)

Tzv. „metoda dvou tečen“¹⁸, jak je v literatuře (Stephan et al., 2003; Wilkinson, 2004; Rynn & Wilkinson, 2006; Rynn et al., 2010) nazýván postup pro odhad polohy hrotu nosu popsáný M. M. Gerasimovem (1955, cit. dle Ullrich & Stephan, 2011) spočívá v narýsování dvou linií: jedna je prodloužením směru distální třetiny nosních kostí a druhá prodloužením celkového směru dna nosního otvoru laterálně přiléhajícího k přednímu nosnímu trnu a kosti radličné. V jejich průsečíku se nachází hrot nosu.

Spolehlivost této metody byla předmětem studií Stephan et al. (2003), Rynn & Wilkinson (2006) a López et al. (2010).

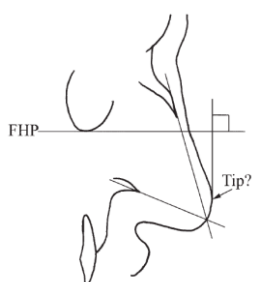
Stephan et al. (2003) vyhodnotili tuto metodu jako nejhůře fungující ze čtyř porovnávaných metod. Dle jejich výsledků „metoda dvou tečen“ nadhodnocuje prominenci nosu o 5,3 mm (SD = 9 mm; přímá vzdálenost odhadovaného a skutečného bodu *pronasale*) a její použití nedoporučují. Definice jimi testované metody však vychází z překladu publikace Gerasimov (1968 a 1971), ve kterém je druhá tečna popisována jako přímka prodlužující směr špičky předního nosního trnu, a nikoliv dna nosního otvoru. Na chybu v definici metody, a tedy i irelevantnost svých výsledků Stephan upozorňuje v publikaci Ullrich & Stephan (2011)¹⁹.

Rynn & Wilkinson (2006) rovněž testovali spolehlivost „metody dvou tečen“, přičemž také vycházeli z definice druhé tečny jako linie následující směr špičky předního nosního trnu. Vzhledem ke tvrzení Gerasimova (1955, cit. dle Rynn et al., 2010), že chrupavčitá část nosu je přirozeným pokračováním nosních kostí a vzhledem k poznatku, že směr tohoto pokračování udávají většinou jen 1–2 mm distální části nosních kostí

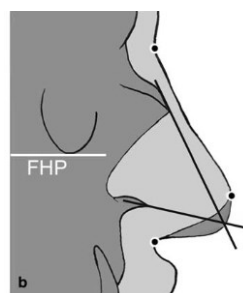
¹⁸ Z angl. překladu „two-tangent method“.

¹⁹ Herbert Ullrich byl přímým žákem Gerasimova, absolvoval pod jeho vedením celkem 5 několikátýdenních školení mezi lety 1959 a 1969.

(a nikoliv v jejich celá distální třetina), definici první tečny upravili jako linii prodlužující pouze směr nejvíce distální části nosních kostí. Dle jejich výsledků pak metoda prominenci nosu podhodnocovala o 0,9 mm podél osy x a o 3,6 mm podél osy y (SD = 1,9 mm resp. 1,7 mm; systém souřadnic byl orientován dle frankfurtské horizontály a kolmo na ni). Navíc autoři diskutují skutečnou polohu hrotu nosu tak, jak ji pravděpodobně vnímal i Gerasimov, tj. hrot nosu nemusí nutně odpovídat bodu *pronasale*, ale může se nacházet o několik milimetrů jinde, zejména u dolů zahnutých nosů (Obr. 37). Pokud autoři hodnotili polohu hrotu nosu nikoliv vzhledem k frankfurtské horizontále ale podél linie vycházející z předního nosního trnu (druhá tečna), pak se průsečík dvou tangent ve všech případech nacházel na kontuře skutečného profilu nosu v oblasti „laicky definovaného“ hrotu nosu (Obr. 37). Průměrný rozdíl rekonstruované a skutečné polohy hrotu nosu pak činil 0,2 mm. S touto modifikací metoda dosáhla nejvyšší spolehlivosti mezi porovnávanými metodami a autoři doporučují její použití. V následující studii (Rynn et al., 2010) „metodu dvou tečen“ popisují jako nedílnou součást celého postupu pro spolehlivou rekonstrukci profilu nosu pomocí regresních rovnic (Obr. 38). Ačkoliv Ullrich & Stephan (2011) připouští, že se ani samotný Gerasimov přesně nedržel svého postupu, a místo distální třetiny nosních kostí využíval ke stanovení směru tečny k nosním kostem právě pouze jejich úplný volný konec, tak výsledky studie Rynn & Wilkinson (2003) považují rovněž za neadekvátní test spolehlivosti metody právě z důvodu chybné definice linie prodlužující směr předního nosního trnu.



Obr. 37. Rozdíl mezi průsečíkem dvou tečen narýsovaných za slepých podmínek (bez znázornění kontury měkkého profilu nosu) a bodem *pronasale*. Převzato podle Rynn & Wilkinson (2006).

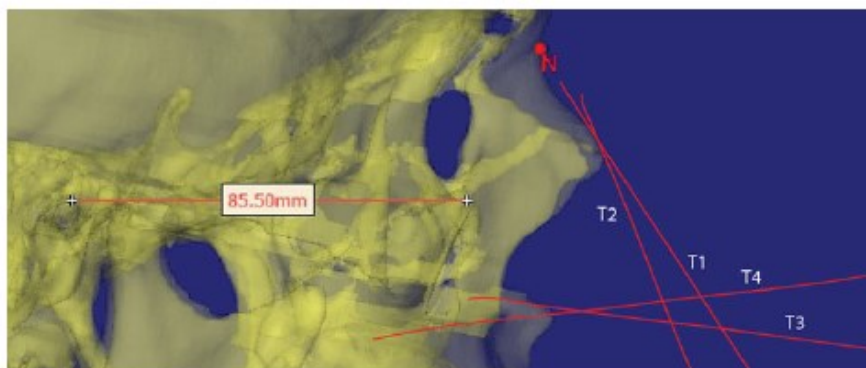


Obr. 38. Ilustrace predikované polohy bodu *pronasale* dle Rynn et al. (2010) za současného využití „metody dvou tečen“ (Rynn & Wilkinson, 2006) pro odhad polohy hrotu nosu. Převzato podle Rynn et al. (2010).

V roce 2010 publikovali López et al. (2010) další test spolehlivosti „metody dvou tečen“ definovaných shodně se studií Stephan et al. (2003). Podle jejich výsledků metoda vykazovala druhou nejvyšší spolehlivost mezi porovnávanými metodami, avšak zjištěné

hodnoty průměrné diference jsou poměrně vysoké. Průměrný rozdíl podél osy x činil 7,5 mm (SD = 9,2) a -4,7 mm podél osy y (SD = 4,1 mm).

V návaznosti na studii Ullrich & Stephan (2011) autoři Maltais Lapointe et al. (2016) porovnávali jak původní Gerasimovu metodu, tak všechny ostatní kombinace tangent (2 varianty pro každou z nich, tedy celkem 4 modifikace Gerasimovy metody, Obr. 39).



Obr. 39. Různé modifikace Gerasimovy metody. T1–T4 představují různé varianty v umístění a orientaci pomocných linií – tangent. Převzato podle Maltais Lapointe et al. (2016).

Největší chyba byla vnášena tečnou k distální třetině nosních kostí a linií předního nosního trnu. Nejspolehlivější byly naopak tečna k posledním 1–2 mm délky nosních kostí a tečna ke dnu nosního otvoru a podle autorů by měly být používány přednostně. Nicméně výsledky kombinace tečny k posledním 1–2 mm distální části nosních kostí a linie předního nosního trnu (Rynn & Wilkinson, 2006) se statisticky významně nelišily od kombinace tečny k posledním 1–2 mm distální části nosních kostí a tečny ke dnu nosního otvoru (modifikace navržená autory Ullrich & Stephan, 2011). Celkově však všechny analyzované varianty „metody dvou tečen“ polohu hrotu nosu nadhodnocovaly a přímá vzdálenost odhadované polohy od polohy skutečné přesahovala 5 mm, tedy žádná z kombinací není spolehlivá (Maltais Lapointe et al., 2016).

Ve světle výsledků studie Maltais Lapointe et al. (2016) lze interpretovat rozdíly ve spolehlivosti „metody dvou tečen“ zjištěné autory Stephan et al. (2003) a López et al. (2010) používající definici distální třetiny nosních kostí (nízká spolehlivost metody) a autory Rynn & Wilkinson (2006) používající definici poslední 1–2 mm distální části nosních kostí (vysoká spolehlivost metody). Rozdíly ve výsledcích shodné kombinace tangent mezi autory Maltais Lapointe et al. (2016) a Rynn & Wilkinson (2006) by mohly být způsobeny například lehce odlišným způsobem orientace pomocných linií. Ačkoliv oba týmy uvádí vysokou spolehlivost (intra-observační chybu) při opakovaném umístění tangent, zároveň připouští subjektivitu při jejich umístění (Stephan et al., 2003; Rynn et al., 2010; Maltais

Lapointe et al., 2016). Malý rozdíl v úhlu tečny totiž může vyústit ve značné odchýlení koncové části linie od skutečného hrotu nosu i o několik milimetrů (Maltais Lapointe et al., 2016).

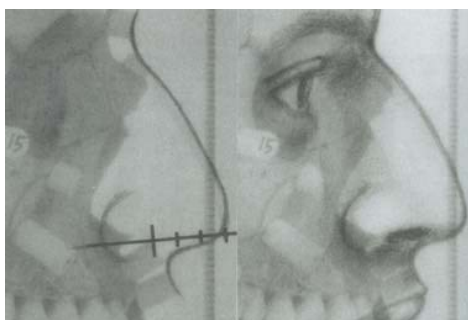
Podle autorů Rynn et al. (2010) „metoda dvou tečen“ není vhodná k predikci bodu *pronasale*, ale je vysoce spolehlivá v predikci bodu na povrchu hrotu nosu.

Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií:

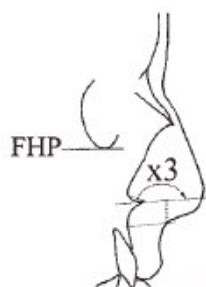
„Metoda dvou tečen“ by měla být používána pouze jako doplňková metoda určená k odhadu polohy hrotu nosu, nikoliv prominence nosu (bod *pronasale*) a to v kombinaci tečny k posledním 1–2 mm distální části nosních kostí a tečny ke dnu nosního otvoru. Využití najde především u lebek s poškozeným či chybějícím předním nosním trnem.

Metoda dle Krogman & Işcan (1962, cit. dle Rynn et al., 2010)

Metoda připisovaná W. M. Krogmanovi (Taylor, 2001; Krogman & Işcan, 1962, cit. dle Rynn et al., 2010), je rozšířená zejména ve Spojených Státech Amerických (Taylor, 2001) a spočívá ve vynásobení délky předního nosního trnu (měřeno od místa dotyku kosti radičné a horní čelisti k bodu *akanthion*) třemi a poté přidání získané hodnoty k průměrné hodnotě tloušťky měkké tkáně v bodě *subnasale* (Rynn et al., 2010) nebo *midphiltrum* (Stephan et al., 2003; Taylor, 2001) podél osy předního nosního trnu (Taylor, 2001; Rynn & Wilkinson, 2006; Obr. 40 a 41). Metoda je také nazývána jako „trojnásobek ANS“ (ANS – angl. „anterior nasal spine“, Rynn & Wilkinson, 2006; Rynn et al., 2010).



Obr. 40. Znárodnění metody „trojnásobku předního nosního trnu“ při praktickém použití. Převzato podle Taylor (2001).



Obr. 41. Schematické znárodnění metody „trojnásobku předního nosního trnu“. Převzato podle Rynn & Wilkinson (2006).

Testováním spolehlivosti této metody odhadu prominence nosu se zabývaly studie autorů Stephan et al. (2003), Rynn & Wilkinson (2006), Rynn et al. (2010) a López et al. (2010).

Stephan et al. (2003) pro hodnocení výsledků odhadu prominence nosu metodou dle Krogmana (Krogman & Işcan, 1962, cit. dle Rynn et al., 2010) použili tloušťku měkké tkáně v bodě *midphiltum* dle Rhine & Moore (1984, cit. dle Taylor, 2001) tak, jak postup prezentuje Taylor (2001). Vzhledem k obtížné lokalizaci bodu dotyku kosti radličné a horní čelisti na většině zkoumaných laterálních rentgenových snímcích testovali také variantu, ve které délku předního nosního trnu reprezentuje vzdálenost báze laterálního okraje nosního otvoru k bodu *akanthion*. Obě varianty Krogmanovy metody byly vyhodnoceny jako druhé nejhorší ze čtyř porovnávaných metod. Průměrná diference od skutečné prominence nosu činila pro modifikaci metody -3 mm (SD = 7,3 mm) podél osy x (kartézská soustava souřadnic dle frankfurtské horizontály) a -5 mm (SD = 6,2 mm) pro originální metodu. Stephan et al. (2003) tuto metodu nedoporučují. Získané výsledky však mohou být ovlivněny jak chybou při určování polohy bodu vomero-maxilárního spojení, a tedy chybně změřenou délkou předního nosního trnu, čímž se chyba následně trojnásobí, tak použitím tloušťky měkké tkáně v bodě *midphiltrum*, který není v přímém vztahu k nosu (Stephan et al., 2003).

Obě varianty metody „trojnásobku ANS“ testovali také Rynn & Wilkinson (2006). Průměrná diference činila -9,2 mm (SD = 9 mm) pro modifikaci metody a -10 mm (SD = 8,4 mm) pro originální variantu metody a reprezentovala nejhorší výsledky mezi porovnávanými metodami. Autoři současně nezjistili žádnou korelaci mezi délkou předního nosního trnu a hloubkou chrupavčité části nosu. V další studii (Rynn et al., 2010) provedli nový test na jiném souboru lebek (n = 42). Nové výsledky potvrdily závěry předchozí studie.

Rovněž López et al. (2010) shledali tuto metodu jako málo spolehlivou. Průměrná diference činila 8,6 mm (SD = 5,4 mm) podél osy x a -5,2 mm (SD = 3,4 mm) podél osy y.

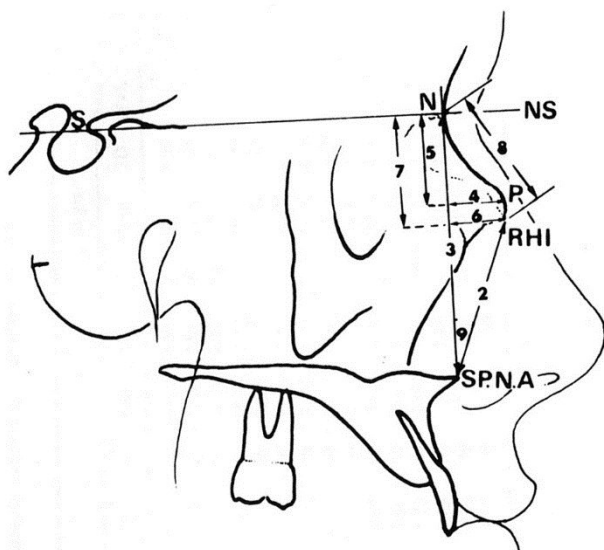
Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií:

„Metoda trojnásobku ANS“ není doporučena k dalším použití z důvodu konzistentně nízké spolehlivosti napříč všemi publikovanými studiemi.

Metoda dle Macho (1986)

Metoda dle Macho (1986) vychází ze zjištěných korelací mezi osmi vybranými rozměry nosního otvoru (Obr. 42) a rozměry zevního nosu změřenými na laterálních rentgenových snímcích 353 jedinců. Rozměry byly měřeny podél roviny *nasion–sella* a kolmo na ni. Dosazením do systému regresních rovnic jsou získány hodnoty pro výšku nosu (*nasion* na obličejí–*subnasale*), délku nosu (*nasion* na obličejí–*pronasale*) a hloubku nosu (*pronasale–subnasale*), které tvoří trojúhelník reprezentující zevní nos. Tento

trojúhelník je pak nutno správně umístit s ohledem na tloušťku měkké tkáně v bodech *nasion* a *subspinale*.



Obr. 42. Znázornění kraniálních rozměrů pro odhad rozměrů zevního nosu dle Macho (1986). (2) – výška *apertura piriformis* (vzdálenost *rhinion–akanthion*), (3) – výška kostěného nosu (vzdálenost *nasion–akanthion*), (4) – vzdálenost nejvíce prominujícího bodu nosních kostí (P) od referenční roviny *nasion–akanthion*, (5) – projektivní vzdálenost bodu P od bodu *nasion*, (6) – vzdálenost bodu *rhinion* od referenční roviny *nasion–akanthion*, (7) – projektivní vzdálenost bodu *rhinion* od bodu *nasion*, (8) – délka nosních kostí, (9) – úhel mezi rovinou *nasion–akanthion* a *akanthion–rhinion*. Převzato podle Macho (1986).

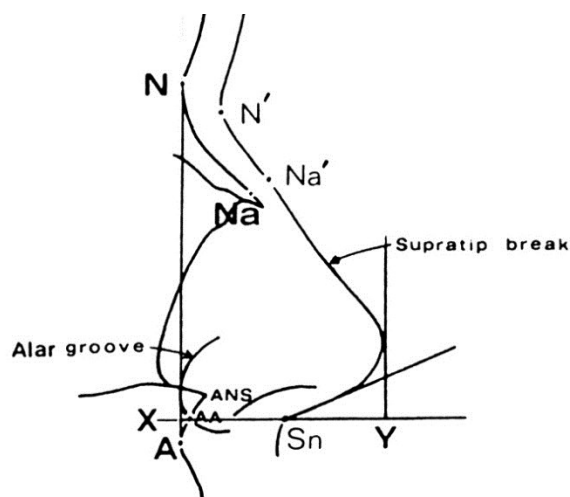
Test spolehlivosti metody dle Macho (1986) provedli autoři Rynn & Wilkinson (2006). Pouze v případě délky nosu u žen se průměrná diference mezi skutečnou a odhadovanou hodnotou rozměru statisticky významně nelišila od nuly. Ostatní predikované rozměry byly použitím metody nadhodnoceny. Průměrná diference pro výšku nosu činila 2,8 mm (SD = 2,8 mm), pro hloubku nosu 1,2 mm (SD = 2,6 mm) a délku nosu u mužů 2,3 mm (SD = 3,1 mm).

Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií:

I přes relativně dobrou spolehlivost (Rynn & Wilkinson, 2006) se metoda jeví jako nepraktická kvůli množství potřebných rozměrů, nutnosti použít rentgenový snímek lebky k zajištění správné orientace vstupních rozměrů (dle roviny *nasion–sella*) a „hledání“ správného umístění pro trojúhelník reprezentující zevní nos. Jelikož existují jiné praktičtější metody s vyšší spolehlivostí, je vhodnější volit metody tyto. Metoda dle Macho (1986) by následně po odhadu polohy bodu *pronasale* jinými metodami mohla být využita k odhadu polohy bodu *subnasale* jehož umístění bývá při rekonstrukci podoby rovněž problematické.

Metoda dle George (1987)

Metoda R. M. George (1987) pro odhad prominence nosu vychází ze základů estetické plastické chirurgie a je založena na zkoumání 54 laterálních rentgenových snímků. Nejprve je narýsována přímka spojující *nasion* (N) a bod A. Následně je narýsována linie rovnoběžná s frankfurtskou horizontálou procházející bodem AA, tj. polovinou vzdálenosti *akantion*–bod A. Průsečík těchto dvou linií je označen X. Prominence nosu (XY) pak odpovídá 60,5 % vzdálenosti *nasion*–X u mužů a 56 % u žen (Obr. 43).



Obr. 43. Schéma metody odhadu prominence nosu dle George (1987). Převzato podle George (1987).

Testováním spolehlivosti této metody odhadu prominence nosu (podél osy x) se zabývaly studie autorů Stephan et al. (2003), Rynn & Wilkinson (2006) a López et al. (2010).

V komparativní studii Stephana et al. (2003) metoda dle George (1987) vykazovala nejlepší výsledky z porovnávaných metod. Průměrná diference mezi odhadovanou a skutečnou polohou bodu *pronasale* činila -2,2 mm (SD = 3 mm).

Srovnatelných výsledků dosáhla metoda i ve studii Rynn & Wilkinson (2006). Průměrná diference činila 1,2 mm (SD = 3,1 mm).

Rovněž ve studii López et al. (2010) metoda dle George (1987) poskytovala nejlepší výsledky z porovnávaných metod, ačkoliv zjištěná chyba predikce byla oproti předchozím výzkumům dvojnásobná (průměrná diference činila 4,9 mm, SD = 2,6 mm).

George (1987) kromě způsobu odhadu prominence nosu popisuje i následný postup pro rekonstrukci celé kontury profilu nosu, resp. hrotu nosu, který zahrnuje konstrukci průměrného naso-labiálního úhlu (22°). Použitím této metody tedy vždy získáme nahoru směřující hrot nosu bez ohledu na morfologii nosního dna a předního nosního trnu. Řešením by mohla být modifikace metody a její kombinace s metodou dle Gerasimova

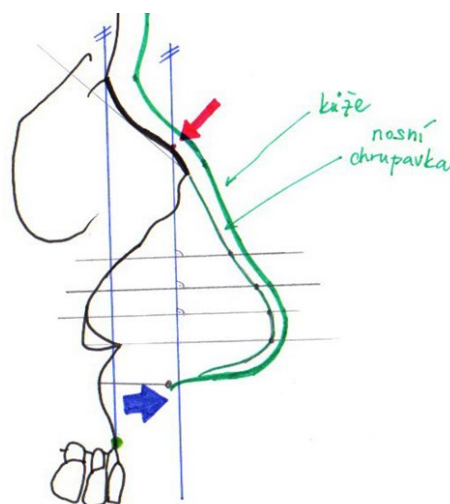
(1955, cit dle Ullrich & Stephan, 2011), tj. využití tangenty ke dnu nosního otvoru. Tato varianta však nebyla zatím nikým navržena a testována.

Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií:

Metoda dle George (1987) je vhodná k použití zejména v případech poškozeného předního nosního trnu a chybějících či ulomených nosních kostí, a to pouze pro predikci prominence nosu v horizontálním směru, nikoliv k odhadu vertikální polohy bodu *pronasale*.

Metoda dle Lebedinskaya (1998) a Balueva et al. (2009)

Metoda dle Lebedinskaya (1998) a Balueva et al. (2009) je založena na premise či poznatku, že profil chrupavčité části hřbetu nosu zrcadlí laterální okraj nosního otvoru podél osy souměrnosti *nasion–prosthion* posunuté do bodu největšího zakřivení distální části nosních kostí (Balueva et al., 2009; Veselovskaya, 2004, osobní sdělení; Obr. 44). K přenesené kontuře laterálního okraje nosního otvoru se následně přidají 2 mm reprezentující kůži.



Obr. 44. Znázornění metody dle Lebedinskaya (1998). Archiv autorky.

Spolehlivost a platnost této metody zkoumali Stephan et al. (2003), Rynn & Wilkinson (2006), López et al. (2010), Rynn et al. (2010) a Zedníková Malá et al. (2018).

Dle výsledků studie Stephana et al. (2003) metoda dle Lebedinskaya (1998) nadhodnocuje polohu bodu *pronasale* podél osy x v průměru o 1,8 mm (SD = 3,9 mm). Nejkratší přímá vzdálenost mezi odhadovaným a skutečným bodem *pronasale* bez ohledu

na souřadnicový systém byla 4,5 mm (SD = 2 mm) a je autory hodnocena jako poměrně spolehlivá.

Rynn & Wilkinson (2006) zvolili pro testování metody jiný postup. Zrcadlený úsek kontury laterálního okraje nosního tvaru rozdělili do pěti úseků a porovnávali délku pomocných linií u predikovaného profilu a skutečného profilu nosu. V délce většiny úseků nezjistili statisticky významný rozdíl včetně posledního úseku procházejícího hrotem nosu. Průměrná diference mezi predikovaným a skutečným hrotem nosu činila 1,1 mm (SD = 3,9 mm). Zároveň však nezjistili žádnou pozitivní korelaci mezi skutečnými a predikovanými rozměry, u žen v některých porovnávaných úsecích zjistili naopak korelaci negativní a podobnost porovnávaných průměrů byla tedy náhodná a přímý vztah mezi tvarem laterálního okraje *apertury piriformis* a tvarem profilu nosu nebyl potvrzen (Rynn & Wilkinson, 2006). Metodu dle Lebedinskaya (1998) autoři označili za nespolehlivou.

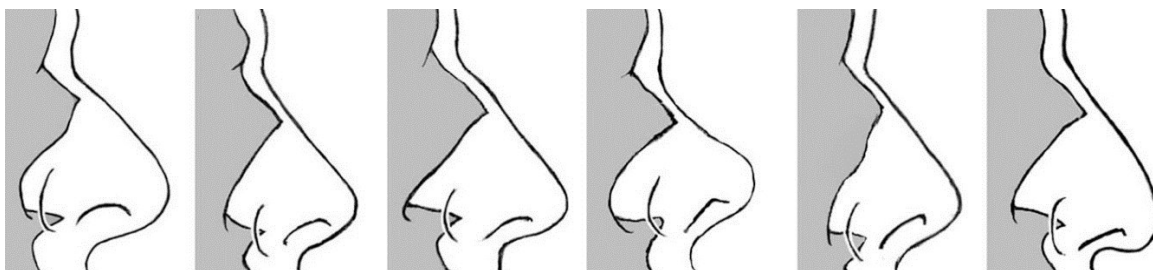
Průměrná diference v poloze predikovaného a skutečného bodu *pronasale* ve studii López et al. (2010) činila 5,6 mm (SD = 3,6 mm) podél osy x (v horizontálním směru) a 1,7 mm (SD = 3,3 mm) podél osy y (ve vertikálním směru).

Výsledky autorů López et al. (2010) se u všech jimi testovaných metod (tj. dle Gerasimov, 1955; Krogman & Işcan, 1962; George, 1987; Lebedinskaya, 1998) výrazně liší od výsledků autorů Stephan et al. (2003) a Rynn & Wilkinson (2006). To může být zapříčiněno odlišným výzkumným vzorkem, což by poukazovalo na populační specifičnost testovaných metod.

Nutno zmínit, že výsledky výše uvedených komparativních studií mohou být ovlivněny ne zcela správnou aplikací metody. Dle Lebedinskaya (1998), Balueva et al. (2009) a Veselovskaya (2004, osobní sdělení) má být osa souměrnosti *nasion–prosthion* posunuta do bodu největšího zakřivení distální části nosních kostí, a nikoliv do bodu *rhinion* (na laterálním rentgenovém snímku distální konec nosních kostí), kam jej umísťují autoři všech výše uvedených studií (tj. Stephan et al., 2003; Rynn & Wilkinson, 2006; López et al., 2010). Bod největšího zakřivení je totožný s bodem *rhinion* pouze u konkávního nebo rovného typu profilu nosních kostí. Podíl jedinců s jednotlivými typy nosních kostí v jednotlivých výzkumných vzorcích není znám, tedy ani velikost chyby vnesené do prezentovaných analýz. Navíc velikost chyby v umístění osy souměrnosti zdvojnásobí velikost chyby při odhadu profilu nosu.

Vztah („zrcadlení“) mezi tvarem hrotu nosu z profilu (kulatý, špičatý typ) a tvarem profilu *apertury piriformis* (zaoblený, zalomený typ) hodnotili Rynn et al. (2010). Mezi porovnávanými kategoriemi byla u jedinců populace evropského původu zjištěna statisticky významná korelace. 72,4 % jedinců zkoumaného vzorku se zalomeným (úhlovitým) typem *apertury piriformis* mělo také špičatý hrot nosu, 76,2 % jedinců se

zaobleným okrajem nosního otvoru mělo také kulatý hrot nosu (Obr. 45). Podobný typ kovariance byl zjištěn ve studii Zedníková Malá et al. (2018), avšak nebyl statisticky významný a nalezené korelace byly obecně velmi nízké.



Obr. 45. Příklady vzájemné korespondence mezi tvarem profilu nosního otvoru a tvarem profilu hrotu nosu dle Rynn et al. (2010). Převzato podle Rynn et al. (2010).

Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií:

Ačkoliv se metoda dle výsledků publikovaných komparativních studií jeví jako spolehlivá, její přednostní používání nedoporučujeme, právě kvůli zatím nejasně prokázanému vztahu mezi tvarem laterálního okraje nosního otvoru a tvarem profilu nosu. V hodnocení metody na základě publikovaných studií je nutno zohlednit také její pravděpodobně chybnou aplikaci (viz výše). Presentované výsledky by tedy mohly být považovány za irelevantní nebo by bylo vhodnější je uvádět jako výsledky modifikované metody, přičemž tato modifikace by spočívala v lokalizaci osy souměrnosti vždy v bodě *rhinion* bez ohledu na tvar profilu nosních kostí. Nejednoznačné výsledky poukazují na potřebu výzkumů zaměřených na možnosti predikce tvaru profilu nosu.

Metoda dle Lee et al. (2014) a metoda dle Ridet et al. (2018)

Metoda dle Lee et al. (2014) a metoda dle Ridet et al. (2018) opět vychází ze vzájemných korelací mezi kraniálními rozměry a rozměry zevního nosu, respektive polohou vybraných landmarků (*pronasale*, *subnasale*, *alare*) vůči definovaným referenčním rovinám (transversální, koronální, sagitální) zjištěných na CBCT skenech 60 dospělých jedinců Korejské populace (Lee et al., 2014) nebo CBCT skenech 120 dospělých jedinců Jihoafrické republiky (60 bělochů a 60 černochů²⁰, Ridet et al., 2018). Obě metody využívají shodně definované vstupní rozměry, tj. projektivní vzdálenosti – výška kostěného nosu (*nasion–akanthion*), délka nosních kostí, šířka *apertury piriformis*, projekce nosních kostí

²⁰ Použity termíny z originální studie Ridet et al. (2018) „black and white South Africans“.

(*rhinion–nasion*) a úhel nosních kostí. Pomocí regresních rovnic je pak odhadována poloha bodů *pronasale*, *subnasale*, *alare* vůči referenčním rovinám. Aplikace obou metod (měření a nanesení vypočítaných vzdáleností) vyžaduje přesnou orientaci lebky dle frankfurtské horizontály.

V případě metody dle Lee et al. (2014) je poloha bodu *pronasale* odhadována pomocí dvou regresních rovnic vzhledem k transversální a koronální rovině. Chyba predikce je autory popsána jako standardní chyba odhadu (SEE) jednotlivých regresních rovnic a je 2,2 mm a 2,6 mm. Spolehlivost metody nebyla testována na jiném vzorku. Lze předpokládat populační specifitu metody.

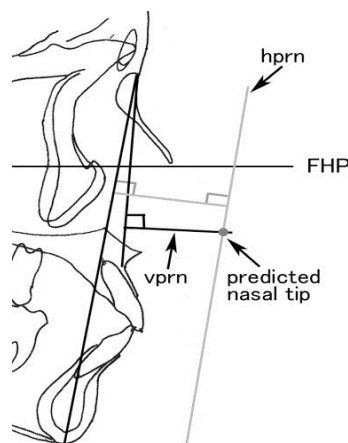
V případě metody dle Ridet et al. (2018) je poloha bodu *pronasale* odhadována pomocí čtyř regresních rovnic pro bělochy a dvou rovnic pro černochy. Spolehlivost metody byla autory testována pomocí cross-validace. Chyba predikce je autory popsána jako *mean squared error* (MSE) jednotlivých regresních rovnic a pohybuje se mezi 1,8 mm a 2,2 mm. Autoři považují své výsledky za předběžné a požadují další testování navržených regresních rovnic.

Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií

Zatím nebyly provedeny další studie s odpovídajícími ukazateli spolehlivosti, metody tedy nelze relevantně zhodnotit.

Utsuno et al. (2016)

Metoda predikce polohy bodu *pronasale* navržená autory Utsuno et al. (2016) byla vypracována na základě morfometrického hodnocení laterálních rentgenových snímků 55 dospělých mužů Japonců. Ke geometrické konstrukci odhadované polohy bodu *pronasale* jsou nutné pouze dva rozměry (*nasion–bod A* a *rhinion–akanthion*), které je možné změřit přímo na lebce. Vertikální poloha bodu *pronasale* (*vprn*) je vypočítána jako podíl (0,77) vzdálenosti *nasion–bod A*, získaná hodnota je nanesena z bodu *nasion* podél linie *nasion–bod A*. Horizontální poloha bodu *pronasale* (*hprn*) je odhadnuta ze vzdálenosti *rhinion–akanthion*, které je rovna, a následně je tato vzdálenost nanesena kolmo ke spojnici *nasion–gnathion* (Obr. 46).



Obr. 46. Konstrukce odhadované polohy bodu *pronasale* dle metody Utsuno et al. (2016). Popis postupu je uveden v textu. Převzato podle Utsuno et al. (2016).

Spolehlivost metody byla autory testována na 12 mužích, kteří nebyli součástí vzorku pro odvození metody. Průměrná diference pro odhad vertikální polohy byla -0,7 mm (SD = 1,7 mm) a -0,9 mm (SD = 1,5 mm) pro odhad horizontální polohy. Přímá vzdálenost predikovaného a skutečného bodu *pronasale* se v průměru lišila o 2 mm (SD = 1 mm).

Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií

Zatím nebyly publikovány další studie s odpovídajícími ukazateli spolehlivosti, metodu tedy nelze relevantně zhodnotit. Dle hodnot uváděných autory metody se metoda jeví jako velmi spolehlivá a bylo by vhodné otestovat její robusticitu i pro jiné populace.

Metoda dle Tedeschi-Oliviera et al. (2016)

Autoři Tedeschi-Oliviera et al. (2016) představili velice jednoduchou metodu predikce polohy bodu *pronasale*. Na laterálních rentgenových snímcích celkem 600 dospělých jedinců brazilské populace měřili úhel mezi body *nasion–pronasale–prosthion*. Velikost úhlu se pohybovala mezi 80° a 100°, medián i průměr byl 90°. Pro odhad bodu *pronasale* je vedena linie z bodu *rhinion*, která je přirozeným pokračováním směru distální části nosního kostí. Pravý úhel je pak posouván podél této linie až kolmice protne bod *prosthion*.

Chyba predikce (zjištěná na tomtéž vzorku) byla autory studie měřena jako přímá vzdálenost mezi skutečnou a odhadovanou polohou bodu *pronasale*. Průměrná chyba predikce u žen byla 1 mm (SD = 1,5 mm) a u mužů 0,2 mm (SD = 1,8 mm). Metoda nebyla testována na jiném vzorku.

Hodnocení a doporučení na základě publikovaných studií

Zatím nebyly publikovány další studie s odpovídajícími ukazateli spolehlivosti, metodu tedy nelze relevantně zhodnotit.

Shrnutí a doporučení k metodám predikce polohy bodu *pronasale*

Jako nejvhodnější metoda určená k predikci polohy bodu *pronasale* se jeví metoda dle Rynn et al. (2010). Byla navržena na základě měření relativně početného a populačně smíšeného vzorku dospělých jedinců. Její spolehlivost vyjádřená jako velikost průměrné difference mezi odhadovanou a skutečnou polohou a její směrodatné odchylky dosahuje nejnižších hodnot, tedy se velmi přibližuje skutečnosti. Spolehlivost metody byla testována na nezávislém vzorku dospělých i nedospělých jedinců s dobrými výsledky. Metoda je velmi praktická, vstupními daty jsou přímé lineární vzdálenosti mezi jednoznačně definovaným a snadno dostupnými kranio-metrickými body. Jsou měřitelné jak přímo na lebce, tak na její fotografii či rentgenovém snímku. Nevýhodou je nutnost zachování distálního konce nosních kostí a předního nosního trnu. V případě lebek s odlomenými nosními kostmi či předním nosním trnem je vhodnou alternativou k odhadu prominence (anteriorní poloha *pronasale*) nosu metoda dle George (1987) a pro odhad vertikální polohy bodu *pronasale* je možno využít tečnu ke dnu nosního otvoru (Gerasimov, 1955, cit. dle Ullrich & Stephan, 2011). Ještě vyšší spolehlivost než metoda dle Rynn et al. (2010) uvádí autoři recentně navržených metod Utsuno et al. (2016) a Tedeschi-Oliviera et al. (2016), jejich metody však zatím nebyly testovány na jiném populačním vzorku.

3.2.2 Poloha a výška rtů

Na testování spolehlivosti predikčních pravidel pro odhad polohy rtů²¹ a jejich výšky jsme se zaměřili v publikaci **Zednikova Mala, P., & Velemínska, J. (2016). Vertical lip position and thickness in facial reconstruction: A validation of commonly used methods for predicting the position and size of lips. *Journal of Forensic Sciences*, 61, 1046–1054** (Příloha B).

O vztazích mezi měkkými tkáněmi rtů a jejich dento-skeletálním podkladem je známo velmi málo (Stephan, 2003). Rty a jejich morfologie jsou oblastí obličeje, při jejíž rekonstrukci se mnohem více opíráme o uměleckou interpretaci (Wilkinson, 2010). Rekonstrukce jejich tvaru a přirozené vzájemné pozice rtů je jedním z nejtěžších úkolů

²¹ V tomto textu je termín „rty“ používán pro označení červené (slizniční) části rtů.

(Titlbachová, 1986). Dle poznatků literatury z oblasti ortodoncie a anatomie (Wilkinson, 2010) je forma rtů ovlivněna typem zubní okluze, typem dentice a typem obličejového profilu (viz obr. 10).

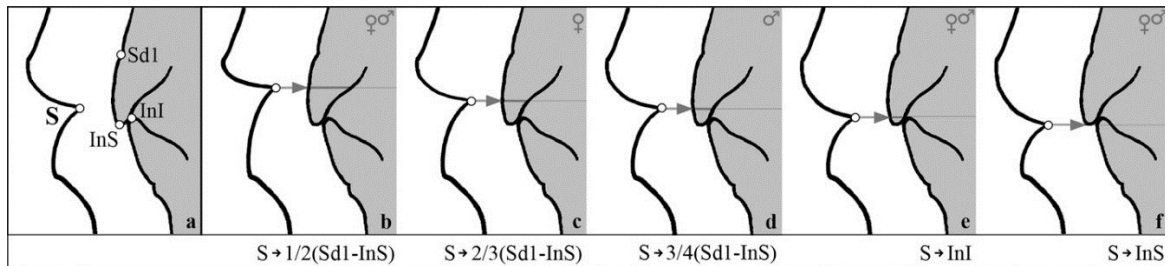
Rty jsou důležitou částí obličeje a jejich správná velikost a poloha ovlivňuje podobnost rekonstruovaného obličeje s cílovým jedincem a jeho rozpoznatelnost. Umístění rtů ovlivňuje proporce dolní poloviny obličeje (výšku kožní části horního a dolního rtu). Správné umístění rtů se jeví být důležitým faktorem pro rozpoznání obličeje, jelikož lidé jsou při vnímání obličeje zvláště citliví ke změně jejich vertikální polohy, zejména směrem nahoru (Haig, 1984; Brooks & Kemp, 2007). V současné době jsou známa predikční pravidla pro šířku rtů (viz tabulka 4), polohu štěrbiny ústní (Lebedinskaya, 1998; George, 1987; Angel, 1987; Fedosyutkin & Nainys, 1993) polohu okrajů rtů (Lebedinskaya, 1998; George, 1987) a výšku rtů (Wilkinson et al., 2003). Aplikací těchto pravidel lze vymezit prostor před předními zuby, ve kterém jsou rty umístěny. Rekonstruovat přesný tvar okrajů červené části rtů a tvar štěrbiny ústní je však obtížné (Wilkinson, 2010), jak dokládají i výzkumy spolehlivosti metody rekonstrukce jako celku (Wilkinson et al., 2006; obr. 27, tabulka 2).

Metody pro predikci polohy a výšky rtů jsou založeny na regresní analýze rozměrů zubů, přímém měření zubů a výpočtu podílu z daného rozměru nebo jednoduché lokalizaci daného antropometrického bodu.

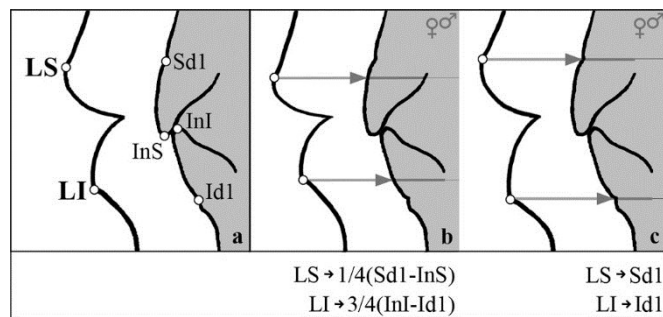
Pro odhad polohy štěrbiny ústní (bod *stomion*) existuje několik predikčních pravidel (Obr. 47). Dle Angela (1978) štěrbina ústní leží v polovině výšky korunky horního mediálního řezáku. George (1987) umísťuje štěrbinu ústní u žen do úrovně $2/3$ a u mužů $3/4$ výšky korunky horního mediálního řezáku. Dle autorů Fedosyutkin & Nainys (1993) a Veselovkaya (2004, osobní sdělení) se štěrbina ústní nachází ve stejné úrovni jako horní hrana dolních mediálních řezáků. Lebedinskaya (1998) uvádí, že se štěrbina ústní promítá do úrovně dolní hrany horních mediálních řezáků.

Pro predikci polohy okraje červené části rtů jsou publikována dvě pravidla (Obr. 48). Dle George (1987) okraj horního rtu odpovídá hranici $1/4$ výšky korunky horního mediálního řezáku a okraj dolního rtu odpovídá hranici $3/4$ výšky korunky dolního mediálního řezáku. Taylor (2001), Veselovskaya (2004, osobní sdělení), Lebedinskaya (1998), Fedosyutkin & Nainys (1993) a Gatliff (1984) naopak uvádí, že výška rtů odpovídá výšce zubních korunek horních a dolních zubů, tedy poloha okraje červené části rtů odpovídá rozhraní skloviny a cementu horních a dolních mediálních řezáků.

Výška rtů je pak odvozena z polohy štěrbiny ústní a polohy okraje červené části rtů. Pouze Wilkinson et al. (2003) vytvořili regresní rovnice pro odhad výšky rtů na základě výšky korunek mediálních řezáků.



Obr. 47. Metody pro odhad polohy štěrbinu ústní (S). (a) – poloha relevantních antropometrických bodů, (b) – metoda dle Angel (1987), (c) – metoda dle George (1987) – predikční pravidlo pro ženy, (d) – metoda dle George (1987) – predikční pravidlo pro muže, (e) – metoda dle Fedosyutkin & Nainys (1993) a Veselovskaya (2004, osobní sdělení), (f) – metoda dle Lebedinskaya (1998). Převzato podle Zednikova Mala & Velemiska (2016).



Obr. 48. Metody pro odhad polohy okraje červené části rtů (LS, LI). (a) – poloha relevantních antropometrických bodů, (b) – metoda dle George (1987), (c) – metoda dle Gatliff, (1984), Fedosyutkin & Nainys (1993), Lebedinskay (1998), Taylor (2001) nebo Veselovskaya (2004, osobní sdělení). Převzato podle Zednikova Mala & Velemiska (2016).

Informace o spolehlivosti jednotlivých metod není v literatuře uvedena. Pouze Wilkinson et al. (2003) na základě porovnání deskriptivních statistik metrického hodnocení výšky zubů a výšky rtů různých studií uvádí, že lze předpokládat neplatnost metody dle Gatliff (1984), a že výška rtů tedy nemusí být shodná se vzdáleností mezi okrajem dásní horních a dolních zubů, tj. výškou korunek předních mediálních řezáků.

První hodnocení spolehlivosti všech výše uvedených metod je prezentováno právě v publikaci Zednikova Mala & Velemiska (2016). Spolehlivost byla hodnocena na základě velikosti průměrné absolutní diference. Dospěli jsme k následujícím výsledkům.

Poloha štěrbiny ústní

Metoda dle George (1987) polohu štěrbiny ústní v průměru mírně nadhodnocovala (ve skutečnosti ležela níže) o 0,6 mm (SD = 1,4 mm; statisticky významný rozdíl). Průměrná absolutní chyba odhadu metody činila 1,3 mm. Ve studovaném vzorku se poloha štěrbiny ústní nelišila mezi pohlavími. Aplikace „mužského“ predikčního pravidla na ženy vedlo ke znatelnému zvýšení spolehlivosti metody dle George (1987) u žen (dosažen statisticky nevýznamný rozdíl -0,2 mm, SD = 1,3 mm, průměrná absolutní chyba odhadu 1,0 mm).

Metoda dle Fedosyutkin & Nainys (1993) a Veselovskaya (2004, osobní sdělení) pracovala s podobnou spolehlivostí jako metoda dle George (1987). Průměrná diference 0,5 mm (SD = 1,9 mm) nebyla statisticky významná. Průměrná absolutní chyba odhadu metody činila 1,6 mm.

Metoda dle Angel (1987) nadhodnocovala polohu štěrbiny ústní (u 99 % jedinců) v průměru o 3 mm (SD = 1,4 mm; statisticky významný rozdíl). Průměrná absolutní chyba odhadu byla rovněž 3 mm. Pouze jedna žena ze zkoumaného vzorku (1 %) měla štěrbinu ústní umístěnou výše než hranici 1/2 výšky korunky horních řezáků.

Metoda dle Lebedinskaya (1998) naopak podhodnocovala (u 94 % jedinců) v průměru o 2,6 mm (SD = 1,5 mm; statisticky významně). Stejných hodnot nabývala i průměrná absolutní chyba (tj. 2,6 mm). Pouze jeden muž (1 %) měl štěrbinu ústní umístěnou níže než úroveň dolní hrany maxilárních řezáků.

Vzhledem k poznatku autorů Brooks & Kemp (2007) chyba predikce dvou výše uvedených metod (Angel, 1987; Lebedinskaya, 1998) přesahuje hraniční hodnotu (2,3 mm), o kterou je posun v poloze rtů již vnímám jako odlišný od skutečnosti.

Hodnocení a doporučení na základě vlastních výsledků:

Metoda dle George (1987), popř. metoda dle Fedosyutkin & Nainys (1993) a Veselovskaya (2004, osobní sdělení), pracovala s nejvyšší spolehlivostí a měla by být k predikci polohy štěrbiny ústní používána přednostně. Další metody dle Angel (1987) a Lebedinskaya (1998) pracovaly s takovou chybou, která již může mít vliv na rozpoznatelnost rekonstruovaného obličeje. Jejich další používání proto nedoporučujeme.

Poloha okraje červené části horního rtu

Poloha okraje červené části horního rtu byla z porovnávaných predikčních pravidel lépe odhadována metodou dle George (1987), hodnotíme-li výsledky testu spolehlivosti pro obě pohlaví dohromady. Tato metoda, která okraj horního rtu umísťuje do úrovně rozhraní první a druhé čtvrtiny výšky korunky, jeho skutečnou polohu statisticky nevýznamně podhodnocovala (oproti skutečnosti ležel okraj rtu níže). Průměrná diference činila -0,5 mm (SD = 1,9 mm). Průměrná absolutní chyba odhadu byla 1,7 mm.

Naopak, predikční pravidlo, dle kterého je hranice červeně horního rtu umísťována do úrovně rozhraní skloviny a cementu horních řezáků (Gatliff, 1984; Fedosyutkin & Nainys, 1993; Lebedinskaya, 1998; Taylor, 2001; Veselovskaya, 2004, osobní sdělení), polohu okraje rtu nadhodnocovalo (oproti skutečnosti byl umístěn příliš vysoko) v průměru o 2,3 mm (SD = 1,9 mm) s průměrnou absolutní chybou odhadu 2,5 mm. U 83 % jedinců zkoumaného vzorku byl okraj červeně horního rtu umístěn níže než horní okraj korunky zubů.

Při analýze výsledků pro obě pohlaví zvláště byla však u žen velikost chyby obou metod srovnatelná (průměrná diference -1,5 mm resp. 1,3 mm; průměrná absolutní chyba odhadu 1,8 mm resp. 1,5 mm), u metody dle Lebedinskaya (1998) a dalších autorů²² byla dokonce nižší. Tyto výsledky odráží charakter zkoumaného vzorku, ve kterém měly ženy statisticky významně vyšší horní ret než muži.

Hodnocení a doporučení na základě vlastních výsledků:

Pro odhad polohy okraje červené části horního rtu se jako spolehlivější ukázala metoda dle George (1987), zejména u mužů. U žen (v 89 %) ležela hranice červeně rtu výše než v úrovni rozhraní první a druhé čtvrtiny výšky korunky předních maxilárních řezáků, avšak většinou (v 80 %) níže než úroveň horního okraje korunky zubů.

Poloha okraje červené části dolního rtu

Metoda dle George (1987) polohu okraje dolního rtu nadhodnocovala v průměru o 2 mm (SD = 2,8 mm; statisticky významný rozdíl), průměrná absolutní chyba odhadu činila 2,8 mm. Ve skutečnosti se okraj rtu nacházel u 69 % mužů a 80 % žen níže, než je úroveň rozhraní třetí a čtvrté čtvrtiny výšky korunky mandibulárních řezáků.

Poloha okraje červeně dolního rtu odhadovaná použitím metody dle Lebedinskaya (1998) a dalších se v průměru nelišila od skutečnosti. Průměrná diference -0,4 mm (SD =

²² Gatliff (1984), Fedosyutkin & Nainys (1993), Taylor (2001), Veselovskaya (2004, osobní sdělení).

2,8 mm) nebyla statisticky významná, avšak průměrná absolutní chyba odhadu byla poměrně vysoká, a to 2,3 mm.

Výsledky se nezměnily ani při analýze provedené pro obě pohlaví zvlášť.

Hodnocení a doporučení na základě vlastních výsledků:

Pro odhad polohy okraje červené části dolního rtu se jako spolehlivější pro obě pohlaví ukázala metoda dle Gatliff (1984), Fedosyutkin & Nainys (1993), Lebedinskaya (1998), Taylor (2001), Veselovskaya (2004, osobní sdělení), tedy že okraj rtu odpovídá úrovni dolního okraje korunky mandibulárních mediálních řezáků. Toto predikční pravidlo proto doporučujeme používat přednostně.

Výška červeně horního rtu

Hodnoceno pro obě pohlaví dohromady, rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou výškou červené části horního rtu byl u všech testovaných metod statisticky významný, všechny metody s výjimkou postupu dle George (1987) výšku rtu nadhodnocovaly.

Metoda dle Wilkinson et al. (2003) výšku horního rtu odhadovala s průměrnou absolutní chybou odhadu 1,3 mm, která představovala 21 % průměrné výšky rtu.

Metoda dle George (1987) pracovala s průměrnou absolutní chybou 1,7 mm (27 % skutečné výšky horního rtu).

Výška horního rtu rekonstruovaná dle metody Veselovskaya (2004, osobní sdělení) či Fedosyutkin & Nainys (1993) byla odhadnuta s průměrnou absolutní chybou 2,3 mm (37 % skutečné výšky rtu).

Nejhůře výšku horního rtu odhadovala metoda dle Lebedinskaya (1998) s průměrnou absolutní chybou téměř 5 mm, což představuje 78 % průměrné skutečné výšky horního rtu.

Hodnoceno pro obě pohlaví zvlášť nejnižší průměrnou absolutní chybu odhadu u žen (0,9 mm, 13 % výšky rtu) vykazovala metoda dle Wilkinson et al. (2003), u mužů pak metoda dle George (1987) s chybou 1,1 mm (19 % výšky rtu).

Hodnocení a doporučení na základě vlastních výsledků:

U mužů se pro odhad výšky horního rtu jako nejspolehlivější ukázala metoda dle George (1987), u žen metoda dle Wilkinson et al. (2003). Pokud nebudeme rozlišovat mezi pohlavími, pak nejvyšší spolehlivost vykazovala regresní rovnice dle Wilkinson et al. (2003).

Výška červeně dolního rtu

Hodnoceno pro obě pohlaví dohromady, rozdíl mezi odhadovanou a skutečnou výškou červené části dolního rtu byl kromě metody dle Wilkinson et al. (2003) u všech ostatních testovaných metod statisticky významný, dvě metody výšku rtu nadhodnocovaly (Wilkinson et al, 2003; Veselovskaya, 2004 osobní sdělení) a dvě podhodnocovaly (George, 1987; Lebedinskaya, 1998).

Regresní rovnice pro odhad výšky dolního rtu dle Wilkinson et al. (2003) pracovala s průměrnou absolutní chybou odhadu 1,8 mm, což představovalo 20 % skutečné průměrné výšky rtu.

S použitím metody dle Veselovskaya (2004, osobní sdělení) či Fedosyutkin & Nainys (1993) bylo dosaženo průměrné absolutní chyby odhadu 2 mm (23 % výšky rtu).

Metoda dle George (1987) pracovala s průměrnou absolutní chybou odhadu 2,4 mm (27 % výšky rtu).

Metoda dle Lebedinskaya (1998) odhadovala výšku dolního rtu s průměrnou absolutní chybou odhadu 2,9 mm (33 % výšky rtu).

Hodnoceno pro obě pohlaví zvlášť nejnižší průměrnou absolutní chybu odhadu jak u mužů (1,8 mm, 21 % výšky rtu), tak u žen (1,7 mm, 18 % výšky rtu) vykazovala metoda dle Wilkinson et al. (2003).

Hodnocení a doporučení na základě vlastních výsledků:

S nejvyšší spolehlivostí pro odhad výšky červené části dolního rtu pracovala metoda dle Wilkinson et al. (2003). Používání jimi navržené regresní rovnice proto doporučujeme.

Shrnutí a doporučení k metodám predikce polohy a výšky červeně rtů

- Umístění štěrbiny ústní ve zkoumaném vzorku se nelišilo mezi pohlavími.
- V 99 % případů byla štěrbina ústní umístěna nad kousací hranou horních řezáků.
- Nejspolehlivější metoda pro odhad polohy štěrbiny ústní se ukázala metoda dle George (1987), pravidlo navržené pro muže, tj. poloha štěrbiny ústní odpovídá úrovni 3/4 výšky korunky horních mediálních řezáků. Toto pravidlo bylo vhodnější k predikci polohy štěrbiny ústní i u žen.
- V případě *post mortem* chybějících horních řezáků pak může být pro odhad polohy štěrbiny ústní využito pravidlo dle Fedosyutkin & Nainys (1993) a Veselovskaya (2004, osobní sdělení), tj. poloha štěrbiny ústní odpovídá úrovni kousací hrany dolních mediálních řezáků.

- Nejspolehlivější odhad polohy okraje červené části horního rtu u mužů poskytovala metoda dle George (1987), tj. hranice horního rtu leží v úrovni rozhraní první a druhé čtvrtiny výšky korunky předních maxilárních řezáků. U žen hranice horního rtu ležela ještě výše, avšak ve většině případů (80 %) nepřekročila úroveň horního okraje korunky maxilárních řezáků.
- Pro odhad polohy hranice červené části dolního rtu se ukázala jako nejspolehlivější metoda dle Veselovskaya (2004, osobní sdělení), Fedosyutkin & Nainys (1993), Lebedinskaya (1998), Gatliff (1984) nebo Taylor (2001), tj. ve většině případů odpovídala úrovni dolního okraje korunky mandibulárních řezáků, zejména u žen. U mužů byla umístěna trochu výše, většinou však ne více než je hranice dolní 1/4 výšky korunky mandibulárního řezáku.
- Výška horního rtu byla ve všech případech nižší než výška korunky horního mediálního řezáku.
- Pro odhad výšky horního a dolního rtu u žen byly nejspolehlivější výsledky dosaženy s použitím regresních rovnic dle autorů Wilkinson et al. (2003).
- Pro odhad výšky horního rtu u mužů byly nejspolehlivější výsledky dosaženy s použitím metody dle George (1987), tj. výška horního rtu odpovídá polovině výšky korunky horního mediálního řezáku (vzdálenost mezi hranicemi 1/4 a 3/4 výšky korunky). Výška dolního rtu u mužů byla nejlépe odhadnuta použitím regresní rovnice dle Wilkinson et al. (2003) nebo jako vzdálenost mezi hranicemi 3/4 výšky korunky horního mediálního řezáku (*stomion* dle George, 1987) a dolním okrajem korunky dolního mediálního řezáku (*labrale inferius* dle Lebedinskaya, 1998) měřeno na zubech při skusu.

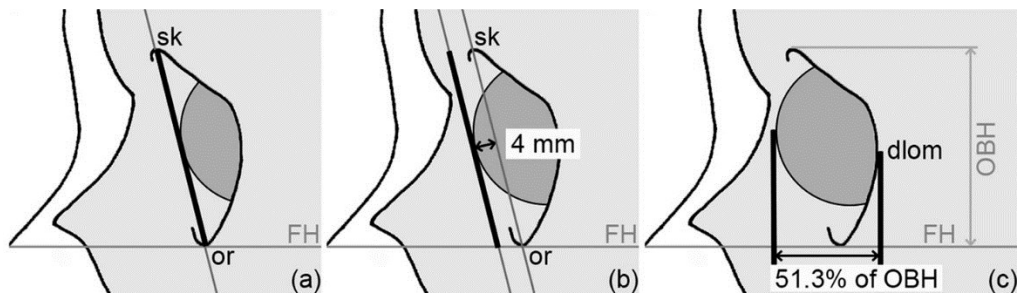
3.2.3 Poloha oční koule v očnici

Hodnocení spolehlivosti tradičních i nově navržených predikčních pravidel pro odhad polohy oční koule v očnici v sagitální rovině (superio-inferiorní směr a antero-posteriorní směr) byla předmětem publikace Zednikova Mala, P., & Velemínska, J. (2018). **Eyeball position in facial approximation: Accuracy of methods for predicting globe positioning in lateral view.** *Journal of Forensic Sciences*, 63, 221–226 (Příloha C).

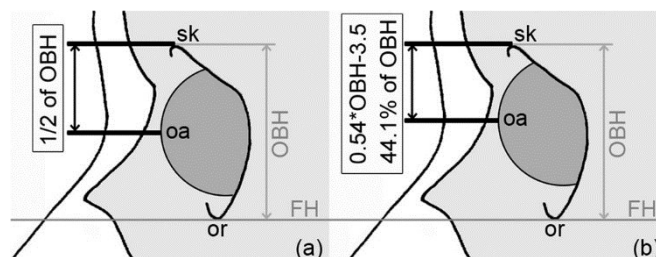
Jedním z prvních kroků při vytváření rekonstrukce přibližné podoby podle lebky je umístění oční koule v očnici. Její správná poloha společně s morfologickými a strukturálními charakteristikami celého regionu očí hraje důležitou roli při rozpoznání obličeje. Lidé jsou při vnímání a rozpoznávání obličeje velmi citliví na změnu v umístění očí v superio-

inferiorním (SI) směru či medio-laterálním směru (Haig, 1984; Brooks & Kemp, 2007). Vystouplost oční koule z očníce (poloha v antero-posteriorním směru, AP) vzhledem k okrajům očníce pak ovlivňuje morfologii očních víček a celkový dojem hluboko posazených nebo vypouklých očí.

Predikční pravidla pro odhad polohy oční koule v očníci (Obr. 49 a 50) byla předmětem výzkumu několika autorů (Stephan, 2002a; Wilkinson & Mautner, 2003; Stephan & Davidson, 2008; Stephan et al., 2009; Guyomarc'h et al., 2012). Výsledky jejich studií naznačují neplatnost některých pravidel označovaných jako tradiční. Podle těchto tradičních pravidel je oční koule z frontálního pohledu umístěna ve středu orbity, tj. střed zornice nebo vrchol rohovky koresponduje se středem výšky a šířky očníce, a v antero-posteriorním (AP) směru se rohovka dotýká tečny středů horního a dolního okraje očníce (Gatliff, 1984; Fedosyutkin & Nainys, 1993; Lebedinskaya, 1998; Taylor, 2001).



Obr. 49. Schéma metod pro predikci antero-posteriorní polohy oční koule v očníci. (a) – metoda „tečny k rohovce“ (např. Lebedinskaya, 1998), (b) – metoda „tečny k duhovce“ (např. Wilkinson & Mautner, 2003), (c) – proporcionální metoda dle Guyomarc'h et al. (2012). Převzato podle Zednikova Mala & Velemínska (2018).



Obr. 50. Schéma metod pro predikci polohy oční koule podél superio-inferiorní osy. (a) – metoda „centrální polohy“ (Gatliff, 1984, Fedosyutkin & Nainys, 1993, Lebedinskaya, 1998, Taylor, 2001), (b) – regresní a proporcionální metoda dle Guyomarc'h et al. (2012). Převzato podle Zednikova Mala & Velemínska (2018).

Pravidlo „centrální polohy“ oční koule v očníci bylo na základě měření 13 mrtvol (Stephan & Davidson, 2008; Stephan et al., 2009) a analýzy CT skenů 375 živých jedinců (Guyomarc'h et al., 2012) vyhodnoceno jako nespolehlivé. Stephan a spoluautoři uvádí, že střed duhovky/zornice nekoresponduje se středem očníce, ale je posunut superiorně o 1,4 mm a laterálně o 2,3 mm. Guyomarc'h et al. (2012) měřením početného vzorku jedinců tuto hodnotu upřesnili na 2 mm superiorně a 3 mm laterálně a pro odhad polohy oční koule v očníci navrhli regresní rovnice a proporcionální (podíl z výšky očníce) rovnice se standardní chybou odhadu (SEE) 1,4 mm.

Platnost pravidla „tečny k rohovce“ pro umístění oční koule v antero-posteriorním směru byla zpochybněna Stephanem (2002) na základě rešerše oftalmologických studií, následně rovněž měřením 13 mrtvol (Stephan & Davidson, 2008; Stephan et al., 2009), měřením MRI skenů 39 žijících jedinců (Wilkinson & Mautner, 2003) a CT skenů 375 živých jedinců (Guyomarc'h et al., 2012). Autoři Wilkinson & Mautner (2003) potvrdili platnost tvrzení autorů Fedosyutkin & Nainys (1993) o existenci vzájemného vztahu mezi vystouplostí oční koule z očníce a hloubkou očníce a navrhli regresní rovnici pro výpočet protruse oční koule. Vzhledem k nepraktičnosti navržené rovnice pro použití při rekonstrukci podoby autoři svá zjištění upravili. Spojnice středů horního a dolního okraje očníce se podle nich nedotýká oční rohovky, nýbrž duhovky, tedy oční koule vystupuje dopředu za tuto linii o 3,8 mm (Wilkinson & Mautner, 2003). Toto pravidlo jsme označili jako pravidlo „tečny k duhovce“ a je ve shodě s tvrzením Veselovskaya (2004, osobní sdělení), že vrchol rohovky vystupuje přibližně 4 mm před spojnicí nejvýše a nejnižšího umístěného bodu na obrysu očníce z laterálního pohledu. Autoři (Wilkinson & Mautner, 2003; Veselovskaya, 2004, osobní sdělení) neuvádí chybu predikce a spolehlivost tohoto pravidla nebyla testována. Nejaktuálněji anteriorní polohu oční koule hodnotili Guyomarc'h et al. (2012). Jimi navržené regresní a proporcionální (podíl z výšky očníce) rovnice odhadují protrusi oční koule se standardní chybou (SEE) 2,1–2,3 mm. Autoři však neuvádí, na jakém vzorku či jako metodu použili ke stanovení jimi prezentovaných hodnot SEE.

Ačkoliv v naší studii (Zednikova Mala & Velemínska, 2018) nebylo vzhledem k povaze zkoumaného materiálu možno testovat spolehlivost predikčních pravidel pro medio-laterální polohu oční koule, tato studie představuje první hodnocení spolehlivosti recentně navržených metod pro predikci protruse (Wilkinson & Mautner, 2003; Veselovskaya, 2004, osobní sdělení; Guyomarc'h et al., 2012) a superio-inferiorní polohy (Guyomarc'h et al., 2012) oční koule v očníci.

Protruse oční koule

Metoda dle Guyomarc'h et al. (2012) pracovala s průměrná diferencí 0,3 mm (SD = 1,9 mm; statisticky nevýznamný rozdíl) a SEE = 1,9 mm, která představovala necelých 11 % skutečné průměrné protruse oční koule měřeno od laterálního okraje očníce. Odhad s chybou predikce $\leq 5\%$ byl učiněn u téměř poloviny jedinců studovaného vzorku.

Metoda „tečny k duhovce“ (Wilkinson & Mautner, 2003; Veselovskaya, 2004, osobní sdělení) polohu oční koule podhodnocovala v průměru o 1,5 mm (SD = 1,8 mm; statisticky významný rozdíl) se SEE = 2,4 mm (14 % skutečné průměrné protruse). Odhad s chybou predikce $\leq 5\%$ byl učiněn u třetiny jedinců, u 81 % jedinců oční koule vystupovala za tangentu více než 4 mm.

Tradiční metoda „tečny k rohovce“ (Lebedinskaya, 1998) polohu oční koule podhodnocovala v průměru o 5 mm (SD = 1,8 mm; statisticky významný rozdíl). SEE činila 5,8 mm (34 % skutečné průměrné protruse). Pouze v 1 % případů byla poloha oční koule predikována s chybou $\leq 5\%$.

Hodnocení a doporučení na vlastních výsledků:

Anterio-posteriorní poloha oční koule byla nejspolehlivěji odhadována metodou „proporce výšky očníce“ dle autorů Guyomarc'h et al. (2012) a měla by být využívána přednostně. Podmínkou její správné aplikace je nastavení lebky dle frankfurtské horizontály, které je nezbytné k získání vstupních rozměrů projektivní výšky a šířky očníce.

Vertikální poloha oční koule

Ačkoliv i v našem vzorku střed duhovky neodpovídal přesně středu očníce a byl posunut superiorním směrem, tato divergence byla v průměru pouze 0,3 mm (SD = 1,1 mm; statisticky významný rozdíl). SEE byla rovna 0,3 mm. Poloha oční koule byla odhadnuta s chybou predikce $\leq 5\%$ u 100 % jedinců.

Nově navržené regresní a proporcionální rovnice autorů Guyomarc'h et al. (2012) vertikální polohu oční koule nadhodnocovaly v průměru o 1,8 mm (SD = 1,2 mm; statisticky významný rozdíl). SEE obou rovnic činila 2,1 mm a představovala 12 % skutečné průměrné vzdálenosti vrcholu rohovky od horního okraje očníce. Predikce s chybou $\leq 5\%$ byla učiněna u pětiny zkoumaného vzorku.

Přestože byly průměrné difference obou porovnávaných metod statisticky významné a SEE dosahovala až 2,1 mm, tato chyba predikce by nemusela mít vliv na správnou rozpoznatelnost rekonstruovaného obličeje. Dle Brooks & Kemp (2007) je hraniční

hodnota, o kterou je posun očí v superio-inferiorním směru pozorovateli vnímám jako rozdílný od skutečnosti, rovna 3 mm u neznámých obličejů a 2,5 mm u známých obličejů.

Hodnocení a doporučení na základě vlastních výsledků a publikovaných studií:

Vertikální poloha oční koule byla s nejmenší chybou odhadována pomocí metody „centrální polohy“ (např. Taylor, 2001), tj. že střed zornice odpovídá středu výšky očnice. Ačkoliv byly pro námi studovaný vzorek výsledky jednoznačné a výskyt centrální polohy oční koule není zcela ojedinělý ani v jiných případech (Stephan et al., 2009), je nutno zohlednit výsledky dalších výzkumů, zejména studie Guyomarc'h et al. (2012), která byla provedena na pětinasobně rozsáhlejší vzorku, a má tak větší váhu. I v námi studovaném vzorku byla zjištěna jistá míra divergence od středu očnice superiorním směrem, proto bychom doporučili použití proporcionální rovnice dle Guyomarc'h et al. (2012), pokud budoucí výzkumy nepřinesou jiná zjištění.

Shrnutí a doporučení k metodám predikce polohy oční koule v očnici

Na základě vlastních výsledků a při zohlednění výsledků jiných autorů doporučujeme pro odhad AP a SI polohy oční koule metodu navrženou autory Guyomarc'h et al. (2012).

3.3 Vztah skeletálního a měkkého profilu obličeje

Spolehlivost, s jakou je možné odhadovat morfologii a proporce obličeje na základě lebky, je v oblasti rekonstrukce podoby často diskutovaným tématem, jak dokládá dosavadní text disertační práce a výše prezentované publikace. Metodě faciální aproximace je vytýkána nízká spolehlivost a v některých případech neschopnost dosáhnout svého cíle (Stephan & Henneberg, 2001). V současnosti je značné úsilí vědců věnováno snaze o její zvýšení ve smyslu ověřování platnosti dříve popisovaných kraniofaciálních vztahů a hledání vztahů nových, to vše s cílem zvýšit podobnost mezi rekonstruovaným obličejem a obličejem cílového jedince. Jaká očekávání však můžeme mít? Jak těsné jsou vztahy mezi lebkou a obličejem? Do jaké míry lze skutečně tvar měkkých tkání odvodit z tvaru kostí?

V publikaci **Zedníková Malá, P., Krajíček, V., & Velemínská, J. (2018). How tight is the relationship between the skeletal and soft-tissue facial profile: A geometric morphometric analysis of the facial outline. *Forensic Science International*, 292, 212–223** (Příloha D), jsme se pokusili zjistit, do jaké míry a jakým způsobem tvar lebky determinuje tvar měkkých tkání obličeje. Využili jsme k tomu postupy regresní analýzy (Halazonetis, 2007), partial least square analýzy (Rohlf & Corti, 2000) a RV koeficient (Klingenberg, 2009).

Znalost kraniofaciálních vztahů je základním pilířem metody rekonstrukce přibližné podoby člověka podle lebky. Mapování korelací mezi lineárními rozměry či úhly vybraných lebečních regionů a jejich prediktivního potenciálu pro odhad velikosti či polohy jednotlivých prvků obličeje byla předmětem výzkumu mnoha autorů (např. George, 1987; Perkins & Stanley, 1993; Stephan, 2003; Stephan et al., 2003; Wilkinson & Mautner, 2003; Wilkinson et al., 2003; Yasutomi et al., 2006; Utsuno et al., 2008; Inanda et al., 2009; Rynn et al., 2010; Bourzgui et al., 2013; Lee et al., 2015; Allam et al., 2018; Ridet et al., 2018; a další). Jejich výsledky jsou pak při vytváření rekonstrukcí podoby aplikovány jako predikční pravidla nebo mohou být v ortodoncii či plastické chirurgii využity k plánování lékařských zásahů. Ve většině těchto výzkumů byly předmětem analýzy vzdálenosti, úhly či indexy, tedy byly využity postupy tradiční morfometrie. Ty mohou být v některých případech dostačující k popisu jednoduchých kraniofaciálních vztahů. Obtížně však popisují či predikují tvar biologických struktur zejména tak složitých, jako je lidský obličej.

Detailní a ucelený popis a analýzu variability tvaru umožňuje přístup geometrického morfometrie. Geometrická morfometrie je soubor metod, kterými lze získávat, analyzovat a zobrazovat tvarové proměnné. Jde o kombinaci technik geometrie, počítačové grafiky, biometrie a mnohorozměrné statistiky za účelem analýzy biologického tvaru (Bookstein, 1991). Vstupními daty jsou kartézské souřadnice význačných bodů (landmarků).

Geometricko-morfometrické metody postihují tvary a jejich rozdíly na základě vzájemných poloh těchto bodů pomocí tvarových proměnných a umožňují efektivní vizuální reprezentaci tvaru a jeho změn (Slice, 2007; Mitteroecker & Gunz, 2009). Geometrická morfometrie byla využita ke studiu tvarové kovariance mezi lebkou a obličejem a k odhadu tvaru samostatných obličejových regionů, profilu obličeje či celého povrchu obličeje v několika málo publikovaných výzkumech (Rose et al., 2003; Halazonetis, 2007; Kustár et al., 2013; Guyomarc'h et al., 2014; Deng et al., 2016; Young et al., 2016).

Halazonetis studoval vzájemnou korelaci mezi 19 kraniálními landmarky a 22 význačnými body na profilu obličeje. Jím zjištěná celková prediktivní síla vypočítaná na základě regresní analýzy hlavních komponent činila 50 %²³. Kustár et al. (2013) studovali CT skeny 400 pacientů a hodnotili kovarianci mezi kosterními landmarky umístěnými v okolí očních, nosního otvoru a dolního okraje dolní čelisti (celkem 37) a landmarky na obličejí umístěnými na zevním nose a podél kontury celého obličeje (celkem 30). Jím zjištěná kovariance vyjádřená pomocí RV koeficientu (Klingenberg, 2009) činila 0,56. Guyomarc'h et al. (2014) zkoumali CT skeny 500 jedinců. Polohu a tvar očí, nosu, rtů a uší (celkem 41 landmarků) odhadovali z konfigurace celkem 87 kraniálních význačných bodů. Jím nalezená maximální kovariance (RV koeficient) dosáhla hodnoty 0,3. Young et al. (2016) našli vysoce významnou kovarianci (RV = 0,56) mezi 29 landmarky umístěnými zejména v okolí hlavních obličejových prvků a 114 kosterními landmarky na povrchu lebky.

Autoři výše uvedených studií hledali kovarianci mezi dvěma více či méně hustými mraky bodů. Při použití landmarků však musíme brát v úvahu některá jejich omezení. Hlavním nedostatkem je absence informace o oblastech ležících mezi nimi. Analyzujeme vzájemnou polohu landmarků a pouze pro ně jsou výsledky analýzy platné. Jakékoliv závěry týkající se oblastí, které leží mezi význačnými body, jsou pouze odhadem (Brzobohatá, 2014; Richtsmeier et al., 2002). Tuto nevýhodu jsme se pokusili eliminovat a na rozdíl od výše citovaných studií jsme v pro náš případ zvolili analýzu křivek. Naší snahou bylo postihnout a zachovat detailní informaci o „kontinuálním“ tvaru jak na straně lebky, tak na straně měkkých tkání obličeje, a následně popsat a kvantifikovat vzájemnou kovarianci mezi těmito dvěma tvary. Díky křivkami detailněji popsanému tvaru jsme očekávali vyšší hodnoty vzájemné kovariance, než uvádí citované studie.

²³ Prediktivní síla vyjádřená v procentech dle Halazonetis (2007) odpovídá hodnotě, o kterou jsme schopni zlepšit průměrný tvar měkké tkáně (obličeje) směrem k jejímu skutečnému tvaru na základě znalosti tvaru tvrdé tkáně (lebky).

Souhrn výsledků

Profilovou křivku obličeje a lebky jsme rozdělili do několika kratších úseků: oblast čela, oblast kořene nosu, oblast hřbetu a hrotu nosu, oblast horního rtu, oblast dolního rtu a brady. Výsledky statistické analýzy jsou shrnuty v tabulce 7 a obrázcích 51–56.

Výsledky mnohonásobné lineární regrese (Halazonetis, 2007) uvádí prediktivní sílu jednotlivých částí profilové kontury lebky, tj. kolik procent variability tvaru „měkké tkáně“²⁴ je dáno tvarem „tvrdé tkáně“, neboli o kolik procent jsme schopni zlepšit průměrný tvar „měkké tkáně“ směrem k jejímu skutečnému tvaru na základě znalosti tvaru „tvrdé tkáně“. Výstupem partial least square analýzy (Rohlf & Corti, 2000; Bastir et al., 2008; Klingenberg, 2009) jsou PLS komponenty (singulární warpy, obdoba hlavních komponent) ze kterých lze odvodit podíl (%) kovariance mezi dvěma tvary, a korelační koeficienty, které vyjadřují sílu vzájemné korespondence PLS komponent dvou tvarů. RV koeficient (Klingenberg, 2009) číselně vyjadřuje míru síly asociace (kovarianci) mezi dvěma sadami landmarků a nabývá hodnot 0 (žádná vzájemná kovariance) až 1 (dvě sady proměnných se liší pouze rotací, velikostí či polohou).

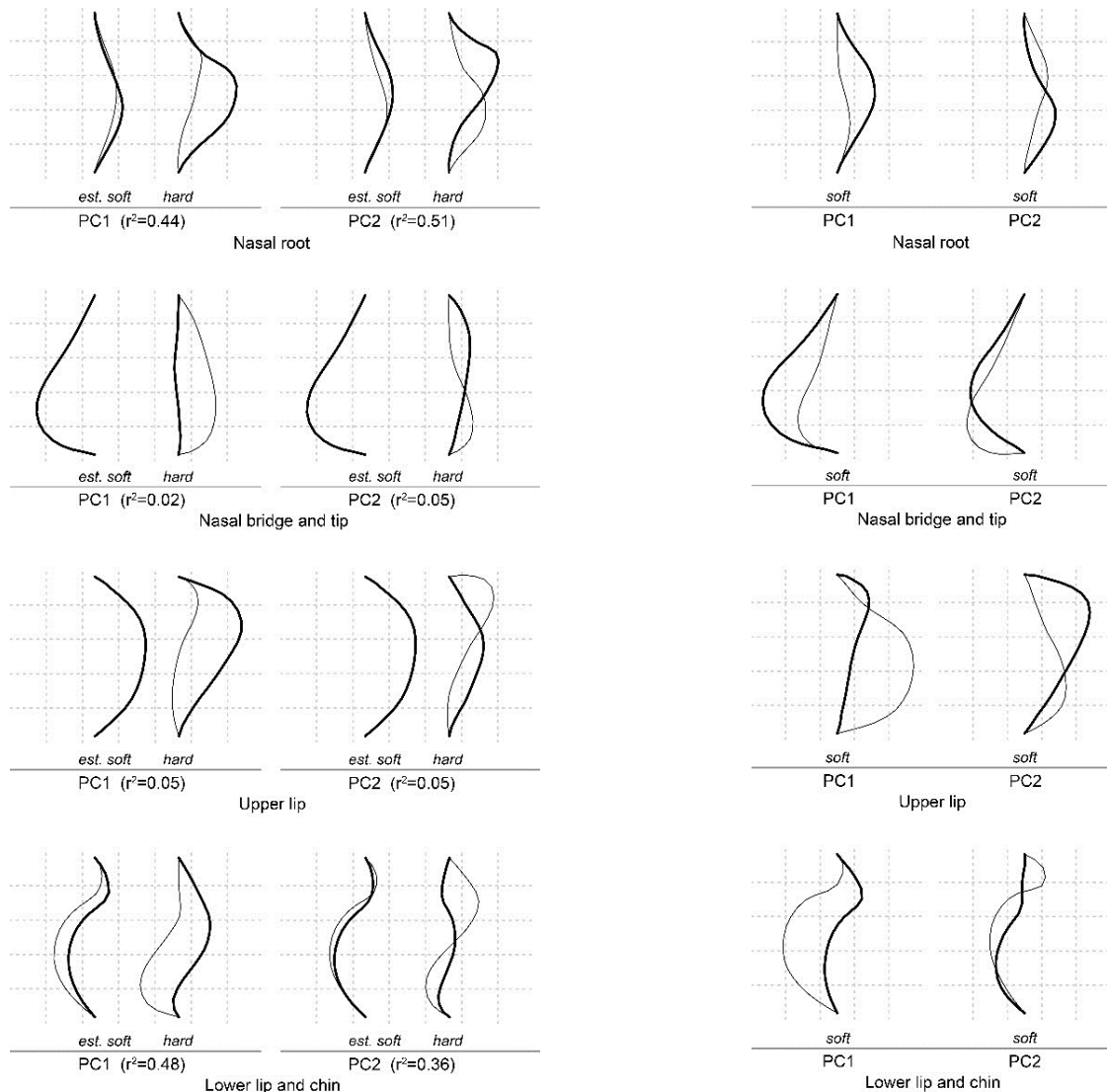
Tabulka 7. Výsledky statistické analýzy všech navzájem korespondujících úseků profilové křivky lebky a obličeje.

Část profilové křivky	Mnohonásobná lineární regrese Halazonetis (2007)	Two block-partial least square analýza Bastir et al. (2008), Klingenberg (2009)				RV koeficient Klingenberg (2009)
		<i>separate subset</i>				
		PLS1		PLS2		
		% celkové kovar.	korelace	% celkové kovar.	korelace	
Čelo	95,1 %	99,6	0,96	0,42*	0,72	0,91
Kořen nosu	40,2 %	65,6	0,72	34,3	0,58	0,42
Hřbet a hrot nosu	5,8 %	97,8*	0,26*	1,6*	0,19*	0,05*
Horní ret	9,6 %	99,1	0,43	0,4*	0,1*	0,14
Dolní ret a brada	37,3 %	95,1	0,65	4,6	0,57	0,41

*Statisticky nevýznamné.

²⁴ „Měkká tkáň“ označuje profilovou konturu obličeje, „tvrdá tkáň“ označuje profilovou konturu lebky.

Variabilita tvaru jednotlivých křivek tvrdé a měkké tkáně je znázorněna prostřednictvím prvních dvou hlavního komponent (PC) na obrázku 51 a 52.



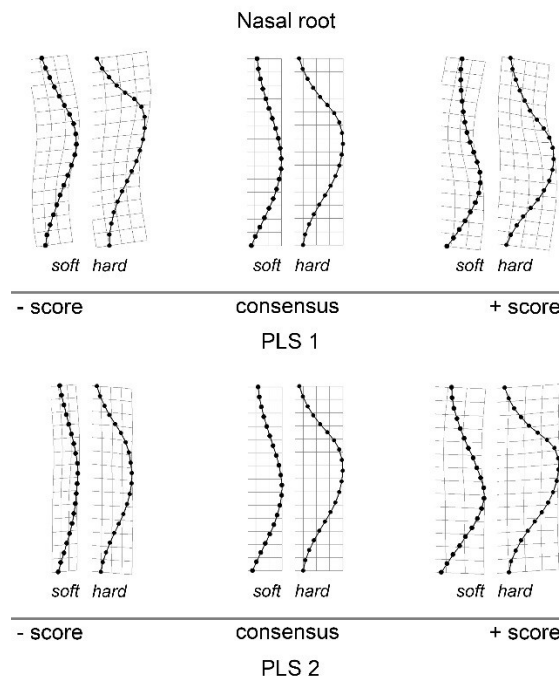
Obr. 51. Vizualizace prediktivní síly kontury kosti pro jednotlivé úseky profilové křivky. Tvary tvrdé tkáně (*hard*) jako prediktory (generované jako $\pm 3sd$ hodnot PC skóre) a odhadované tvary měkké tkáně (*est. soft*). Tučná linie odpovídá $+3sd$, tenká linie odpovídá $-3sd$ hodnot PC skóre. V případě hřbetu a hrotu nosu a horního rtu nebylo možné odhad tvaru měkké tkáně modelovat, obě linie $\pm 3sd$ se překrývají v podobě průměrného tvaru (konsenzu). Převzato podle Zedníková Malá et al. (2018).

Obr. 52. Variabilita tvaru křivek měkké tkáně popsána prvními dvěma PC. Tučná linie odpovídá $+3sd$, tenká linie odpovídá $-3sd$ hodnot PC skóre. Převzato podle Zedníková Malá et al. (2018).

Oblast čela

Asociace mezi křivkou kontury čelní kosti a přiléhajících měkkých tkání reprezentovala maximální úroveň kovariance mezi tvrdými a měkkými tkáněmi analyzované profilové kontury hlavy. Prediktivní síla činila 95 %, RV koeficient 0,91, korelace mezi PLS1 $r = 0,96$.

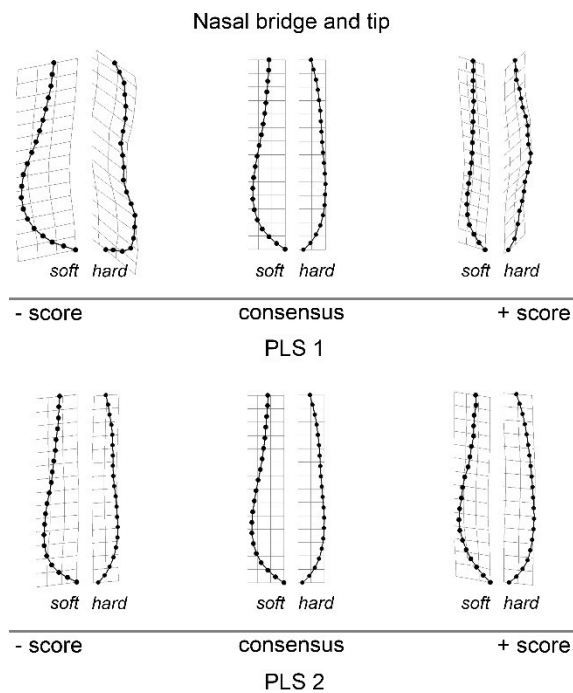
Oblast kořene nosu



Obr. 53. Thin-plate spline znázorňující kovarianci mezi tvarem tvrdé tkáně (křivka vpravo) a tvarem měkké tkáně (křivka vlevo) oblasti kořene nosu. Převzato podle Zedníková Malá et al. (2018).

Tato oblast vykazovala druhou nejvyšší míru asociace mezi tvrdými a měkkými tkáněmi. Prediktivní síla činila 40 %, koeficient determinace (r^2) pro odhad tvaru měkké tkáně byl roven 0,44 pro první hlavní komponentu (PC1) a 0,51 pro PC2 (Obr. 51). Odhadovaný tvar měkké tkáně však stěží obsáhl skutečnou variabilitu tvaru měkké tkáně reprezentovanou prvními dvěma PC (porovnej Obr. 51 a 52). RV koeficient dosáhl hodnoty 0,42. PLS analýza odhalila dvě statisticky významné PLS komponenty (singulární warpy PLS1 a PLS2) vysvětlující 66 % a 34 % celkové kovariance. PLS1 popisuje relativní výšku nejhlubšího bodu fronto-nasálního přechodu. PLS2 popisuje hloubku fronto-nasálního přechodu. Nejhlubší bod fronto-nasálního přechodu na kontuře měkkého profilu leželo níže než na kontuře kosti, což potvrzuje nález George (1993) a může sloužit jako pomůcka při nanášení tloušťky měkké tkáně v bodě *nasion*. Kontura měkké tkáně sledovala tvar kontury kosti. Hlubší kontura kosti znamená hlubší konturu přechodu měkké tkáně čela do oblasti nosu. Velikost tvarové změny však nebyla u obou křivek stejná, měkká tkáň nekopíruje přesný tvar kosti, ale má tendenci výrazný fronto-nasální zářez vyrovnávat. Kontura měkké tkáně byla vždy mělkčí než kontura kosti.

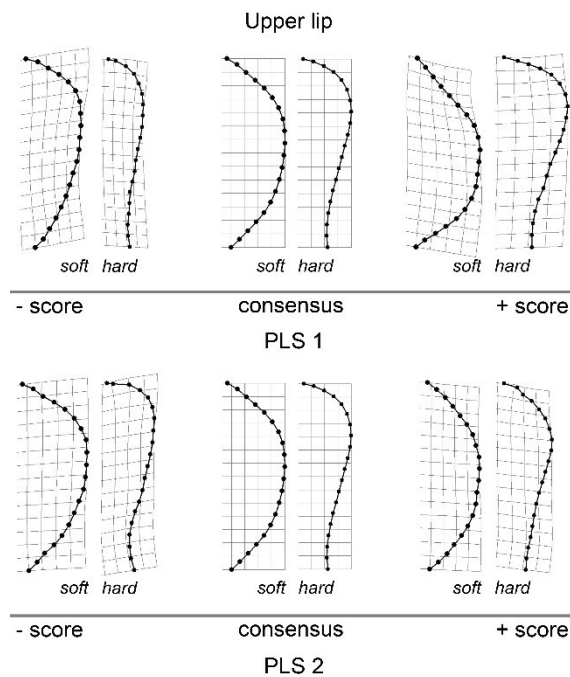
Oblast hřbetu nosu a hrotu nosu



Obr. 54. Thin-plate spline znázorňující kovarianci mezi tvarem tvrdé tkáně (křivka vpravo) a tvarem měkké tkáně (křivka vlevo) oblasti hřbetu a hrotu nosu. Převzato podle Zedníková Malá et al. (2018).

Tato oblast vykazovala nejnižší míru asociace mezi tvrdými a měkkými tkáněmi. Prediktivní síla činila pouhých 6 %, koeficient determinace (r^2) pro odhad tvaru měkké tkáně byl roven 0,02 pro PC1 a 0,05 pro PC2 (Obr. 51), což neumožnilo provést viditelnou modelaci odhadovaného tvaru měkké tkáně (Obr. 51 a 52). RV koeficient dosáhl statisticky nevýznamné hodnoty 0,05. PLS analýza odhalila jednu komponentu (PLS1) na hranici statistické významnosti ($p = 0,0645$) vysvětlující 98 % celkové kovariance mezi tvarem laterálního okraje nosního otvoru a tvarem chrupavčité části nosu. PLS1 popisuje tvarové změny laterálního okraje nosního otvoru ve smyslu konvexní/konkávní střední části a úhlovitého/zakulaceného typu přechodu laterálního okraje a báze (dna) nosního otvoru. Zvlněný (anteriorně konvexní) okraj a zakulacená báze byla spojena s kulatým hrotem nosu. Konkávní okraj a úhlovitá báze byla spojena s rovným profilem hřbetu nosu a malým špičatým hrotem nosu. Tento vztah byl však velmi slabý ($r = 0,26$) a statisticky nevýznamný a nezdá se tedy, že by tvar profilu nosu zrcadlil konturu nosního otvoru, jak předpokládá metoda pro odhad prominence nosu dle Lebedinskaya (1998) a Balueva et al. (2009). Podobný vzor vzájemné korespondence mezi konturou nosního otvoru a konturou profilu nosu však popisují Rynn et al. (2010) jako statisticky významný.

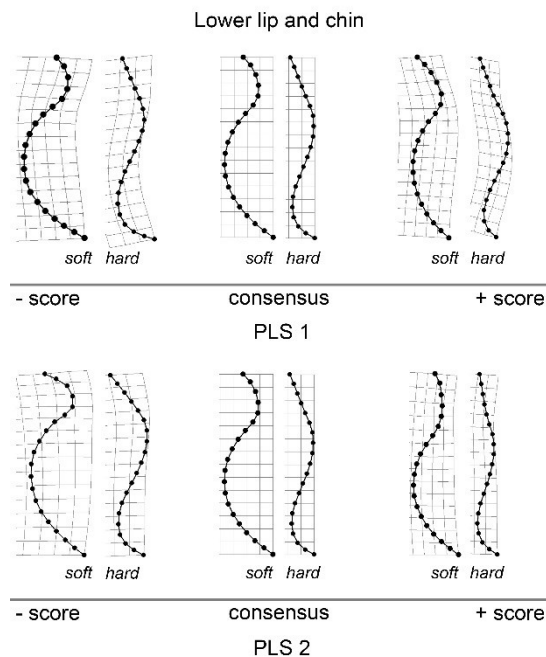
Oblast horního rtu



Obr. 55. Thin-plate spline znázorňující kovarianci mezi tvarem tvrdé tkáně (křivka vpravo) a tvarem měkké tkáně (křivka vlevo) oblasti horního rtu. Převzato podle Zedníková Malá et al. (2018).

Tato oblast vykazovala druhou nejnižší míru asociace mezi tvrdými a měkkými tkáněmi. Prediktivní síla činila 10 %, koeficient determinace (r^2) pro odhad tvaru měkké tkáně byl roven 0,05 pro PC1 i PC2 (Obr. 51), což neumožnilo provést viditelnou modelaci odhadovaného tvaru měkké tkáně (Obr. 51 a 52). RV koeficient dosáhl hodnoty 0,14. PLS analýza odhalila jednu statisticky významnou PLS komponentu (PLS1) vysvětlující 99 % celkové kovariance a $r = 0,42$. PLS1 popisovala změny v hloubce kontury horní čelisti a délce hrany vycházející inferiorně z předního nosního trnu. Měkká tkáň vykazovala podobný vzor tvarových změn jako kost. Kontura horního rtu se pohybovala mezi mělkým/rovným typem a hlubokým/ konkávním typem. Mělká kontura horní čelisti a krátký přední nosní trn byly spojeny s rovným horním rtem a krátkou méně prominující kolumelou. Čím hlubší byla kontura horní čelisti a více prominující přední nosní trn, tím více konkávní a nižší byl horní ret. Měkká tkáň vykazovala tendenci vyhlazovat výrazný reliéf horní čelisti (podobně jako u kořene nosu). Druhá PLS komponenta (PLS2), statisticky nevýznamná, naznačuje možnou korespondenci mezi velikostí úhlu tvořeného hranou vycházející inferiorním směrem z předního nosního trnu a úhlem báze nosu, avšak velmi slabou ($r = 0,1$).

Oblast dolního rtu a brady



Obr. 56. Thin-plate spline znázorňující kovarianci mezi tvarem tvrdé tkáně (křivka vpravo) a tvarem měkké tkáně (křivka vlevo) oblasti dolního rtu. Převzato podle Zedníková Malá et al. (2018).

Tato oblast vykazovala třetí nejvyšší míru asociace mezi tvrdými a měkkými tkáněmi srovnatelnou s oblastí kořene nosu. Prediktivní síla činila 37 %, koeficient determinace (r^2) pro odhad tvaru měkké tkáně byl roven 0,48 pro PC1 a 0,36 pro PC2 (Obr. 51). Odhadovaný tvar měkké tkáně však stěží obsáhl skutečnou variabilitu tvaru měkké tkáně reprezentovanou prvními dvěma PC (porovnej Obr. 51 a 52). RV koeficient dosáhl hodnoty 0,41. PLS analýza odhalila dva statisticky významné singulární warpy PLS1 a PLS2 vysvětlující 95 % a 5 % celkové kovariance ($r = 0,65$ resp. $0,57$). PLS1 popisuje kontinuum mezi prominující (robustní) a ustupující (gracilní) bradovou vyvýšeninou společně s relativní vertikální polohou nejhlubšího bodu (bod B) na kontuře dolní čelisti. Měkká tkáň sledovala podobný vzor, ale nepředstavovala kopii tvaru kontury kosti. Oproti oblasti kořene nosu a horní rtu, v oblasti dolního rtu a brady měkká tkáň zvýrazňovala a prohlubovala vzor tvaru dolní čelisti. Body na lebce (bod B a *pogonion*) byly umístěny níže než na obličeji, což potvrzuje nálezy George (1993) a může být pomůckou pro nanášení tloušťky měkké tkáně. PLS2 popisuje přechod mezi mělkou/plochou konturou a hlubokou konturou dolní čelisti společně s alveolárním prognatismem. Výrazně konkávní kontura dolní čelisti byla spojena s výraznou bradou a hlubokým mento-labiálním žlábkem. Plochá kontura dolní čelisti byla

spojena se spíše plochou bradou a rovným dolním rtem. Sklon dolního rtu byl ovlivněn sklonem prominencí horních řezáků.

Dle Balueva et al. (1988) jsou měkké tkáně variabilnější než jejich kostěný podklad. Je to důsledek především růstové proměnlivosti a konstituční variability, patologických změn i změn závislých na sociálním a přírodním prostředí. Proto nelze očekávat absolutně přesnou shodu velikosti a směru variability kostního podkladu s měkkými tkáněmi, a tudíž korelační koeficient, který odráží zejména počet případů přesné shody charakteristik závislosti dvou proměnných, nemusí být při zkoumání vzájemných vztahů obličeje a lebky příliš vysoký. Znamená to, že v takových případech na podobu tváře člověka usuzovat podle lebky nelze? Nikoliv, jde o to, že i když ve všech antropometrických bodech přísná závislost mezi lebkou a měkkými tkáněmi neexistuje, lebka sama v nějakých mezích ohraničuje, resp. limituje možnosti variability tkání, které ji pokrývají (Balueva et al., 1988).

3.4 Příklady praktické aplikace metody

Zjištěné poznatky byly aplikovány na dva případy faciální rekonstrukce, které jsou prezentovány v publikacích **Klepáček, I., & Malá, P. Z. (2012). "Bochdalek's" skull: morphology report and reconstruction of face. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 8, 451–459 (Příloha E)** a **Vanek, D., Brzobohata, H., Silerova, M., Horak, Z., Nyvltova Fisakova, M., Vasinova Galiova, M., Zednikova Mala, P., Urbanova, V., Dobisikova, M., Beran, M., & Brestovansky, P. (2015). Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave – Case Report. *Anthropology*, 2, 138 (Příloha F).**

První příklad praktické aplikace prezentuje faciální rekonstrukci na základě patologicky pozměněné lebky dívky (18 let) z 18. století, která je součástí depozitáře Anatomického muzea 1. Lékařské fakulty Univerzity Karlovy. Lebka byla poprvé popsána a zdokumentována českým anatomem a patologem V. A. Bochdalkem v roce 1871. Pro tuto lebku je typická oboustranná *syngnathia* bez přítomnosti dalších anatomických anomálií v orální oblasti, vzniklá s vysokou pravděpodobností následkem traumatu v raném věku, a množství přítomných asymetrií vzniklých v důsledku neléčení traumatu. Cílem bylo vizualizovat, jak se morfologické a funkční změny faciálního skeletu mohly odrazit v morfolologii obličeje dívky.

Druhý příklad prezentuje faciální rekonstrukci muže (40–55 let), která byla součástí komplexního interdisciplinárního výzkumu kosterního nálezu. Kosterní ostatky datované do první poloviny 14. století byly odkryty během záchranného archeologického výzkumu V Hrádku nad Nisou v netypickém nálezovém kontextu. Muž ležel v poloze na břicho v mělké jámě pod vrstvou keramiky za zdí původního hřbitova.

Lebky byly podrobeny neinvazivnímu vyšetření pomocí CT, na jehož základě byl vytvořen 3D virtuální model lebky, který byl následně převeden pomocí 3D tisku do její fyzické repliky. Ta sloužila jako podklad pro sochařskou rekonstrukci přibližné podoby. Originály lebek pak mohly být použity jednak jako zpětná kontrola při procesu modelování obličeje a jednak se tímto postupem zamezilo možnému poškození křehkého a vzácného antropologického materiálu.

V obou případech byl k vytvoření přibližné podoby zvolen morfoskopický přístup, konkrétně tzv. Manchesterská metoda (Wilkinson, 2004), která spočívá v modelaci žvýkacích a mimických svalů za současného využití hodnot průměrné tloušťky měkké tkáně. Tyto však slouží pouze jako pomocné vodítko při vytváření povrchu obličeje a lze se od nich v individuálních případech odchýlit. Na respektování anatomie morfologie lebky je kladen větší důraz než na přísné dodržování stanovené tloušťky měkké tkáně. Tento přístup byl

žádoucí zejména v případě rekonstrukce lebky dívky se *syngnathií* vzhledem k předpokládané atrofii žvýkacích svalů. Manchesterská metoda navíc v rekogničních testech spolehlivosti i při hodnocení podobnosti vykazuje relativně dobré výsledky (Stephan & Henneberg, 2001; Wilkinson et al., 2006; Lee et al., 2012; Short et al., 2014).

Při samotném odhadu charakteristik jednotlivých prvků obličeje (oči, nos, ústa) jsme zvolili přístup spíše eklektický než následování jednoho komplexního postupu definovaného jedním autorem (např. dle Wilkinson, 2004; Taylor, 2001; nebo Lebedinskaya, 1998). To nám umožnilo vybrat ta predikční pravidla, která byla pokud možno aktuální a jejichž spolehlivost byla ověřena, a zároveň ta, která nejlépe vyhovovala danému stavu zachovalosti lebky. Současně byl kladen důraz na individuální morfologii jednotlivých částí splanchnokrania, zejména s ohledem na přítomné asymetrie, které je nezbytné respektovat, chceme-li dosáhnout jisté individualizace podoby. Konkrétní použité metody jsou popsány v jednotlivých publikacích. Výsledkem jejich aplikace je typ obličeje, který mohl patřit dané osobě, věkově odpovídající mladé dospělosti. V následující fázi bylo potřeba provést úpravy reprezentující věkové změny, což již zahrnuje značnou subjektivní interpretaci. Při rekonstrukci detailů obličeje dívky se *syngnathií* jsme čerpali také z publikovaných klinických studií prezentujících podobné případy.

Výsledky jsou uvedeny v Přílohách E a F.

4 Shrnutí a závěr

Problematika metody rekonstrukce přibližné podoby obličeje podle lebky je značně složitá a nepřehledná. Tato složitost je dána souběžnou existencí několika různých přístupů k samotnému vytváření odhadované podoby, existencí mnohonásobných predikčních pravidel často s neznámou spolehlivostí, znalostí pouze omezeného množství prokázaných kraniofaciálních vztahů a absencí standardizace postupu. Tyto a další skutečnosti poskytují značný prostor pro vlastní subjektivitu, vedou k poměrně variabilním výsledkům metody (viz inter-observační variabilita nebo široké rozpětí výsledků rekogničních testů) a často omezují metodu v dosažení jejího cíle, tj. správného rozpoznání sledovaného jedince.

Ve vědecké komunitě nepanuje shoda ani v jednotném přístupu k hodnocení spolehlivosti metody. Na jedné straně stojí snaha o měření vzájemné podobnosti mezi rekonstruovaným a skutečným obličejem, na straně druhé jde o měření schopnosti rekonstruovaného obličeje být správně a cíleně rozpoznán. Vztah mezi oběma „mírami“ spolehlivosti není doposud znám. Obličej rekonstruovaný s malou chybou, který je velmi podobný skutečnému obličej, nemusí být zákonitě také snadněji rozpoznatelný. Naopak obličej, který je častěji vybírán (pozorovateli identifikován) jako cílový jedinec, nemusí být s cílovým jedincem nejpodobnější.

Kumulace rozporupných výsledků vedla v současnosti ke kritickému přístupu některých autorů k metodě rekonstrukce jako takové. Častým tématem výzkumů se stalo ověřování platnosti dříve popisovaných kraniofaciálních vztahů a hledání vztahů nových, to vše s cílem zvýšit podobnost mezi rekonstruovaným obličejem a obličejem cílového jedince. Objektivně zjištěné chyby v predikci některých znaků jsou v některých případech značné. Neúspěch faciálních rekonstrukcí začíná být připisován právě zjištěným chybám metody, nikoliv chybám na straně odborníka (nedostatek zkušeností nebo zručnosti). Podporována je volnost ve výběru nejlepších (nejspolehlivějších) principů, nikoliv rigidní následování jediného postupu, jehož legitimita je dána pouze „slavným“ jménem jeho tvůrce či propagátora a dlouhou tradicí jeho používání. V tomto přístupu lze spatřovat posun paradigmatu predikce podoby obličeje na základě lebky.

Cílem disertační práce bylo otestovat spolehlivost vybraných predikčních pravidel pro odhad polohy či velikosti obličejových prvků (očí, nosu a rtů), zejména těch, která doposud ověřena nebyla. Na základě literatury a vlastních výsledků pak doporučit ta vodítka, která pro středoevropskou populaci vykazovala nejvyšší spolehlivost.

Oční koule:

Pro odhad polohy oční koule v očnici v laterální rovině se jako nejspolehlivější (dle velikosti SEE) ukázala recentně navržená metoda dle Guyomarc'h et al. (2012), která antero-posteriorní polohu oční koule vzhledem k nejvíce posteriornímu bodu na laterálním okraji očnice odhaduje poměrem z výšky orbity (51,3 % výšky očnice).

Ačkoliv se pro námi studovaný vzorek jako nejspolehlivější metoda pro odhad vertikální polohy oční koule se jevil princip „centrální polohy“ dle Gatliff (1984), tj. že střed zornice odpovídá středu výšky očnice, je nutno zohlednit výsledky dalších studií (Stephan & Davidson, 2008; Stephan et al., 2009) a velikost námi zkoumaného vzorku a vzorku ve studii Guyomarc'h et al. (2012). I v našem případě byla zjištěna jistá míra divergence od středu očnice superiorním směrem, proto bychom doporučili použití proporcionální rovnice dle Guyomarc'h et al. (2012).

Prominence nosu:

Jako nejvhodnější metoda určená k predikci anteriorní a vertikální polohy bodu *pronasale* se ukázala metoda dle Rynn et al. (2010). Její spolehlivost vyjádřená jako velikost průměrné difference mezi odhadovanou a skutečnou polohou a její směrodatné odchylky dosahovala nejnižších hodnot. Metoda je velmi praktická, vstupními daty jsou přímé lineární vzdálenosti mezi jednoznačně definovaným a snadno dostupnými kranio-metrickými body. Nevýhodou je nutnost zachování distálního konce nosních kostí a předního nosního trnu.

V případě lebek s odlomenými nosními kostmi či předním nosním trnem je vhodnou alternativou k odhadu prominence nosu (anteriorní poloha *pronasale*) metoda dle George (1987) a pro odhad vertikální polohy bodu *pronasale* je možno využít tečnu ke dnu nosního otvoru (Gerasimov, 1955, cit. dle Ullrich & Stephan, 2011).

Štěrbina ústní:

Nejspolehlivější výsledky (vyjádřeny jako velikost průměru absolutní chyby) pro odhad polohy štěrbiny ústní vykazovalo pravidlo dle George (1987) pro muže, tj. poloha štěrbiny ústní odpovídá hranici 3/4 výšky korunky horních mediálních řezáků. Toto pravidlo bylo vhodnější k predikci polohy štěrbiny ústní i u žen.

V případě *post mortem* chybějících horních řezáků, pak může být pro odhad polohy štěrbiny ústní využito pravidlo dle Fedosyutkin & Nainys (1993) a Veselovskaya (2004, osobní sdělení), tj. poloha štěrbiny ústní odpovídá úrovni kousací hrany dolních mediálních řezáků.

Poloha okrajů rtů:

Nejspolehlivější odhad polohy okraje červené části horního rtu u mužů poskytovala metoda dle George (1987), tj. hranice horního rtu leží v úrovni rozhraní první a druhé čtvrtiny výšky korunky mediálních maxilárních řezáků. U žen hranice horního rtu ležela ještě výše, avšak ve většině případů (80 %) nepřekročila úroveň horního okraje korunky maxilárních řezáků.

Pro odhad polohy hranice červené části dolního rtu se ukázala jako nejspolehlivější metoda dle Veselovskaya (2004, osobní sdělení), Fedosyutkin & Nainys (1993), Lebedinskaya (1998), Gatliff (1984) nebo Taylor (2001), tj. ve většině případů odpovídala úrovni dolního okraje korunky mandibulárních řezáků, zejména u žen. U mužů byla umístěna trochu výše, většinou však ne více než je hranice dolní 1/4 výšky korunky mandibulárního řezáku.

Výška rtů:

Pro odhad výšky horního a dolního rtu u žen byly nejspolehlivější výsledky dosaženy s použitím regresních rovnic dle autorů Wilkinson et al. (2003).

Pro odhad výšky horního rtu u mužů byly nejspolehlivější výsledky dosaženy s použitím metody dle George (1987), tj. výška horního rtu odpovídá polovině výšky korunky horního mediálního řezáku (vzdálenost mezi hranicemi 1/4 a 3/4 výšky korunky). Výška dolního rtu u mužů byla nejlépe odhadnuta použitím regresní rovnice dle Wilkinson et al. (2003) nebo jako vzdálenost mezi hranicemi 3/4 výšky korunky horního mediálního řezáku (*stomion* dle George, 1987) a dolním okrajem korunky dolního mediálního řezáku (*labrale inferius* dle Lebedinskaya, 1998) měřeno na zubech při skusu.

Ve druhé části výzkumu jsme se zaměřili na hodnocení míry asociace mezi konturou profilu lebky a konturou profilu obličeje. Výsledky analýzy vzájemné kovariance tvaru kontury lebky a kontury obličeje ukázaly, že měkké tkáně nemusí sledovat pod nimi ležící kostní struktury tak těsně, jak se předpokládalo. Značná část variability tvaru obličeje je dána samotnými měkkými tkáněmi. Z vlastních výsledků i publikovaných studií se zdá, že v rámci obličeje (mimo klenbu lební vč. čela) lze stěží očekávat vyšší míru tvarové kovariance vyjádřenou RV koeficientem než 0,6. Ani detailnější reprezentace tvaru pomocí kontinuálních křivek v našem případě nepřinesla zvýšení míry asociace mezi měkkou tkání obličeje a tvrdou tkání lebky. Nejtěsnější vztah mezi konturou měkké a tvrdé tkáně byl zjištěn v horní a dolní části obličeje (kořen nosu, dolní ret a brada). Střední část obličeje (chrupavčitá část nosu a horní ret) vykazovala velmi malou míru tvarové kovariance. Tento

nález koresponduje s empirickým poznatkem, že tvar profilu nosu a horního rtu lze při vytváření faciální rekonstrukce jen velmi obtížně spolehlivě odhadnout.

Odhadovaný tvar měkkých pokryvů obličejové části lebky daného jedince tedy nikdy nebude zcela shodný s jeho skutečnou podobou, protože měkké tkáně jsou velmi variabilní. Vědecky ověřená pravidla, dobře fungující v průměru, mohou být stále chybná v individuálních případech. Vzhledem k tvarové složitosti a velké variabilitě lidského obličejce není doposud možné vytvořit *post mortem* portrét, dosáhnout lze pouze přibližné podoby jedince. Ta představuje typ obličejce, který mohl daný jedinec mít, zobrazuje základní proporce, jemné detaily však zůstávají odhadem.

Zodpovědný přístup k aplikaci metody rekonstrukce podoby vyžaduje mimo jiné orientaci v takto složité problematice, znalost slabých míst metody a jejich otevřenou prezentaci. V této práci jsme se snažili poskytnout přehled aktuálního stavu řešené problematiky, nabídnout aktuální a nezkreslené informace o spolehlivosti metody, doplnit je tam, kde v publikované literatuře doposud chyběly, a usnadnit poučenému čtenáři výběr vhodného postupu při realizaci rekonstrukce podoby.

Použitá literatura

- Allam, E., Mpofo, P., Ghoneima, A., Tuceryan, M., & Kula, K. (2018). The relationship between hard tissue and soft tissue dimensions of the nose in children: A 3D cone beam computed tomography study. *Journal of Forensic Sciences*, 63, 1652–1660.
- Angel, J. L. (1987). Restoration of head and face for identification. *Proceedings of the 30th Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences*. St. Louis, MO. Colorado Springs, CO: American Academy of Forensic Sciences.
- Anderson, K. J., Henneberg, M., & Norris, R. M. (2008). Anatomy of the nasal profile. *Journal of Anatomy*, 213, 210–216.
- Aulsebrook, W. A., Becker, P. J., & İşcan, M. Y. (1996). Facial soft tissue thickness in the adult male Zulu. *Forensic Science International*, 79, 83–102.
- Balueva T. S., Veselovskaya E. V., Lebedinskaya G. V., & Pestrjakov A. P. (1988). *Antropologičeskije tipy drevnevo naselenia na teritorii SSSR*. A. A. Zubov (Ed.). Moskva: Nauka. (Needitovaný překlad Vladimír Novotný).
- Balueva, T. S., Veselovskaya, E. V., & Rasskazova, A. V. (2010). A comparison of the medieval and modern populations of the Novgorod region, based on facial reconstruction. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, 38, 135–144.
- Balueva, T. S., Veselovskaya, E. V., & Kobyljansky, E. (2009). Cranio-facial reconstruction by applying the ultrasound method in live human populations. *International Journal of Anthropology*, 24, 87–111.
- Bastir, M., Sobral, P. G., Kuroe, K., & Rosas, A. (2008). Human craniofacial sphericity: a simultaneous analysis of frontal and lateral cephalograms of a Japanese population using geometric morphometrics and partial least squares analysis. *Archives of Oral Biology*, 53, 295–303.
- Benson, P. J., & Perrett, D. I. (1991). Perception and recognition of photographic quality facial caricatures: implications for the recognition of natural images. *European Journal of Cognitive Psychology*, 3, 105–135.
- Berar, M., Desvignes, M., Bailly, G., & Payan, Y. (2006). 3D semi-landmark-based statistical face reconstruction. *Journal of Computing and Information Technology*, 14, 31–43.
- Berar, M., Tilotta, F. M., Glaunès, J. A., & Rozenholc, Y. (2011). Craniofacial reconstruction as a prediction problem using a Latent Root Regression model. *Forensic Science International*, 210, 228–236.

- Bookstein, F. L. (1991). *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology*. New York: Cambridge University Press.
- Bourzgui, F., Alami, S., Sebbar, M., Derkaoui, T., Hamza, M., Serhier, Z., & Bennani Othmani, M. (2013). Effect of orthodontic treatment on lip position. *International Orthodontics*, 11, 303–313.
- Brooks, K. R., & Kemp, R. I. (2007). Sensitivity to feature displacement in familiar and unfamiliar faces. Beyond the internal/external feature distinction. *Perception*, 36, 1646–1659.
- Brues, A. M. (1958). Identification of skeletal remains. *Journal of Criminal Law and Criminology*, 48, 551–556.
- Brzobohatá, H. (2014). *Tvarová variabilita proximální a distální části lidské kosti holenní* (Nepublikovaná disertační práce). Univerzita Karlova, Praha.
- Buschcowitsch, W. J. (1927). Über das Tuberculum orbitale des Jochbeins des Menschen. *Anatomischer Anzeiger*, 63, 353–357.
- Caple, J., & Stephan, C. N. (2016). A standardized nomenclature for craniofacial and facial anthropometry. *Journal of Legal Medicine*, 130, 863–879.
- Claes, P., Vandermeulen, D., De Greef, S., Willems, G., & Suetens, P. (2006). Craniofacial reconstruction using a combined statistical model of face shape and soft tissue depths: methodology and validation. *Forensic Science International*, 159, 147–158.
- Claes, P., Vandermeulen, D., De Greef, S., Willems, G., Clement, J. G., & Suetens, P. (2010a). Bayesian estimation of optimal craniofacial reconstructions. *Forensic Science International*, 201, 146–152.
- Claes, P., Vandermeulen, D., De Greef, S., Willems, G., Clement, J. G., & Suetens, P. (2010b). Computerized craniofacial reconstruction: conceptual framework and review. *Forensic Science International*, 201, 138–145.
- Davy-Jow, S. (2013). The devil is in the details: A synthesis of psychology of facial perception and its applications in forensic facial reconstruction. *Science and Justice*, 53, 230–235.
- De Greef, S., Claes, P., Mollemans, W., Loubele, M., Vandermeulen, D., Suetens, P., & Willems, G. (2005). Semi-automated ultrasound facial soft tissue depth registration: method and validation. *Journal of Forensic Sciences*, 50, 1282–1288.
- De Greef, S., Vandermeulen, D., Claes, P., Suetens, P., & Willems, G. (2009). The influence of sex, age, and body mass index on facial soft tissue depths. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 5, 60–65.

- Decker, S., Ford, J., Davy-Jow, S., Faraut, P., Neville, W., & Hilbelink, D. (2013). Who is this person? A comparison study of current three-dimensional facial approximation methods. *Forensic Science International*, 229, 161.e1–161.e8.
- Deng, Q., Zhou, M., Wu, Z., Shui, W., Ji, Y., Wang, X., Liu, C. Y. J., Huang, Y., & Jiang, H. (2016). A regional method for craniofacial reconstruction based on coordinate adjustments and a new fusion strategy. *Forensic Science International*, 259, 19–31.
- Dirkmaat, D. C., Cabo, L. L., Ousley, S. D., & Symes, S. A. (2008). New perspectives in forensic anthropology. *Yearbook of physical anthropology*, 51, 33–52.
- Drgáčová, A., Dupej, J., & Velemínská, J. (2016). Facial soft-tissue thicknesses in the present Czech population. *Forensic Science International*, 260, e101–e107.
- Duan, F., Huang, D., Tian, Y., Lu, K., Wu, Z., & Zhou, M. (2015). 3D face reconstruction from skull by regression modeling in shape parameter spaces. *Neurocomputing*, 151, 674–682.
- Dumont E. R. (1986). Mid-facial tissue depths of white children: an aid in facial feature reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 31, 1463–1469.
- El-Mehallawi, I. H., & Soliman, E. M. (2001). Ultrasonic assessment of facial soft tissue thickness in adult Egyptians. *Forensic Science International*, 117, 99–107.
- Farkas, L. G. & Monro I. R. (1987). *Anthropometric Facial Proportions in Medicine*. Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- Farrera, A., García-Velasco, M., & Villanueva, M. (2016). Quantitative assessment of the facial features of a Mexican population dataset. *Forensic Science International*, 262, 283.e1–283.e9.
- Fedosyutkin, B. A., & Nainys, J. V. (1993). The relationship of skull morphology to facial features. In M. Y. Işcan, & R. P. Helmer (Eds.), *Forensic analysis of the skull* (pp. 199–213). New York: Wiley-Liss.
- Fernandes, C. M. S., Serra, M. C., Silva, J. V. L., Noritomi, P. Y., Pereira, F. D. A. S., & Melani, R. F. H. (2012). Tests of one Brazilian facial reconstruction method using three soft tissue depth sets and familiar assessors. *Forensic Science International*, 214, 211.e1–211.e7.
- Fernandes, C. M. S., Alencar de Sena Pereira, F. D., Lopes da Silva, J.V., & da Costa Serra, M. (2013). Is characterizing the digital facial reconstruction with hair necessary? A familiar assessor's analysis. *Forensic Science International*, 229, 164.e1–164.e5.

- Frowd, C. D., Skelton, F., Atherton, C., Pitchford, M., Hepton, G., Holden, L., McIntyre, A. H., & Hancock, P. J. B. (2012). Recovering faces from memory: the distracting influence of external facial features. *Journal of Experimental Psychology Applied*, 224–238.
- Gatliff, B. P., & Snow, C. (1979). From skull to visage. *Journal of Biocommunication*, 6, 27–30.
- Gatliff, B. P. (1984). Facial sculpture on the skull for identification. *American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 5, 327–332.
- Gaytán, E., Mansilla-Lory, J., Leboeiro, I., & Pineda, S. C. (2009). Facial reconstruction of a pathological case. *Forensic Science Medicine and Pathology*, 5, 95–99.
- George, R. M. (1993). Anatomical and artistic guidelines for forensic facial reconstruction. In M. Y. Işcan, & R. P. Helmer (Eds.), *Forensic analysis of the skull* (pp. 215–228). New York: Wiley-Liss.
- George, R. M. (1987). The lateral craniographic method of facial reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 32, 1305–1330.
- Gerasimov, M. M. (1955). *Vosstanovlenie lica po cerepu*. Moskva: Izdat. Akademii Nauk SSSR.
- Gerasimov, M. M. (1968). *Ich suchte Gesichter*. Gutersloh: C. Bertelsmann Verlag.
- Gerasimov, M. M. (1971). *The face finder*. London, U.K.: Hutchinson & Co. Translated from the German by Alan Houghton Brodrick.
- Guyomarc'h, P., Velemínský, P., Brůžek, J., Lynnerup, N., Horak, M., Kučera, J., Rasmussen, K. L., Podliska, J., Dragoun, Z., Smolik, J., & Vellev, J. (2018). Facial approximation of Tycho Brahe's partial skull based on estimated data with TIVMI-AFA3D. *Forensic Science International*, 292, 131–137.
- Guyomarc'h, P., Dutailly, B., Charton, J., Santos, F., Desbarats, P., & Coqueugniot, H. (2014). Anthropological facial approximation in three dimensions (AFA3D): computer-assisted estimation of the facial morphology using geometric morphometrics. *Journal of Forensic Sciences*, 59, 1502–1516.
- Guyomarc'h, P., Dutailly, B., Couture, Ch., & Coqueugniot, H. (2012). Anatomical placement of the human eyeball in orbit – validation using CT scans of living adults and prediction for facial approximation. *Journal of Forensic Sciences*, 57, 1271–1275.
- Guyomarc'h, P., & Stephan, C. N. (2012). The validity of ear prediction guidelines used in facial approximation. *Journal of Forensic Sciences*, 57, 1427–1441.

Haglund, W. D., & Reay, D. T. (1991). Use of facial approximations techniques in identification of Green River serial murder victims. *American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 12, 132–142.

Haig, N. D. (1984). The effect of feature displacement on face recognition. *Perception*, 13, 505–512.

Haig, N. D. (1986). Exploring recognition with interchanged facial features. *Perception*, 15, 235–247.

Halazonetis, D. J. (2007). Morphometric correlation between facial soft-tissue profile shape and skeletal pattern in children and adolescents. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 132, 450–457.

Hayes, S. (2014). Facial approximation of 'Angel': Case specific methodological review. *Forensic Science International*, 237, e30–e41.

Helmer, R. (1984). *Schadelidentifizierung durch elektronische Bildmischung. Zugleich ein Beitrag zur Konstitutionsbiometrie und Dickenmessung der Gesichtsweichteile*. Heidelberg: Kriminalistik-Verlag.

Helmer, R. P., Petersen, D., & Röhrich, S. (1993). Assessment of the Reliability of Facial reconstruction. In M. Y. Isçan, & R. P. Helmer (Eds.), *Forensic analysis of the skull* (pp. 229–246). New York: Wiley-Liss.

Hoffman, B. E., McConathy, D. A., Coward, M., & Saddler, L. (1991). Relationship between the piriform aperture and interalar nasal widths in adult Males. *Journal of Forensic Sciences*, 36, 1152–1161.

Hwang, H. S., Park, M. K., Lee, W. J., Cho, J. H., Kim, B. K., & Wilkinson, C. M. (2012). Facial soft-tissue thickness database for craniofacial reconstruction in Korean adults. *Journal of Forensic Sciences*, 57, 1442–1447.

Inada, E., Saitoh, I., Hayasaki, H., Iwase, Y., Kubota, N., Tokemoto, Y., Yamada, C., & Yamasaki, Y. (2009). Relationship of nasal and skeletal landmarks in lateral cephalograms of preschool children. *Forensic Science International*, 191, 1–3.

Klepáček, I., & Malá, P. Z. (2012). "Bochdalek's" skull: morphology report and reconstruction of face. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 8, 451–459.

Klingenberg, C. P. (2009). Morphometric integration and modularity in configurations of landmarks: tools for evaluating a priori hypotheses. *Evolution and Development*, 11, 405–421.

Kollman, J., & Büchly, W. (1898). Die Persistenz der Rassen und die Reconstruction der Physiognomie prahistorischer Schadel. *Archiv für Anthropologie*, 25, 329–359.

- Králík, M., Peška, J., Kalábek, M., Urbanová, P., Mořkovský, T., Jarošová, I., Dreslerová, G., Nováček, J., Malá, P., & Krásná, S. (2006). Předběžná analýza kosterních pozůstatků a hrobové výbavy jedince kultury lidu se šňůrovou keramikou z lokality Olomouce-Nemilan, ulice Lidická (Nemilany 4). In M. Bém & J. Peška (Eds.), *Ročenka 2005* (pp. 108–145). Olomouc: Archeologické centrum Olomouc.
- Krogman, W. M. & İşcan, M. Y. (1962). *The Human Skeleton in Forensic Medicine*. Springfield, IL: Charles C. Thomas.
- Kustár, A. (1999). Facial Reconstruction of an Artificially distorted skull of the 4th to the 5th century from the site of Mözs. *International Journal of Osteoarchaeology*, 9, 325–332.
- Kustár, A., Forró, L., Kalina, I., Fazekas, F., Honti, S., Makra, S., & Friess, M. (2013). FACE-R-a 3D database of 400 living individuals' full head CT and face scans and preliminary GMM analysis for craniofacial reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 58, 1420–1428.
- Lebedinskaya, G. B. (1998). *Rekonstrukcia lica po cerepu (metodiceskoje rukovodstvo)*. Moskva: Staryj sad.
- Lebedinskaya, G. V., Balueva, T. S., & Veselovskaya, E. V. (1993). Principles of facial reconstruction. In M. Y. İşcan, & R. P. Helmer (Eds.), *Forensic analysis of the skull* (pp. 183–198). New York: Wiley-Liss.
- Lee, K. M., Lee, W. J., Cho, J. H., & Hwang, H. S. (2014). Three-dimensional prediction of the nose for facial reconstruction using cone-beam computed tomography. *Forensic Science International*, 236, 194.e1–194.e5.
- Lee, W. J., Wilkinson, C. M., & Hwang, H. S. (2012). An accuracy assessment of forensic computerized facial reconstruction employing cone-beam computed tomography from live subjects. *Journal of Forensic Sciences*, 57, 318–327.
- Lee, Y. J., Park, J. T., & Cha, J. Y. (2015). Perioral soft tissue evaluation of skeletal Class II Division 1: A lateral cephalometric study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 148, 405–413.
- Macková, K., & Velemínská, J. (2007). Craniometrical norms for recent Czech population intended for evaluation of the cranial size and shape using lateral X-ray films. *Anthropologie*, 45, 261–274.
- Macho, G. A. (1989). Descriptive morphological features of the nose, an assessment of their importance for plastic reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 34, 902–911.
- Macho, G. A. (1986). An appraisal of plastic reconstruction of the external nose. *Journal of Forensic Sciences*, 31, 1391–1403.

- Mala, P. Z. (2013). Pronasale position. An appraisal of two recently proposed methods for predicting nasal projection in facial reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 58, 957–963.
- Maltais Lapointe, G., Lynnerup, N., & Hoppa, R. D. (2016). Validation of the new interpretation of Gerasimov's nasal projection method for forensic facial approximation using CT data. *Journal of Forensic Anthropology*, 61, S193 – S200.
- Mitteroecker, P., & Gunz, P. (2009). Advances in geometric morphometrics. *Evolutionary Biology*, 36, 235–247.
- Miyasaka, S., Yoshino, M., Imaizumi, K., & Seta, S. (1995). The computeraided facial reconstruction system. *Forensic Science International*, 74, 155–165.
- Munn, L., & Stephan, C. N. (2018). Changes in face topography from supine-to-upright position – an soft tissue correction values for craniofacial identification. *Forensic Science International*, 289, 40–50.
- Panenková, P., Beňuš, R., Masnicová, S., Obertová, Z., & Grunt, J. (2012). Facial soft tissue thicknesses of the mid-face for Slovak population. *Forensic Science International*, 220, 293.e1–293.e6.
- Parks, C. L., Richard, A. H., & Monson, K. L. (2013). Preliminary performance assessment of computer automated facial approximations using computed tomography scans of living individuals. *Forensic Science International*, 233, 133–139.
- Perkins, R. A., & Staley, R. N. (1993). Change in lip vermilion height during orthodontic treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 103, 147–154.
- Prag, J., & Neave, R. A. H. (1997). *Making faces: Using forensic and archaeological evidence*. London: British Museum Press.
- Prokopec, P., & Ubelaker, D. H. (2002). Reconstucting the shape of the nose according to the skull. *Forensic Science Communications*, 4, 1–4.
- Quatrehomme, G., Cotin, S., Subsol, G., Delingette, H., Garidel, Y., Grevin, G., Fidrich, M., Baillet, P., & Ollier, A. (1997). A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models. *Journal of Forensic Sciences*, 41, 649–652.
- Richard, A. H., Parks, C. L., & Monson, K. L. (2014). Assessment of presentation methods for ReFace computerized facial approximations. *Forensic Science International*, 242, 283–292.
- Richard, A. H., & Monson, K. L. (2017). Recognition of computerized facial approximations by familiar assessors. *Science and Justice*, 57, 431–438.

- Richtsmeier, J. T., DeLeon, V. B., & Lele, S. (2002). The promise of geometric morphometrics. *Yearbook of Physical Anthropology*, 45, 63–91.
- Rhine, J. S., & Campbell, H. R. (1980). Thickness of facial tissues in American blacks. *Journal of Forensic Sciences*, 25, 847–858.
- Ridel, A. F., Demeter, F., Liebenberg, J., L'Abbé, E. N., Vandermeulen, D., & Oettlé, A. C. (2018). Skeletal dimensions as predictors for the shape of the nose in a South African sample: A cone beam computed tomography (CBCT) study. *Forensic Science International*, 289, 18–26.
- Rohlf, F. J., & Corti, M., (2000). Use of two-block partial least-squares to study covariation in shape. *Systematic Biology*, 49, 740–753.
- Rose, A. D., Woods, M. G., Clement, J. G., & Thomas, C. D. L. (2003). Lateral facial soft-tissue prediction model: analysis using Fourier shape descriptors and traditional cephalometric methods. *American Journal of Physical Anthropology*, 121, 172–180.
- Rynn, C., & Wilkinson, C. M. (2006). Appraisal of traditional and recently proposed relationships between the hard and soft dimensions of the nose in profile. *American Journal of Physical Anthropology*, 130, 364–373.
- Rynn, C., Wilkinson, C. M., & Peters, H. L. (2010). Prediction of nasal morphology from the skull. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 6, 20–34.
- Sahni, D., Sanjeev, Singh, G., Jit, I., & Singh, P. (2008). Facial soft tissue thickness in northwest Indian adults. *Forensic Science International*, 176, 137–146.
- Sarilita, E., Rynn, C., Mossey, P. A., Black, S., & Oscandar, F. (2018). Nose profile morphology and accuracy of nose profile estimation method in Scottish subadult and Indonesian adult populations. *International Journal of Legal Medicine*, 132, 923–931.
- Simpson, E., & Henneberg, M. (2002). Variation in soft-tissue thicknesses on the human face and their relation to craniometric dimensions. *American Journal of Physical Anthropology*, 118, 121–133.
- Short, L. J., Khambay, B., Ayoub, A., Erolin, C., Rynn, C., & Wilkinson, C. (2014). Validation of a computer modelled forensic facial reconstruction technique using CT data from live subjects: a pilot study. *Forensic Science International*, 237, 147.e1–147.e8.
- Shrimpton, S., Daniels, K., de Greef, S., Tilotta, F., Willems, G., Vandermeulen, D., Suetens, P., & Claes, P. (2014). A spatially-dense regression study of facial form and tissue depth: towards an interactive tool for craniofacial reconstruction. *Forensic Science International*, 234, 103–110.

- Schultz, A. (1918). Relation of the external nose to the bony nose and nasal cartilages in whites and negroes. *American Journal of Physical Anthropology*, 1, 329–338.
- Slice, D. E. (2007). Geometric morphometrics. *Annual Review of Anthropology*, 36, 261–281.
- Snow, C. C., Gatliff, B. P., & McWilliams, K. R. (1970). Reconstruction of facial features from the skull: an evaluation of its usefulness in forensic anthropology. *American Journal of Physical Anthropology*, 33, 221–228.
- Starbuck, J. M., & Ward, R. E. (2007). The effect of tissue depth variation on craniofacial reconstructions. *Forensic Science International*, 172, 130–136.
- Stephan, C. N. (2002a). Facial approximation: globe projection guideline falsified by exophthalmometry literature. *Journal of Forensic Sciences*, 47, 730–735.
- Stephan, C. N. (2002b). Position of superciliare in relation to the lateral iris: testing a suggested facial approximation guideline. *Forensic Science International*, 130, 29–33.
- Stephan, C. N. (2002c). Do resemblance ratings measure the accuracy of facial approximations? *Journal of Forensic Sciences*, 47, 239–243.
- Stephan, C. N. (2003a). Anthropological facial ‘reconstruction’ – recognizing the fallacies, ‘unembracing’ the errors, and realizing method limits. *Science and Justice*, 43, 193–200.
- Stephan, C. N. (2003b). Facial approximation: an evaluation of mouth-width determination. *American Journal of Physical Anthropology*, 121, 48–57.
- Stephan, C. N. (2006). Beyond the sphere of the English Facial Approximation Literature: ramification of German Papers on Western Method Concepts. *Journal of Forensic Sciences*, 51, 736–739.
- Stephan, C. N. (2014). The application of the central limit theorem and the law of large numbers to facial soft tissue depths: T-Table robustness and trends since 2008. *Journal of Forensic Sciences*, 59, 454–462.
- Stephan, C. N. (2015). Facial approximation – from facial reconstruction synonym to face prediction paradigm. *Journal of Forensic Sciences*, 60, 566–571.
- Stephan, C. N. (2017). Tallied facial soft tissue thicknesses: adult and sub-adult data. *Forensic Science International*, 280, 113–123.
- Stephan, C. N., & Arthur R. S. (2006). Assessing facial approximation accuracy: How do resemblance ratings of disparate faces compare to recognition tests? *Forensic Science International*, 159S, S159–S163.

- Stephan, C. N., & Cicolini, J. (2008). Measuring the accuracy of facial approximations: A comparative study of resemblance rating and face array methods. *Journal of Forensic Sciences*, 53, 58–64.
- Stephan, C. N., & Cicolini, J. (2010). The reproducibility of facial approximation accuracy results generated from photo-spread test. *Forensic Science International*, 201, 133–137.
- Stephan, C. N., & Davidson, P. L. (2008). The placement of the human eyeball and canthi in craniofacial identification. *Journal of Forensic Sciences*, 53, 612–619.
- Stephan, C. N., & Devine, M. (2009). The superficial temporal fat pad and its ramification for temporalis muscle construction in facial approximation. *Forensic Science International*, 191, 70–79.
- Stephan, C. N., & Guyomarc'h, P. (2016). Facial soft tissue depth measurement: validation of the 75-Shormax. *Journal of Forensic Sciences*, 61, 1327–1330.
- Stephan, C. N., & Henneberg, M. (2001). Building faces from dry skull: Are they recognized above chance rates? *Journal of Forensic Sciences*, 46, 432–440.
- Stephan, C. N., & Henneberg, M. (2003). Predicting mouth width from inter-canine width – a 75 % rule. *Journal of Forensic Sciences*, 48, 725–727.
- Stephan, C. N., & Henneberg, M. (2006). Recognition by forensic facial approximation: case specific examples and empirical tests. *Forensic Science International*, 156, 182–191.
- Stephan, C. N., Henneberg, M., & Sampson, W. (2003). Predicting Nose projection and pronasale position in facial approximation: A test of published method and proposal of new guidelines. *American Journal of Physical Anthropology*, 122, 240–50.
- Stephan, C. N., Huang, A. J. R., & Davidson, P. L. (2009). Further evidence on the anatomical placement of the human eyeball for facial approximation and craniofacial superimposition. *Journal of Forensic Sciences*, 54, 267–269.
- Stephan, C. N., & Murphy, S. J. (2008). Mouth width prediction in craniofacial identification: cadaver tests of four recent methods, including two techniques for edentulous skulls. *Journal of Forensic Odonto-Stomatology*, 27, 2–7.
- Stephan, C. N., Penton-Voak, I. S., Clement, J. G., & Henneberg, M. (2005). Ceiling recognition limits of two-dimensional facial approximations constructed using averages. In J.G. Clement, & M. Marks (Eds.), *Computer Graphic Facial Reconstruction* (pp. 199–219). Boston, MA: Academic Press.
- Stephan, C. N., Priesler, R., Bulut, O., & Bennett, M. B. (2016). Turning the tables of sex distinction in craniofacial identification: why females possess thicker facial soft tissues than males not vice versa. *American Journal of Physical Anthropology*, 161, 283–295.

- Stephan, C. N., & Priesler, R. (2018). In vivo facial soft tissue thickness of adult Australians. *Forensic Science international*, 282, 220.e1–220.e12.
- Stephan, C. N., & Simpson, E. K. (2008). Facial soft tissue depths in craniofacial identification [part I]: an analytical review of the published adult data. *Journal of Forensic Sciences*, 53, 1257–1271.
- Stephan, C. N., Simpson, E. K., & Byrd, J. E. (2013). Facial soft tissue depth statistics and enhanced point estimators for craniofacial identification: the debut of the shorth and the 75-shormax. *Journal of Forensic Sciences*, 58, 1439–1457.
- Suk, V. (1935). Fallacies of anthropological identifications. *Publications de la Facultae des sciences de l'Universitea Masaryk*, 207, 3–18.
- Suzuki, H. (1948). On the thickness of the soft parts of the Japanese face. *Journal of the Anthropological Society of Nippon*, 60, 7–11.
- Šmahel, Z., & Brejcha, M. (1983). Differences in craniofacial morphology between complete and incomplete unilateral cleft-lip and palate in adults. *Cleft Palate-Craniofacial Journal*, 20, 113–127.
- Taylor, K. T. (2001). *Forensic Art and Illustration*. New York: CRC Press.
- Tedeschi-Oliveira, S. V., Beaini, T. L., & Haltenhoff Melani, R. F. (2016). Forensic facial reconstruction: Nasal projection in Brazilian adults. *Forensic Science International*, 266, 123–129.
- Tilotta, F., Glauns, J., Richard, F., & Rozenholc, Y. (2010). A local technique based on vectorized surfaces for craniofacial reconstruction. *Forensic Science International*, 200, 50–59.
- Titlbachova, S. (1986). Three-dimensional facial reconstruction on the basis of human skull. *Anthropologie*, 14, 257–260.
- Ubelaker, D. H., & O'Donnell, G. (1992). Computer assisted facial reproduction. *Journal of Forensic Sciences*, 37, 155–162.
- Ullrich, H. (1958). Die methodischen grundlagen des plastischen rekonstruktionsverfahrens nach gerasimov. *Zeitschrift für Morphologie und Anthropologie*, 49, 245–258.
- Ullrich, H., & Stephan, C. N. (2011). On Gerasimov's plastic facial reconstruction technique: New insight to facilitate repeatability. *Journal of Forensic Sciences*, 56, 470–474.

- Utsuno, H., Kageyama, T., Uchida, K., Deguchi, T., Miyazawa, H., & Inoue, K. (2008). Estimation of nasal tip position using lateral cephalometric X-ray images in Japanese male children, Applications in facial reconstruction. *Pediatric Dental Journal*, 18, 43–52.
- Utsuno, H., Kageyama, T., Uchida, K., Ishii, N., Minegishi, S., Uemura, K., & Sakurada, K. (2018). Establishment of a prediction method for the mid-facial region of unknown human Mongoloid skeletal remains. *Forensic Science International*, 288, 297–303.
- Utsuno, H., Kageyama, T., Uchida, K., Kibayashi, K., Sakurada, K., & Uemura, K. (2016). Pilot study to establish a nasal tip prediction method from unknown human skeletal remains for facial reconstruction and skull photo superimposition as applied to Japanese male populations. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 38, 75–80.
- Valentine, T., & Bruce, V. (1986). The effects of distinctiveness in recognising and classifying faces, *Perception*, 15, 525–535.
- Van Rensburg, M. S. J. (1993). Accuracy of recognition of three-dimensional plastic reconstruction of faces from skulls. *Proceedings of Anatomical Society South Africa, 23rd Annual Congress*, 20. (abstract).
- Vandermeulen, D., Claes, P., Loeckx, D., De Greef, S., Willems, G., & Suetens, P. (2006). Computerized craniofacial reconstruction using CT-derived implicit surface representations. *Forensic Science International*, 159, 164–174.
- Vanek, D., Brzobohata, H., Silerova, M., Horak, Z., Nyvltova Fisakova, M., Vasinova Galiova, M., Zednikova Mala, P., Urbanova, V., Dobisikova, M., Beran, M., & Brestovansky, P. (2015). Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave – Case Report. *Anthropology*, 2, 138.
- Vanezis, P., Blowes, R. W., Linney, A. D., Tan, A. C., Richards, R., & Neave, R. (1989). Application of 3D computer graphics for facial reconstruction and comparison with sculpting techniques. *Forensic Science International*, 42, 69–84.
- Vanezis, P., Vanezis, M., McCombe, G., & Niblett, T. (2000). Facial reconstruction using 3-D computer graphics, *Forensic Science International*, 108, 81–95.
- Vlček, E. (1999). *Čeští králové I*. Praha: Vesmír.
- von Eggeling, H. (1913). Die Leistungsfähigkeit physiognomischer Rekonstruktionsversuche auf Grundlage des Schadels. *Archiv für Anthropologie*, 12, 44–47.
- Wang, J., Zhao, X., Mi, C., & Raza, I. (2016). The study on facial soft tissue thickness using Han population in Xinjiang. *Forensic Science International*, 266, 585.e1–585.e5.

- Wilkinson, C. M. (2002). In vivo facial tissue depth measurements for white British children. *Journal of Forensic Sciences*, 47, 459–465.
- Wilkinson, C. M. (2003). Virtual sculpture as a method of computerized facial reconstruction. *Proceedings of the 1st International Conference on Reconstruction of Soft Facial Parts* (pp. 59–63). Potsdam, Germany.
- Wilkinson, C. M. (2010). Facial reconstruction – anatomical art or artistic anatomy. *Journal of Anatomy*, 216, 235–250.
- Wilkinson, C. M. (2004). *Forensic facial reconstruction*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wilkinson, C. M. (2005). Computerized forensic facial reconstruction: a review of current systems. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 1, 173–177.
- Wilkinson, C. M., & Mautner, S. A. (2003). Measurement of eyeball protrusion and its application in facial reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 48, 12–16.
- Wilkinson, C. M., Motwani, M., & Chiang, E. (2003). The relationship between the soft tissue and the skeletal detail of the mouth. *Journal of Forensic Sciences*, 48, 728–732.
- Wilkinson, C. M., & Neave, R. (2003). The reconstruction of a face showing a healed wound. *Journal of Archaeological Science*, 30, 1343–1348.
- Wilkinson, C. M., Neave, R. A. H, Smith, D., & Hons, B. A. (2002). How important to facial reconstruction are the correct ethnic group tissue depths? In M. Colonna, M. Belviso & A. Addante (Eds.), *Proceedings of the 10th Biennial Scientific Meeting of the International Association for Craniofacial Identification* (pp. 111–121). Bari, Italy.
- Wilkinson, C. M., Rynn, C., Peters, H., Taister, M., Kau, C. H., & Richmond S. (2006). A blind accuracy assessment of computer-modeled forensic facial reconstruction using computed tomography data from live subjects. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 2, 179–187.
- Wilkinson, C. M., & Whittaker, D. K. (2002). Juvenile Forensic Facial Reconstruction – A Detailed Accuracy Study. In M. Colonna, M. Belviso & A. Addante (Eds.), *Proceedings of the 10th Biennial Scientific Meeting of the International Association for Craniofacial Identification* (pp. 98–110). Bari, Italy.
- Wittwer-Backofen, U., (2011). Facial reconstructions by a combined 2D/3D method – different techniques meet requirements in the identification process. *Bulletin der Schweizerischen Gesellschaft für Anthropologie*, 17, 77–85.

Yasutomi, H., Loi, H., Nakata, S., Nakasima, A., & Counts, A. L. (2006). Effects of retraction of anterior teeth on horizontal and vertical lip positions in Japanese adults with the bimaxillary dentoalveolar protrusion. *Orthodontic waves*, 65, 141–147.

Young, N. M., Sherathiya, K., Gutierrez, L., Nguyen, E., Bekmezian, S., Huang, J. C., Hallgrímsson, B., Lee, J. S., & Marcucio, R. S. (2016). Facial surface morphology predicts variation in internal skeletal shape. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 149, 501–508.

Zednikova Mala, P., & Velemínska, J. (2016). Vertical lip position and thickness in facial reconstruction: A validation of commonly used methods for predicting the position and size of lips. *Journal of Forensic Sciences*, 61, 1046–1054.

Zednikova Mala, P., & Velemínska, J. (2018). Eyeball position in facial approximation: Accuracy of methods for predicting globe positioning in lateral view. *Journal of Forensic Sciences*, 63, 221–226.

Zedníková Malá, P., Krajíček, V., & Velemínská, J. (2018). How tight is the relationship between the skeletal and soft-tissue facial profile: A geometric morphometric analysis of the facial outline. *Forensic Science International*, 292, 212–223.

Přílohy

Seznam antropometrických bodů použitých v textu

<i>Nasion</i>	Bod na průsečíku mediánní roviny s frontonasálním švem.
<i>Rhinion</i>	Bod na distálním konci internasálního švu. Bod na nosních kostech nejvíce vpředu a dole.
<i>Akanthion</i>	Bod na hrotu předního nosního trnu.
<i>Subspinale/Bod A</i>	Bod ležící v mediánní rovině lebky v místě, kde přední dolní hrana předního nosního trnu přechází na přední stranu alveolárního výběžku kosti. Nejhlubší bod subspinální konkavity horní čelisti.
<i>Prosthion</i>	Bod na alveolárním výběžku horní čelisti, v místě, kde v mediánní rovině kostěný výběžek mezi středními řezáky vyčnívá nejvíce dopředu.
<i>Supramentale/Bod B</i>	Nejhlubší bod na anteriorní kontuře dolní čelisti.
<i>Pogonion</i>	Bod nejvíce vystupující dopředu na bradové vyvýšenině dolní čelisti.
<i>Gnathion</i>	Nejnižší položený bod na dolním okraji dolní čelisti v mediánní rovině.
<i>Sella</i>	Střed <i>sella turcica</i> .
<i>Pronasale</i>	Bod na kontuře zevního nosu nejvíce vpředu.
<i>Alare</i>	Nejvíce laterálně vystupující bod na kontuře nosních křídel.
<i>Subnasale</i>	Bod přechodu kolumely a horního rtu.
<i>Midphiltrum</i>	Bod na předním okraji horní čelisti ve středu vzdálenosti mezi body <i>subspinale</i> a <i>prosthion</i> .
<i>Stomion</i>	Průsečík štěrbiny ústní a mediánní roviny, na laterálním rentgenovém snímku bod dotyku horního a dolního rtu.
<i>Cheilion</i>	Koutek úst, laterální ohraničení štěrbiny ústní.
<i>Labrale Inferius</i>	Průsečík okraje červené části dolního rtu a mediánní roviny. Na laterálním rentgenovém snímku bod na hraně okraje červené části dolního rtu.

Seznam publikací

- Příloha A: Mala, P. Z. (2013). Pronasale position. An appraisal of two recently proposed methods for predicting nasal projection in facial reconstruction. *Journal of Forensic Sciences*, 58, 957–963. (IF = 1,184)
- Příloha B: Zednikova Mala, P., & Veleminska, J. (2016). Vertical lip position and thickness in facial reconstruction: A validation of commonly used methods for predicting the position and size of lips. *Journal of Forensic Sciences*, 61, 1046–1054. (IF = 1,184)
- Příloha C: Zednikova Mala, P., & Veleminska, J. (2018). Eyeball position in facial approximation: Accuracy of methods for predicting globe positioning in lateral view. *Journal of Forensic Sciences*, 63, 221–226. (IF = 1,184)
- Příloha D: Zedníková Malá, P., Krajíček, V., & Velemínská, J. (2018). How tight is the relationship between the skeletal and soft-tissue facial profile: A geometric morphometric analysis of the facial outline. *Forensic Science International*, 292, 212–223. (IF = 1,974)
- Příloha E: Klepáček, I., & Malá, P. Z. (2012). "Bochdalek's" skull: morphology report and reconstruction of face. *Forensic Science, Medicine and Pathology*, 8, 451–459. (IF = 2,027)
- Příloha F: Vanek, D., Brzobohata, H., Silerova, M., Horak, Z., Nyvltova Fisakova, M., Vasinova Galiova, M., Zednikova Mala, P., Urbanova, V., Dobisikova, M., Beran, M., & Brestovansky, P. (2015). Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave - Case Report. *Anthropology*, 2, 138.



TECHNICAL NOTE

ANTHROPOLOGY

Pavla Zednikova Mala,^{1,2} M.Sc.

Pronasale Position: An Appraisal of Two Recently Proposed Methods for Predicting Nasal Projection in Facial Reconstruction*

ABSTRACT: This study examines two recently proposed methods for predicting nose projection from the skull, those developed by Stephan et al. (*Am J Phys Anthropol* 122, 2003, 240) and Rynn et al. (*Forensic Sci Med Pathol* 6, 2010, 20). A sample of 86 lateral head cephalograms of adult subjects from Central Europe was measured, and the actual and predicted dimensions were compared. Regarding nose projection (the anterior and vertical position of the pronasale), in general, the method of Rynn et al. (*Forensic Sci Med Pathol* 6, 2010, 20) was found to perform better and with less error variance than the method of Stephan et al. (*Am J Phys Anthropol* 122, 2003, 240), but the mean difference between the actual and predicted values did not exceed 2.2 mm (6.5% of the actual dimension) in most of the variables tested. The vertical dimensions of the nose were predictable with greater accuracy than the horizontal dimensions. Although the mean error of both methods is not great in practice and thus both methods could be considered to be “accurate,” the real variance of error should not be overlooked.

KEYWORDS: forensic science, forensic anthropology, facial reconstruction, facial approximation, soft tissue prediction, nose projection, accuracy test

Facial reconstruction (FR) or facial approximation (FA) refers to the process of rebuilding facial features onto the skull of an unknown individual. It is used in forensic anthropology as an aid to identification by promoting facial recognition, while in an archaeological or paleobiological context, it is used mainly to visualize the face of a person who lived in the past. There are several techniques for recreating a face over a skull involving two-dimensional (2D) drawing (1), 2D computer-assisted techniques (2,3), 3D sculptural (manual or virtual) (4–9), and 3D computerized techniques (10–12).

Recently, interest in FR methods has increased, especially in testing the accuracy of traditional principles and proposing new, “more accurate” ones, for example, prediction guidelines for globe projection (13–16), the position of the superciliare (17), lip dimensions (18,19), and nose projection (20–22). In fact, the latter method, nose projection, has attracted the attention of many scientists involved in FR/FA.

Although the form and dimensions of the nose in a frontal view are considered to be of relatively little significance for recognition (23,24) compared to other features of the face, nasal morphology is important mainly in cases in which a lateral 2D or a three-quarter or full rotation of a 3D reconstructed head is presented (21). However, in cases in which only a frontal view

of a 2D reconstructed face is presented, features directly visible only in a lateral view, such as nasal projection and nose tip direction, the form of the nasal profile and the height of the nasal root, also play an important role. These features influence the visualization and perception of the shape of the nose in a frontal view through lighting and shadowing, which in 2D drawings or composite imagery presenting a face from a frontal view must be placed correctly according to lateral FA/FR.

Currently, there are seven disparate methods for predicting the soft tissue dimensions of the nose, especially nose projection (4,20,22,25–27). Using such multiple prediction guidelines may result in different forms of the predicted feature (20,21,28). Most recently, accuracy tests were conducted with the hope of establishing a single definitive working method for predicting nasal projection. These tests revealed (20,21) that many of the traditionally used methods underestimate or overestimate nose projection; therefore, it was suggested that some of these methods be abandoned. However, even the results of these accuracy tests differ from each other. Finally, new methods were proposed, so the number of prediction guidelines for this facial feature increased to the current seven techniques.

New methods were developed by Stephan et al. (20) and Rynn et al. (22). Both of these methods are based on regression models using various cranial dimensions for the prediction of soft nose projection. These methods have not been sufficiently tested on larger samples; therefore, both authors claim the need for testing to confirm the robustness of their proposed principles. The aim of this study was to apply these recently proposed prediction guidelines for nose projection, which are considered to be more precise than some traditional techniques, to a Central European sample to test the accuracy and applicability of these two new methods, to determine whether they are robust enough

¹Department of Anthropology and Human Genetics, Charles University in Prague, Viničná 7, 128 43 Prague 2, Czech Republic.

²Department of Anthropology and Biology, Institute of Criminalistics Prague, Bartolomějská 12, 11000 Prague 1, Czech Republic.

*Supported by the Research Project MSM 0021620843 from the Ministry of Education, Youth and Sports of the Czech Republic.

Received 28 Sept. 2011; and in revised form 30 Jan. 2012; accepted 6 May 2012.

to be used in other samples, to decide which of these two methods performs “better,” and possibly to recommend which one should be used preferentially.

Materials and Methods

The sample was composed of lateral head cephalograms of 86 healthy adult subjects of Central European descent (52 males, aged between 21 and 43 years; mean age, 30 years; 34 females, aged between 19 and 39 years; mean age, 21 years). The X-ray images were made between 1977 and 1992 at the Stomatology Clinic, Kralovske Vinohrady, in Prague, Czech Republic. As this sample was used as controls in studies of patients with congenital craniofacial defects, all the probands had to be without obvious facial disharmony or reverse occlusion as well as never having undergone orthodontic treatment. Thus, the sample was not biased toward those individuals requiring any orthodontic treatment.

The lateral X-ray films were taken under standard conditions: centric occlusion and the proband’s head fixed in a stable position with cephalostat. The focus-film distance was always 400 cm, and the object-film distance was 30 cm. Also, the extent of enlargement was always constant—8.1% (29). One of important advantages of teleroentgenography is its very small distortion and the sharp contours of the displayed structures (30).

One tracing was made of each cephalogram, including both soft tissue and bony facial profiles, using a 0.5-mm HB retractable pencil and a fluorescent light box in a darkened room with aperture style shields to remove excess light generated by the light box. The Frankfurt horizontal plane (FHP) was recorded on each tracing as well. Each tracing was digitalized with a scale by a 2D table scanner at 300 dpi resolution so that 1:1 images were obtained, which could be stored and used for further research. The tracings were then processed in Adobe Photoshop CS2 (Adobe Systems Incorporated, San Jose, CA) to create a tracing just of the hard-tissue profile, especially for drawing the nasal spine line and measuring the nasal spine angle under blinded conditions. The linear dimensions of the bony and soft tissue nose were measured using the measuring tool in Adobe Photoshop CS2 and were then corrected with regard to the 8.1% enlargement. All of the measured and registered linear dimensions and angles were published in Stephan et al. (20) and Rynn et al. (22) and are shown in Figs 1 and 2. The most anterior point of the nose (i.e., the pronasale) was determined by bisecting the curve of the anterior-most tip of the nose, as determined by sliding a perpendicular anteriorly along the plane of the Frankfurt horizontal (20).

The methods to be tested were the methods proposed by Stephan et al. (20) and Rynn et al. (22), both based on regression analysis of the bony nose dimensions, subsequently referred to as method 1 and method 2. Method 1 (20) was developed on a sample of lateral cephalograms of 59 individuals (29 males, 30 females) of Australians of European extraction and also included patients thought to require orthodontic treatment (malocclusion, prognathism/retrognathism, or pre/postoperative). Method 2 (22) was based on a sample of lateral cephalograms of 60 subjects of European ancestry mixed with computer tomography (CT) scans of the heads of 79 subjects of varied ancestry (the majority of individuals were of European ancestry, while 29 individuals were of African or Central Asian ancestry). Both samples consisted of adult individuals under the age of 50 years. The measured actual hard tissue and the predicted soft tissue dimensions of the nose are illustrated in Figs 1 and 2.

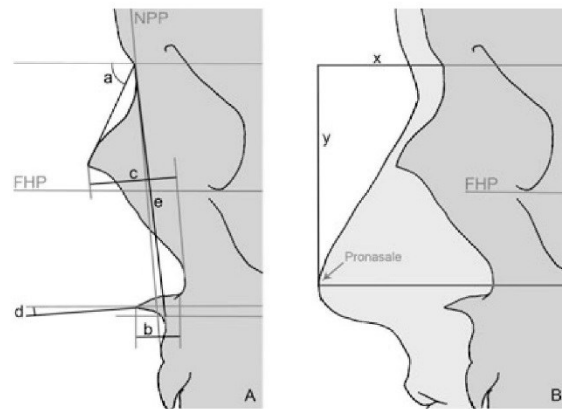


FIG. 1—(A) Dimensions of the bony nose used for predicting the position of the pronasale according to Stephan et al. (20). *a* = nasal bone angle measured from the nasion to the rhinion, from the Frankfurt horizontal plane (FHP), *b* = distance from the tip of the nasal spine (acanthion) to the border of the nasal aperture at its base, *c* = distance from the rhinion to the most posterior point on the nasal aperture border measured perpendicular to the nasion–prosthion plane, *d* = nasal spine angle measured from the FHP, *e* = distance of point X from the nasion along the line connecting the nasion and point A (the most posterior point of the upper jaw contour from the acanthion to the prosthion. Point X is situated on the nasion point A line at the level of point AA, a point located midway along the inferior slope of the anterior nasal spine). The last measurement is defined in George (25). (B) Predicted position of the pronasale according to Stephan et al. (20) in the FHP. *x* = projection of the pronasale from the nasion in the FHP, *y* = height of the pronasale (vertical position) from the nasion in the FHP.

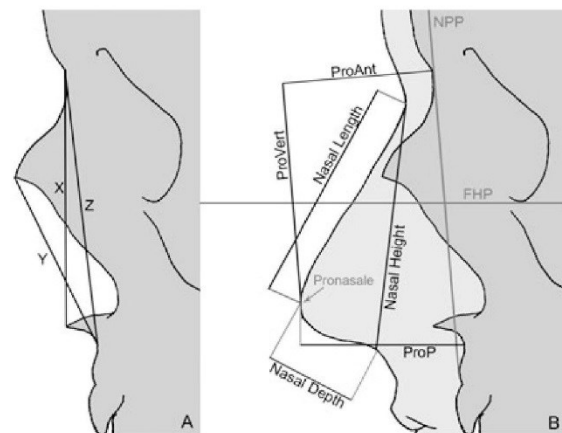


FIG. 2—(A) Dimensions of the bony nose used for predicting the position of the pronasale according to Rynn et al. (22). *X* = nasion–acanthion distance, *Y* = rhinion–subspinale distance, *Z* = nasion–subspinale distance. (B) Predicted the position of the pronasale and the predicted dimension of the soft nose according to Rynn et al. (22). *ProAnt* = pronasale anterior, anterior projection from the nasion in the nasion–prosthion plane (NPP), calculated using regression equation 1, *ProVert* = pronasale vertical, vertical height down from the nasion in the NPP, calculated using regression equation 2, *ProP* = pronasale projection from the subspinale in the Frankfurt horizontal plane (FHP), calculated using regression equation 3, *Nasal Length* = nasion–pronasale calculated using regression equation 4, *Nasal Height* = nasion–subnasale calculated using regression equation 5, *Nasal Depth* = pronasale–subnasale calculated using regression equation 6.

Statistical analyses were conducted using Statistica 7.0. (StatSoft, Inc., Tulsa, OK). The descriptive statistics and correlations were calculated, and the actual and predicted measurements were compared using the appropriate *t*-test at the $p < 0.05$ and $p < 0.01$ levels of statistical significance. Not all of the variables were sex dependent (although the majority were, with the exception of the dimensions [a], [b], and [c], the actual nasal depth and the actual pronasale height in the FHP), so the data were analyzed both separately for males and females as well as irrespective of sexual differences, especially for the variables *y*, ProAnt, ProVert, ProP, and Nasal Length, as the regression equation for *y* (method 1) and equations 1–4 (method 2) are not sex specific, to enable the comparison of our results with those of earlier researchers (20–22).

Results

Method 1

In the studied sample, the actual average position of the pronasale in the FHP was in males: pronasale projection in the FHP (x) = 33.5 mm, SD = 3.8 mm; pronasale height in the FHP (y) = 44.1 mm, SD = 4.3 mm; and in females: pronasale projection in the FHP (x) = 30.4 mm, SD = 2.4 mm; pronasale height in the FHP (y) = 42.3 mm, SD = 4.1 mm. The pronasale height in the FHP (y) was not statistically significantly different between the sexes ($p > 0.05$), while the anterior projection of the pronasale (x) differed significantly ($p < 0.05$) between males and females.

The results of the comparison between the actual and predicted values for method 1 are shown in Table 1. In general, this method underestimates the average nose projection in the FHP (x) (in reality, the nose is more prominent) and overestimates the average vertical position of the pronasale (y) (in reality, it is positioned more upward) in both sexes. The proposed equations performed better in females than in males. The difference between the actual and predicted pronasale height (y) was not found to be statistically significant in females at the 0.05 level, and also the predicted nose projection (x) in females did not differ from the actual value at the 0.01 level. On the other hand, even though the differences between the actual and predicted values were statistically significant for both x and y in males

TABLE 1—Comparison of the predicted and actual values of nasal projection using the method of Stephan et al. (20).

	Males (n = 52)		Females (n = 34)	
	<i>x</i> Value	<i>y</i> Value	<i>x</i> Value	<i>y</i> Value
Actual mean (mm)	33.49	44.13	30.35	42.33
Standard deviation (mm)	3.81	4.27	2.36	4.10
Predicted mean (mm)	31.35	45.50	29.52	43.04
Standard deviation (mm)	2.43	2.81	2.09	2.90
Mean difference (mm)	-2.14*	1.37*	-0.83**	0.71
SD of difference	3.07	2.95	2.09	2.28
<i>p</i> -Value (<i>t</i> -test)	0.00	0.00	0.02	0.07
Correlation	0.59*	0.73*	0.56*	0.84*
Correlation <i>p</i> -value	0.00	0.00	0.00	0.00
Mean difference as a percentage of the actual dimension	6.34	3.10	2.74	1.68

*Indicates a significant difference at both the 0.05 level and at the 0.01 level.

**Indicates a significant difference at the 0.05 level only.

($p < 0.05$), they just slightly exceeded 2 and 1.3 mm, respectively. Such a mean difference represents 6.3% and 3.1% of the actual anterior and vertical position of the pronasale, respectively. When analyzed together for both sexes (as the regression equation for the vertical position of the pronasale is not sex specific), the vertical position of the pronasale was overestimated by 1.1 mm (significant at the 0.05 level). Table 1 also shows that the prediction guideline for the vertical position of the pronasale (y) works better than the prediction guideline for the anterior projection of the nose (x).

The correlation between the actual and predicted values of nasal projection is significant in both sexes, although the correlation is much higher for the pronasale height (y) than for the anterior nasal projection (x) in both sexes; it seems that the link (although not necessarily a causal link) between the craniometric measurements and the predicted dimensions is similar in both males and females in this sample, especially for the anterior nasal projection (x).

Method 2

The actual average position of the pronasale defined in the NPP (i.e., the nasion–prsthion plane; as method 2 suggests) in the studied sample was in males: pronasale projection in the NPP (ProAnt) = 32.2 mm, SD = 2.3 mm; pronasale height in the NPP (ProVert) = 44.9 mm, SD = 3.5 mm; and in females: pronasale projection in the NPP (ProAnt) = 29.2 mm, SD = 2.1 mm; pronasale height in the NPP (ProVert) = 43.2 mm, SD = 3.4 mm. Both dimensions differed significantly ($p < 0.05$) between the sexes.

Tables 2 and 3 show the results of the comparison between the actual and predicted values for method 2 separately for males and females. Regarding the first two regression equations, and when analyzed for both sexes together (the proposed equations did not distinguish between the sexes), this method in general underestimates the average nose projection in the NPP (mean difference ProAnt = -1.3 mm, SD = 2.4 mm, significant at the 0.05 level), while the average vertical position of the pronasale in the NPP (ProVert) is equal to its real position (mean difference ProVert = 0.04 mm, SD = 2.2 mm, insignificant at the 0.05 level). If we compare the actual and predicted values for anterior projection and the vertical position of the pronasale defined in the NPP separately for both sexes (as shown in Tables 2 and 3), the results are similar: anterior projection in the NPP is underestimated a little bit more in males (the nose is actually more prominent, but only by about 1.4 mm in males and 1.3 mm in females, which represents *c.* 4.5% of the actual dimension), and the vertical position of the pronasale in the NPP is slightly overestimated in males (it is situated lower using this method than in reality) and underestimated in females (it is situated higher using this method than in reality). The differences in vertical position are so small that they are not statistically significant in either males or females.

The correlation between the actual and predicted values of the pronasale height (ProVert) is high and significant for both sexes, while the correlation between the actual and predicted values of the anterior projection (ProAnt) is much lower and in females even statistically insignificant. It is obvious that the prediction guideline for the vertical position of the pronasale in the NPP works better than the prediction guideline for the anterior projection of the nose in the NPP.

The prediction guideline for nose projection from the subnasale in the FHP (ProP) performs the worst, both when analyzed separately for the two sexes (see Tables 2 and 3) and also when analyzed together (mean difference ProP = -2.3 mm,

TABLE 2—Comparison of the predicted and actual values of nasal projection and nasal dimensions using the method of Rynn et al. (22) in males.

Number of Regression Equation Variable	1 ProAnt	2 ProVert	3 ProP	4 Nasal Length	5 Nasal Height	6 Nasal Depth
Actual mean (mm)	32.12	44.92	34.45	48.19	53.81	20.08
Standard deviation (mm)	2.34	3.47	2.25	3.63	3.75	2.12
Predicted mean (mm)	30.70	45.26	32.32	46.19	54.50	21.48
Standard deviation (mm)	2.28	3.09	2.55	2.85	3.00	1.10
Mean difference (mm)	-1.42*	0.34	-2.14*	-1.99*	0.69	1.40*
SD of difference	2.54	2.32	2.77	3.10	2.62	2.29
<i>p</i> -Value (<i>t</i> -test)	0.00	0.30	0.00	0.00	0.06	0.00
Correlation	0.39*	0.76*	0.34*	0.56*	0.72*	0.10
Correlation <i>p</i> -value	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.49
Mean difference as a percentage of the actual dimension	4.42	0.76	6.21	4.13	1.28	6.97

*Indicates a significant difference at the 0.05 level.

TABLE 3—Comparison of the predicted and actual values of nasal projection and nasal dimensions using the method of Rynn et al. (22) in females.

Number of Regression Equation Variable	1 ProAnt	2 ProVert	3 ProP	4 Nasal Length	5 Nasal Height	6 Nasal Depth
Actual mean (mm)	29.20	43.23	31.80	45.89	51.75	19.33
Standard deviation (mm)	2.05	3.38	2.29	3.56	3.22	1.33
Predicted mean (mm)	27.88	42.82	29.16	44.28	51.72	20.40
Standard deviation (mm)	2.16	2.77	2.42	2.80	2.38	1.30
Mean difference (mm)	-1.31*	-0.41	-2.64*	-1.62*	-0.03	1.08*
SD of difference	2.47	1.93	2.60	3.00	2.47	1.65
<i>p</i> -Value (<i>t</i> -test)	0.00	0.22	0.00	0.00	0.94	0.00
Correlation	0.31	0.82*	0.39*	0.58*	0.65*	0.21
Correlation <i>p</i> -value	0.07	0.00	0.02	0.00	0.00	0.22
Mean difference as a percentage of the actual dimension	4.49	0.95	8.30	3.53	0.06	5.89

*Indicates a significant difference at the 0.05 level.

SD = 2.7 mm, significant at the 0.05 level). The nose projection in the FHP (ProP) is underestimated similarly to the projection in the NPP (ProAnt), but the mean difference represents 6.2% or 8.3% of the actual value, respectively.

Looking at the predicted soft nose dimensions, regression equations 4–6 provide several results. The nasal length is predicted with a similar accuracy as the anterior projection in the NPP: the mean difference represents about 4% of the actual nasal length. When analyzed for both sexes together, the length is underestimated by about 1.8 mm, with SD = 3 mm. The best results are provided by the nasal height prediction equation, as they did not differ from the actual values at the 0.05 level (in both sexes separately). In females, this prediction guideline works better than in males, and the mean error represents only 0.06% of the actual nasal height in females, compared to 1.3% in males. On the other hand, the nasal depth is overestimated in both females and males, and the differences are statistically significant at the 0.05 level. Although the result is not the worst among all of the equations (in terms of the absolute values), the mean difference of 1.4 mm in males represents nearly 7% of the actual nasal depth. The correlation between the actual and predicted nasal depth is the weakest among the tested dimensions and is insignificant, which reflects the quite poor link between the skeletal dimension rhinion–subspinale (*Y*) and the actual nasal depth. In fact, the partial correlations of nasal depth with the bony dimensions used in method 2 (*X*, *Y*, *Z*) are very low in this sample ($r_X = 0.17$, $r_Y = 0.21$, $r_Z = 0.16$).

Discussion

The accuracy of method 1 was first tested by the authors (20), who used regression equations to position the pronasale on the

skulls of the same sample that the regression equations were generated from (the method of validation is not mentioned). According to Stephan et al. (20), their method yielded very good results (mean difference $x = 0.2$ mm, SD = 2.7 mm, mean difference $y = 0.4$ mm, SD = 2.3 mm in males; mean difference $x = -0.1$ mm, SD = 2.6 mm, mean difference $y = -0.3$ mm, SD = 2.0 mm in females). The other accuracy test of nose projection in the FHP (*x*), estimated according to method 1, was performed by Rynn and Wilkinson (21). They used a different sample of 63 individuals of European ancestry from Great Britain (25 males, 38 females). The nose projection in the FHP (*x*) was predicted with an average result that was within the range of those predicted by the other tested methods (mean difference $x = -2.2$ mm, SD = 4.9 mm in males and mean difference $x = -1.1$ mm, SD = 3.2 mm in females). The vertical height of the pronasale in the FHP (*y*) was not included in their accuracy test.

Comparing our results with the work carried out by Stephan et al. (20), method 1 showed less accuracy in our case. This finding could be expected as a result of the fact that Stephan et al. (20) tested their regression equations on the same sample they were derived from. As for the accuracy test conducted by Rynn and Wilkinson (21), our values of anterior nose projection are very similar to those presented by these authors, although method 1 performed a little bit better in our Central European sample. Similarly, method 1 performed better in females. However, different results regarding the correlation coefficient between the actual and predicted dimensions were obtained, as Rynn and Wilkinson (21) found no correlation in males ($r = 0.07$).

The validity of method 2 proposed by Rynn et al. (22) was previously quantitatively tested by the authors on CT head data of only five subjects (two males, three females) with European

ancestry from Belgium (mean difference ProAnt = -0.5 mm; mean difference ProVert = -0.4 mm, mean difference ProP = -0.2 mm; mean difference of Nasal Length = -1.5 mm; mean difference of Nasal Height = 1.2 mm in males, -0.8 in females; mean difference of Nasal Depth = 0.9 in males, -0.8 in females). Regarding these validation results, Rynn et al. (22) commented that the proposed regression equations performed to a good level of accuracy with only five estimation errors (from 30 estimations) exceeding a range of ± 2 mm, with the largest error being 2.5 mm.

In comparison with the findings of Rynn et al. (22), method 2 provided slightly worse results when applied to our sample, apart from the equations for the vertical position of the pronasale and the nasal height, which performed better in our sample. In general, the mean differences in the present study between the actual and predicted dimensions do not differ from those of Rynn et al. (22) by more than 1 mm; in two cases (anterior projection of the nose in the FHP and nasal depth in females), the mean differences were greater, but still did not exceed 2.1 mm.

Having compared the two methods, the results show that both methods underestimate the anterior nasal projection by a small amount. While in males better results with a smaller standard deviation are obtained using method 2 (22), method 1 (20) estimates the anterior nasal projection more accurately in females. However, the difference between the two methods is too small to be statistically significant at the 0.05 level. Looking at the results of the predicted vertical position of the pronasale, method 2 shows better results than method 1, especially in males, and the results of these two methods differ significantly at the 0.05 level.

To summarize, using method 1 will result in the reconstructed noses being less prominent and more “down turned/positioned” in profile. Using method 2, the reconstructed noses will be less prominent as well, although the “tip of the nose (in the NPP)” will be at the same vertical position as in reality. From the statistical point of view, the only dimension predicted more accurately using method 1 is the anterior nose projection in females; the other dimensions are reconstructed more accurately using method 2.

The statistical analysis of the mean differences between the actual and predicted dimensions as used in this study was similar to that used in previous tests of the accuracy of the nose projection prediction guidelines (20,21). Comparing mean values, the computed errors seem to be small and insignificant in practice, and both methods could be considered to be more or less accurate (from a practical point of view). Considering all the variables that could influence the accuracy of the estimated pronasale position by several mm (e.g., measuring error, the thickness of a line drawn with a pencil, or more or less intense pressure when modeling with clay), worrying about such an error (1 – 2 mm) seems to be pointless.

On the other hand, an interpretation based only on the mean values should be treated with caution. If we consider the total range of possible error in estimating the position of the pronasale in males, for example, we could reconstruct the anterior nose projection with a ± 3.1 -mm error, that is, a range of 6.2 mm, using method 1, or a ± 2.5 -mm error, that is, a range of 5 mm, using method 2, according to one and the same skull. Such a range of possible error represents 18.5% (method 1) or 15.5% (method 2) of the actual anterior nose projection, which in our opinion should not be ignored and which could in reality influence the recognition result in a particular case. Looking at the spatial distribution of single differences around the zero coordinates (Fig. 3), it is obvious that the range is rather wide. However, comparing the distribution of the reconstructed pronasale position in single individuals as displayed in Fig. 3, method 2 again shows less dispersion of the predicted values from a zero difference than does method 1.

What do the results of the statistical analysis mean in practice? Is a statistically significant difference to the same as a “practical” or “recognizable” difference? How large is an acceptable error? These questions are difficult to answer. The size of an “acceptable error” should first be assessed, for example, by conducting a face recognition experiment, but this was not the purpose of this study. Wilkinson et al. (31), Wilkinson (8), and Rynn et al. (22) used as the “criterion for accepted error” or the “reliability of reconstructed feature” a value of 2 or 2.5 mm. However, they did

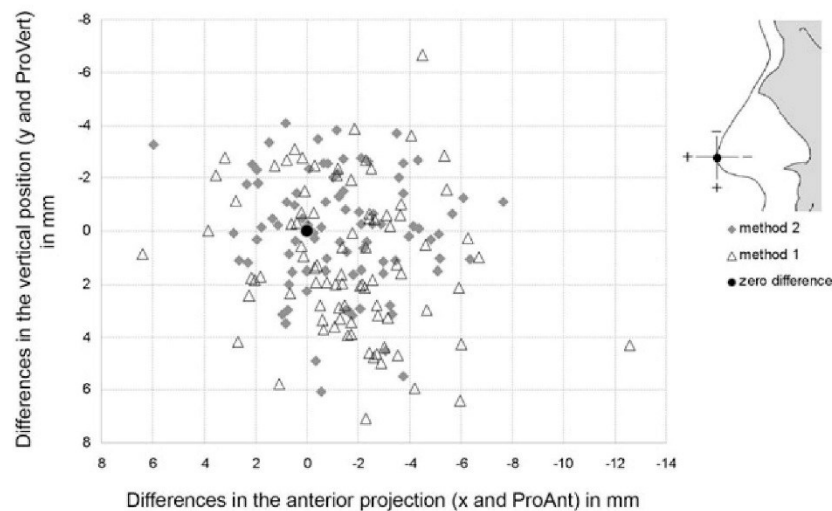


FIG. 3—Spatial distribution of the differences in the anterior and vertical position of the pronasale. Each point represents one individual and the position of his/her most prominent point on the nose predicted according to method 1 (20) and method 2 (22).

TABLE 4—The percentage of individuals whose pronasale position and nasal dimensions were reconstructed within a 2-mm error and within a 5% error from the actual dimension.

	x	y	ProAnt	ProVert	ProP	Nasal Length	Nasal Height	Nasal Depth
Total sample (n = 86)								
% of cases within a 2-mm error	45	44	53	62	37	44	63	59
% of cases within a 5% error	38	52	45	66	26	53	78	30
5% error (mm)	±1.6	±2.2	±1.6	±2.2	±1.6	±2.3	±2.7	±1.0
Males (n = 52)								
% of cases within a 2-mm error	39	40	50	60	40	39	60	52
% of cases within a 5% error	31	46	40	65	33	48	70	23
5% error (mm)	±1.7	±2.2	±1.6	±2.3	±1.7	±2.4	±2.7	±1.0
Females (n = 34)								
% of cases within a 2-mm error	54	49	57	66	32	51	69	69
% of cases within a 5% error	46	60	46	66	17	57	80	37
5% error (mm)	±1.5	±2.1	±1.5	±2.2	±1.6	±2.3	±2.6	±1.0

not clarify why they chose 2 mm or 2.5 mm. An error of 2 mm could represent a much different proportion of particular dimensions. In our opinion, it might be more suitable to estimate the limit for "error acceptance" in relation to the actual size of a particular dimension (e.g., 5% or 10%). Table 4 demonstrates the effect of specifying a 2-mm error in comparison with an error equaling 5% of the actual dimension in this sample. It shows the percentage of individuals whose pronasale position and nasal dimensions were reconstructed within a 2-mm or 5% error. The presented values again indicate that method 2 provides better results, no matter which criterion is used. Thus, it could reasonably be concluded that method 2 is more effective.

Finally, comparing the methods from a "practical" perspective, we must agree with Rynn and Wilkinson (21) that using one linear dimension between clearly defined points measured directly on a skull, a lateral cephalogram or a photograph (method 2) is more user friendly than measuring several dimensions and angles (method 1), which is difficult to perform in the event that one does not possess a special goniometer designed for measuring angles directly on the skull. The only limitation of method 2 seems to be that it could not be used on edentulous skulls (with antemortem loosening of the teeth) because the anatomical position of the prosthesis is changed. In that case, another method has to be utilized.

The present test of two recently proposed methods for predicting nose projection from the skull revealed that both methods are robust enough to be applied to different samples with a good level of accuracy. We are aware of the fact that our sample is not representative of the whole population, and thus, the results of the present accuracy test cannot be generalized or treated as definitive. Nevertheless, the method of Rynn et al. (22) provided better results, and it could be reasonably preferred from both a statistical and a practical perspective.

Acknowledgments

The author thanks supervisors Prof. RN Dr. Zbynek Smahel, CSc., and RN Dr. Jana Velemínska, Ph.D., from the Department of Anthropology and Human Genetics of Charles University in Prague for their endless support, scientific advice, and valuable comments on a draft of this manuscript. Thanks go to the Stomatology Clinic, Kralovské Vinohrady in Prague, for the generation of X-ray images.

References

1. Taylor KT. Forensic art and illustration. New York, NY: CRC Press, 2001.

2. Ubelaker DH, O'Donnell G. Computer assisted facial reproduction. *J Forensic Sci* 1992;37(1):155–62.
3. Stratomeier H, Spee J, Wittwer-Backofen U, Bakker R. Methods of forensic facial reconstruction. In: Buzug TM, Sigl K, Prüfer K, Willems G, Hering P, Helmer R, Bongartz J, Hülster A, editors. *Book of Abstracts of the 2nd International Conference on Reconstruction of Soft Facial Parts*; 2005 Mar 17–18; Remagen. Remagen: Kreatrive Konzept, 2005;19.
4. Gerasimov MM. *Vosstanovlenie lica po cerepu*. Moskva: Izdat. Acad. Nauk SSSR, 1955.
5. Gatliff BP. Facial sculpture on the skull for identification. *Am J Forensic Med Pathol* 1984;5(4):327–32.
6. Gatliff BP, Snow CC. From skull to visage. *J Biocommun* 1979;6(2):27–30.
7. Prag J, Neave RAH. *Making faces*. London, UK: British Museum Press, 1997;12–40.
8. Wilkinson CM. Facial reconstruction—anatomical art or artistic anatomy. *J Anat* 2010;216(2):235–50.
9. Wilkinson CM. Computerized forensic facial reconstruction. *Forensic Sci Med Pathol* 2005;1(3):173–7.
10. Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, Suetens P. Craniofacial reconstruction using a combined statistical model of face shape and soft tissue-depths: methodology and validation. *Forensic Sci Int* 2006;159(Suppl. 1):S147–58.
11. Clement JG, Marks MK. *Computer-graphic facial reconstruction*. London, UK: Elsevier Academic Press, 2005.
12. Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, Clement JG, Suetens P. Computerized craniofacial reconstruction: Conceptual framework and review. *Forensic Sci Int* 2010;201(1–3):138–45.
13. Wilkinson CM, Mautner SA. Measurement of eyeball protrusion and its application in facial reconstruction. *J Forensic Sci* 2003;48(1):12–6.
14. Stephan CN. Facial approximation: globe projection guideline falsified by exophthalmometry literature. *J Forensic Sci* 2002;47(4):730–5.
15. Stephan CN, Davidson PL. The placement of the human eyeball and canthi in craniofacial identification. *J Forensic Sci* 2008;53(3):612–9.
16. Stephan CN, Huang AJR, Davidson PL. Further evidence on the anatomical placement of the human eyeball for facial approximation and craniofacial superimposition. *J Forensic Sci* 2009;54(2):267–9.
17. Stephan CN. Position of superciliare in relation to the lateral iris: testing a suggested facial approximation guideline. *Forensic Sci Int* 2002;130(1):29–33.
18. Wilkinson CM, Motwani M, Chiang E. The relationship between the soft tissue and the skeletal detail of the mouth. *J Forensic Sci* 2003;48(4):728–32.
19. Stephan CN. Facial approximation: an evaluation of mouth width determination. *Am J Phys Anthropol* 2003;121(1):48–57.
20. Stephan CN, Henneberg M, Sampson W. Predicting nose projection and pronasale position in facial approximation: a test of published method and proposal of new guidelines. *Am J Phys Anthropol* 2003;122(3):240–50.
21. Rynn C, Wilkinson CM. Appraisal of traditional and recently proposed relationships between the hard and soft dimensions of the nose in profile. *Am J Phys Anthropol* 2006;130(3):364–73.
22. Rynn Ch, Wilkinson CM, Peters HL. Prediction of nasal morphology from the skull. *Forensic Sci Med Pathol* 2010;6(1):20–34.
23. Haig ND. The effect of feature displacement on face recognition. *Perception* 1984;13(5):505–12.

24. Haig ND. Exploring recognition with interchanged facial features. *Perception* 1986;15(3):235–47.
25. George RM. The lateral craniographic method of facial reconstruction. *J Forensic Sci* 1987;32(5):1305–30.
26. Macho GA. An appraisal of plastic reconstruction of the external nose. *J Forensic Sci* 1986;31(4):1391–403.
27. Krogman WM, İşcan MY. *The human skeleton in forensic medicine*. Springfield, IL: Charles C. Thomas Publishers, 1986.
28. Mala P, Novotny V, Eliasova H. One man with many faces. Facial reconstruction of man X. In Buzug TM, Sigl K-M, Bongartz J, Prüfer K, editors. *Facial reconstruction. Gesichtsrekonstruktion*. Proceedings of the 2nd International Conference on Reconstruction of Soft Facial Parts; 2005 Mar 17–18; Remagen, Germany. München, Germany: Luchterhand, 2007;593–606.
29. Smahel Z, Brejcha M. Differences in craniofacial morphology between complete and incomplete unilateral cleft-lip and palate in adults. *Cleft Palate J* 1983;20(2):113–27.
30. Mackova K, Velemínska J. Craniometrical norms for recent Czech population intended for evaluation of the cranial size and shape using lateral X-ray films. *Antropologie* 2008;XLVI(1):15–28.
31. Wilkinson CM, Rynn Ch, Peters H, Taister M, How Kau Ch, Richmond S. A blind accuracy assessment of computer-modeled forensic facial reconstruction using computer tomography data from live subjects. *Forensic Sci Med Pathol* 2006;2(3):179–87.

Additional information and reprint requests:

Pavla Zednikova Mala, M.Sc.
Institute of Criminalistics Prague
Police of Czech Republic
Bartolomějská 12
11000 Prague 1
Czech Republic
E-mail: mala.mala@email.cz



TECHNICAL NOTE

PHYSICAL ANTHROPOLOGY

Pavla Zednikova Mala,^{1,2} M.Sc.; and Jana Velemínska,¹ Ph.D.

Vertical Lip Position and Thickness in Facial Reconstruction: A Validation of Commonly Used Methods for Predicting the Position and Size of Lips

ABSTRACT: This study examined several methods used to estimate oral fissure position, lip margin position, and lip thickness recommended by Angel, George, Lebedinskaya, Taylor, Wilkinson et al., Balueva and Veselovskaya. A sample of 86 lateral head cephalograms of adult subjects from central Europe were measured and the actual and predicted dimensions were compared. The best estimation for oral fissure position was “opposite the lower $\frac{3}{4}$ mark of maxillary incisors” (error of 1.3 mm). Upper lip margin was predicted best by “upper $\frac{1}{4}$ mark of maxillary incisors” (error of 1.7 mm), and lower lip margin by “cementum-enamel junction of mandibular incisors” (error of 2.3 mm). The regression equations of Wilkinson et al. displayed least error (1.3 mm and 1.8 mm, respectively) for upper and lower lip thickness, and method of George (error of 3.4 mm) for total lip thickness.

KEYWORDS: forensic science, forensic facial reconstruction, facial approximation, soft-tissue prediction, lip thickness, oral fissure position, accuracy test

Facial reconstruction (FR) or facial approximation (FA) is the recreation of the lost facial features of a deceased individual based on the characteristics of his or her skull. The aim of FR in a forensic context is to produce a reconstructed face of an unknown individual with sufficient likeness to stimulate recognition by the public and subsequently direct a forensic investigation. Whether the face is recognized and finally positively identified depends on many factors. The accuracy of the FR is one of them.

The accuracy of prediction guidelines for some facial features has been tested previously, e.g., nose projection (1–4), nose width (3), eye globe position (5–8), position of the *superciliare* point (9), ear size and morphology (10), and mouth width (11–13). Most interest has been focused on nasal morphology and eye globe position. The mouth region and position and height of lips have attracted less attention.

The mouth is a vital part of the face, and its correct size and position influence the resemblance of a reconstructed individual to the actual individual. Currently, the morphology of the mouth is an area of the face where there is more reliance on artistic interpretation (14). There are some standards for determination of mouth width (15–18), placement of the oral fissure (16,19–21), and lip thickness (12,15,16,20,21). Using these standards, we were able to estimate a bounded space situated above the

teeth where the lips should be positioned; however, the exact shape of the vermilion line (the upper margin of the red part of the upper lip) is difficult to predict with any degree of accuracy (22).

Above-mentioned methods used to predict upper and lower lip position and vertical thickness are based on regression analysis of teeth dimensions (12) or on direct measurements of teeth and calculating their portions (19,20) or simply on an evaluation of the position of craniometric/dental points (16,21). Following facial reconstruction guidelines for placement of the oral fissure, Angel (19) states that the mouth fissure (*stomion*, *S*, Fig. 1a) is positioned at the level of the midpoint of the upper incisor crowns. Lebedinskaya (16) recommends the placing of the mouth fissure opposite the cutting edge of the upper central incisors. George (20), who based his findings on a sample of 54 lateral craniographs of former orthodontic patients of Caucasian ancestry, localizes the oral fissure in between these two extremes. George (20) states that the mouth fissure cuts across the lower third (female mean) or quarter (male mean) of the maxillary central incisors. Balueva and Veselovskaya (personal communication; unpublished oral presentation performed at the Department of Anthropology, Faculty of Science, Masaryk University in Brno, Czech republic, 14th December 2004; the authors state: “When the upper central incisors overbite the lower central incisors, an oral fissure should be placed at the level of the cutting edge of the lower central incisors.”) relate the oral fissure position to the type of incisor occlusion. In case the incisal margins of the maxillary incisors occlude with incisal margins of mandibular incisors (*labiodontie*), Balueva and Veselovskaya are in agreement with the guideline proposed by Lebedinskaya (16). In case the incisal margins of

¹Department of Anthropology and Human Genetics, Charles University in Prague, Vinična 7, 12000, Prague, Czech Republic.

²Department of Anthropology, Biology and Physiodetection, Institute of Criminalistics Prague, Bartolomejska 12, 11000, Prague, Czech Republic.

Received 3 Dec. 2014; and in revised form 17 Aug. 2015; accepted 22 Aug. 2015.

the maxillary incisors overbite incisal margins of mandibular incisors (*psaliodontie*), the oral fissure should be placed opposite incisal margins of lower incisors. Finally, Taylor (21) does not provide a concrete guideline, but states that a good average placement for the parting line of the lips is slightly above the edges of the upper central incisors. With the exception of positioning the oral fissure according to George (20), none of the methods distinguishes between sexes. The described methods for oral fissure position prediction are illustrated in Fig. 2. Concerning lip margin position and related lip thickness, following Gerasimov's (23) protocols, Lebedinskaya (16) and Balueva and Veselovskaya (personal communication) place the upper lip margin (*labrale superior*, LS, see Fig. 1a) opposite the upper margin of maxillary central incisor crowns (*supradentale 1*, Sd1, see Fig. 1a), and the lower lip margin (*labrale inferior*, LI, see Fig. 1a) opposite the lower margin of mandibular central incisor crowns (*infradentale 1*, Id1, see Fig. 1a). This is in agreement with Taylor (21) and Gatliff (15). Taylor (21) states that the vertical thickness for the mouth is equal to the vertical distance of the upper cementum-enamel junction to the lower cementum-enamel junction. This is in contrast to George (20), who plotted LS opposite the upper quarter mark of the maxillary central incisor in both male patients and female patients, and placed LI opposite the lower three-quarter mark of the mandibular central incisor. Wilkinson et al. (12) based their lip thickness prediction guidelines on regression analysis of central incisor dimensions, which were measured directly on the living subjects with calipers (a sample of 80 subjects of Caucasian ancestry). They found positive correlation between the upper lip thickness and maxillary teeth height, lower lip thickness and mandibular teeth height, and total lip thickness and total teeth height (the last dimension was obtained as a sum of the upper incisor height and the lower incisor height). The described methods for lip margin position prediction are illustrated in Fig. 3.

Using such multiple prediction guidelines usually results in different approximations of the feature. It is difficult to decide which method to use without knowledge of each method's degree of error. As mentioned above, the accuracy of prediction guidelines for the width of the mouth fissure has been evaluated previously (11–13). The aim of this study was to test, using lateral head cephalograms, the accuracy of the methods proposed by six authors, as they were described above (12,16,19–21, and personal communication of Balueva and Veselovskaya), and that are commonly used in facial approximation to predict mouth fissure position and/or lip vertical thickness. The intent was to quantify the error in these guidelines and, based on these findings, recommend which methods should be used for central European populations.

Materials and Methods

The sample was based on the lateral head cephalograms of 86 healthy adult subjects of central European descent: 51 males, aged between 21 and 43 years (mean age 30 years), and 35 females, aged between 19 and 39 years (mean age 21 years). The X-ray images were made between 1977 and 1992 at the Stomatology Clinic, Kralovske Vinohrady, Prague, Czech Republic. As these images were used as controls in the study of patients with congenital craniofacial defects, the sample used had to be of individuals without obvious facial disharmony or reverse occlusion as well as never having undergone orthodontic treatment. Thus, the sample was not biased toward individuals requiring orthodontic treatment. As one of the tested methods (personal communication of Balueva and Veselovskaya) takes into consideration the type of incisor occlusion, we recorded type and frequency of this feature in the studied sample. *Psaliodontie* was recorded in 84% of individuals (78% of males and 91% of females) and *labiodontie* in 16% of individuals (22% of males and 9% of females).

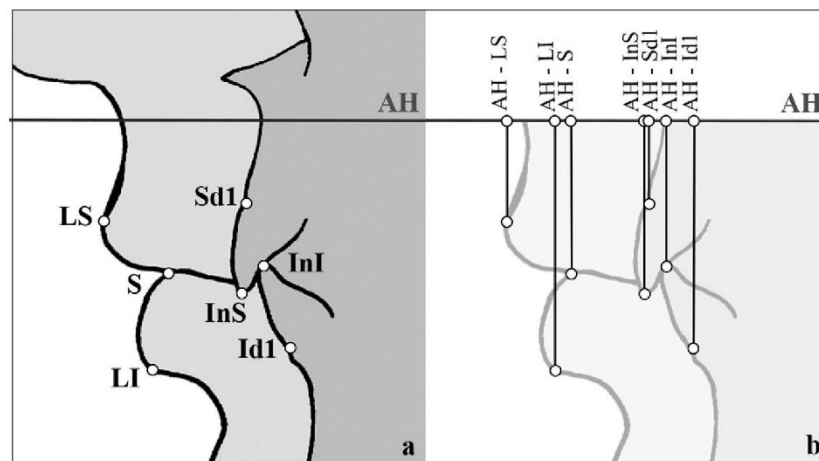


FIG. 1—Lateral contour of lip and teeth area displaying anthropometric points (a) used for measurement (b). (a) Definitions of the points were adopted from George (20) and Lebedinskaya (16). LS = labrale superior, the highest point in vermillion border of the upper lip. S = stomion, a point in the facial profile contour where upper lip meets lower lip. LI = labrale inferior, the lowest point in vermillion border of the lower lip. Sd1 = supradentale 1, a point in upper margin of maxillary incisor crown (cementum-enamel junction). InS = incision superior, a tip of maxillary incisor. InI = incision inferior, a tip of mandibular incisor. Id1 = Infradentale 1, a point in lower margin of mandibular incisor crown (cementum-enamel junction). AH = "A" horizontal, a line parallel to FHP crossing the deepest point of the maxillary lateral contour (point a). (b) — The measurements used to record the relative position of anthropometric points as the distance of the point from a reference line AH.

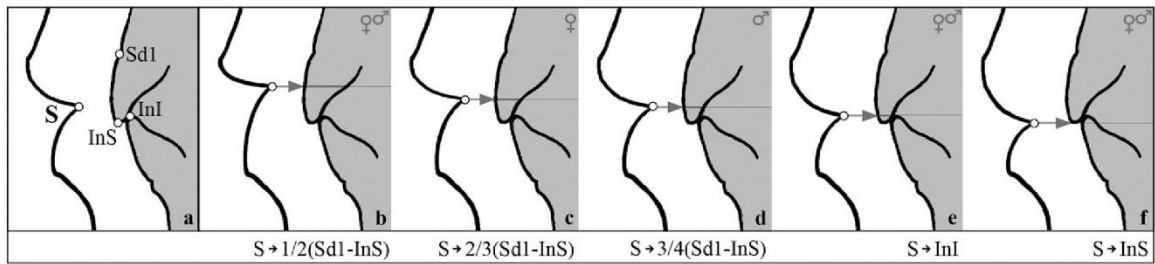


FIG. 2—Schematic illustration of methods used for reconstruction of oral fissure position (S). (a) Lateral contour of lip and teeth area displaying anthropometric points used for prediction of oral fissure position. Definitions of the points (S, Sd1, InS, InI) are described in the Fig. 1. (b) The method of Angel (19). (c) The method of George (20) for females. (d) The method of George (20) for males. (e) The method of Balueva and Veselovskaya (personal communication). (f) The method of Lebedinskaya (16).

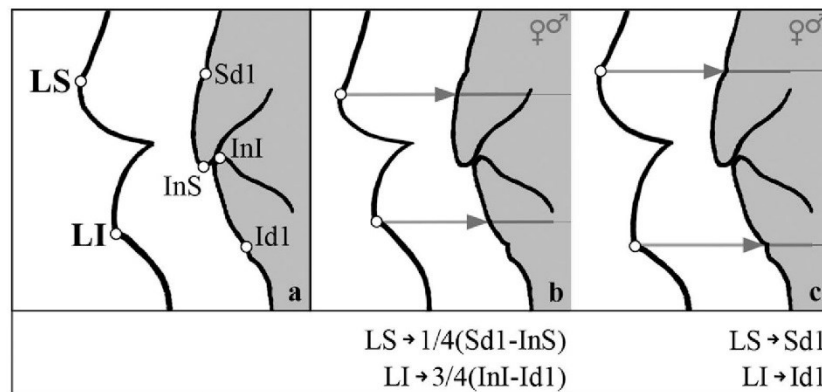


FIG. 3—Schematic illustration of methods used for reconstruction of upper and lower lip margin position (LS, LI). (a) Lateral contour of lip and teeth area displaying anthropometric points used for prediction of upper and lower lip margin position. Definitions of the anthropometric points (LS, LI, Sd1, InS, InI, Id1) are described in the Fig. 1. (b) The method of George (20). (c) The method of Lebedinskaya (16), Balueva and Veselovskaya (personal communication), and Taylor (21).

The lateral X-ray films were taken under standard conditions: centric occlusion and the patient's head were fixed in a stable position with a cephalostat. The focus–film distance was always 400 cm and the object–film distance was 30 cm; the extent of enlargement was always constant, at 8.1% (24). One of the important advantages of teleröntgenography is its very small distortion and the sharp contours of the displayed structures (25). An illustrative figure of the image product of teleröntgenography is displayed in Fig. 4.

Each cephalogram was digitized with a scale using a flatbed scanner at 300 dpi resolution so that 1:1 images were obtained that could be stored and used for further research. The cephalograms were then processed in Adobe Photoshop CS5 (Adobe Systems Incorporated, San Jose, CA) to adjust brightness and contrast and to rotate them along the Frankfurt horizontal plane (FHP). At first, the relative position of relevant anthropometric points (Fig. 1a) was recorded as the distance of the point from a reference line parallel to the FHP running across point A (the deepest point of the maxillary profile), referred to as AH (i.e., distances: AH–Sd1, AH–InS, AH–InI, AH–Id1, AH–LS, AH–S, AH–LI, see Fig. 1b). All distances were measured perpendicular to FHP using the measuring tool in Adobe Photoshop CS5 (Adobe Systems Incorporated) and were then corrected with regard to the 8.1% enlargement. Subsequently, these corrected

measurements were used to calculate the actual vertical dimensions of the teeth and soft-tissue lips (e.g., actual maxillary incisor height was calculated as a difference between measurements AH–InS and AH–Sd1). The calculations were checked by measuring the corresponding actual dimensions of teeth and lips on the digitized cephalograms of ten individuals from the studied sample. Following tested methods, the position of reconstructed oral fissure and lip margins is derived from actual teeth dimensions or as a counterpart of the specific anthropometric point (see Figs 2 and 3). Thus, the facial reconstructions need not be drawn to validate the methods, but just the position of reconstructed mouth fissure and lip margins could be calculated for each of the methods from the actual relative position of anthropometric points, which was recorded at the first step (e.g., position of LS reconstructed according to George (20) was calculated as: (distance AH–Sd1) + (distance Sd1–InS) / 4). The actual position of *stomion*, *labrale superior*, and *labrale inferior* (in relation to AH) was then compared with the predicted (reconstructed) position of mouth fissure and lip margins (calculated in relation to AH as well). Similarly, predicted thickness (i.e., height) of the lips was calculated from position of reconstructed *stomion*, *labrale superior*, and *labrale inferior* and then compared with the actual dimensions. Calculations were processed in MS Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA). The

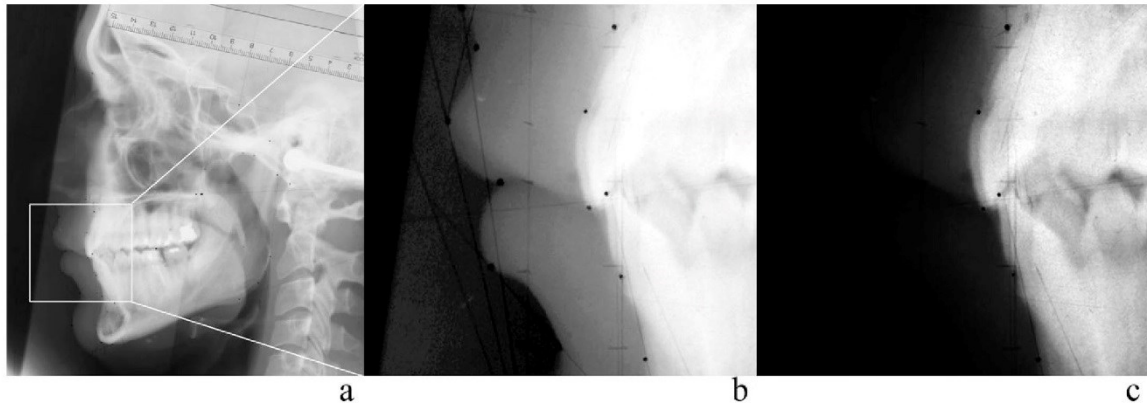


FIG. 4—Illustrative figure of the image product of teleroentgenography. (a) Overall view of the facial skeleton and soft-tissue contour. (b) Detailed view of the oral region; adjustments made to highlight soft tissues. (c) Detailed view of the oral region; adjustments made to highlight bone tissues and teeth.

design of calculations was processed independently by both of the authors (P.Z.M. and J.V.) and the results were compared in ten individuals from the studied sample to check their correctness. For the purpose of this technical note, all terms concerning lips, i.e., height, thickness, margins, etc., refer to the red/mucosal part of the lips, and all terms concerning teeth refer to the central incisor crowns.

Statistical analyses were conducted using Statistica 7.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK). Differences in actual dental and soft-tissue lip dimensions between sexes were studied using a one-way analysis of variance. The descriptive statistics and correlations between lip and teeth height were calculated and the actual and predicted measurements (mean values) were compared using the appropriate t-test. Level of statistical significance was set, at the $p < 0.05$, but altered according to Bonferroni adjustment. Positive mean difference indicates that the method overestimated and that the reconstructed feature was positioned higher or reconstructed dimension was larger than the actual one. Negative mean difference indicates the opposite. Error magnitude for each of the prediction guidelines was further calculated as mean of the absolute difference values. These mean absolute errors were then evaluated as a percentage of the average actual size of the particular feature. To consider individual cases and to describe the results of each method in more detail, proportions of individuals whose reconstructed features showed higher, lower, or equal (i.e., ± 0.1 mm difference) position/values compared with the actual position/measurements were calculated.

Results

The anthropometric results are displayed in Table 1. In the sample studied, the average actual height/thickness of the lower lip showed no significant difference between the sexes, while the average actual upper lip thickness (and consequently total lip thickness) was found to be significantly greater in females than in males (mean difference 1.1 and 1.8 mm, respectively) (see Table 1). The dimensions of the upper and lower central incisors and total teeth height obtained as a sum of two former dimensions showed less variability between sexes than the lip dimensions. All the mean differences were found statistically not significant and did not exceed 0.4 mm (see Table 1).

Oral Fissure Position—The detailed results of the comparison between the actual and predicted oral fissure position are summarized in Table 2. The best estimation of mouth fissure position was obtained using the guideline of George (20) (mean absolute error 1.3 mm), and the guideline recommended by Balueva and Veselovskaya (personal communication) (mean absolute error 1.6 mm). Both of these methods slightly overestimated the position, but, in general, the mean difference of up to 0.5 mm was not statistically significant (see Table 2). It should be mentioned that testing the guideline of Balueva and Veselovskaya (personal communication), we did not distinguish between different types of occlusion in our sample, as the actual position of the *stomion* did not significantly differ between the groups (mean difference 1 mm, $p < 0.05$), and we applied the guideline on the whole sample. Oral fissure predicted according to Angel (19) was positioned too high (mean absolute error 3.0 mm), and that reconstructed according to Lebedinskaya (16) was too low (mean absolute error 2.6 mm); only one female (1% of the studied sample) showed a higher position of the *stomion* than the half mark of the maxillary incisors by only 0.1 mm and one male had the oral fissure positioned lower by 0.7 mm than the cutting edge of the maxillary incisors. The statement of Taylor (21), that oral fissure should be plotted above the cutting edges of the maxillary central incisors, was found to be true in 92% of males and 97% of females. Comparing the absolute mean errors separately for sexes, the best estimation of oral fissure position was provided by the method of George (20) for both males and females, although the mean difference between actual and predicted values was statistically significant for the female subsample (see Table 2).

Closer view of the results of the method of George (20) (see Table 2) revealed that the guideline for males provided results statistically not different from actual values in comparison with the guideline for females and that the reconstructed *stomion* should have been plotted further down in nearly three-quarters of the females in our sample. Therefore, the analysis of whether the different prediction guidelines for males and females were reasonable was conducted. It was found that the position of the *stomion* was not sex dependent in our sample and we applied the more accurate male prediction guideline to the female subsample. Shifting the reconstructed *stomion* further down increased the accuracy of the method in the female subsample.

TABLE 1—Lip and teeth height measurements and comparison of the mean values for teeth and lip dimensions of several anthropometry studies.

	Present study						Wilkinson et al. (12)						Farkas et al. (26)		
	Males		Females		Total		Males		Females		Total		Males	Females	Total
	n = 51		n = 35		n = 86		n = 49		n = 46		n = 95				
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	n = 109 Mean	n = 200 Mean	n = 309 Mean
Height (mm)															
Upper teeth	11.2	0.9	11.1	0.8	11.1	0.9	9.6	1.8	8.9	2.2	9.3	1.7			
Lower teeth	9.8	0.8	9.6	0.9	9.7	0.9	8.4	2.1	7.7	1.6	8.1	1.9			
Total teeth (a sum of upper and lower incisor height)	21.0	1.4	20.6	1.4	20.9	1.5	18.0	3.57	16.7	2.61	17.4	3.2			
Upper lip	5.8*	1.4	6.9*	1.3	6.3	1.4	6.1	2.2	6.2	1.5	6.1	1.9	8.0	8.7	8.5
Lower lip	8.5	2.2	9.2	1.9	8.8	2.1	9.4	2.3	8.5	2.2	9.0	2.2	9.3	9.4	9.4
Total lips	14.3*	3.0	16.1*	2.9	15.1	3.1	15.4	4.2	14.7	3.4	15.1	3.8	17.3	18.1	17.8

*Indicates a statistically significant difference between sexes ($p < 0.007$, equivalent to $p < 0.05$ after Bonferroni adjustment).

TABLE 2—Comparison of the results of several methods for oral fissure position prediction applied on the studied sample (n = 86, males = 51, females = 35).

Reconstructed feature	Angel (19)			George (20)			Balueva and Veselovskaya (personal communication)			Lebedinskaya (16)			
	Males	Females	Total	Males	Females	Total	Males	Females	Total	Males	Females	Total	
Oral fissure position (Sr ¹)													
Mean difference (mm)		3.2*	2.6*	3.0*	0.4	0.8*	0.6*	0.5	0.5	0.5	-2.4*	-2.9*	-2.6*
SD of difference		1.5	1.2	1.4	1.6	1.2	1.4	1.9	1.9	1.9	1.6	1.4	1.5
Mean of the absolute error values (mm)		3.2	2.6	3.0	1.4	1.2	1.3	1.5	1.5	1.6	2.4	2.9	2.6
Rate of overestimated cases [†] (%)		100	97	99	57	71	63	55	46	51	2	0	1
Rate of underestimated cases [‡] (%)		0	3	1	43	26	36	39	43	41	92	97	94
Rate of cases with zero difference (%)		0	0	0	0	3	1	6	11	8	6	3	5

*Indicates a statistically significant difference from actual values ($p < 0.004$, equivalent to $p < 0.05$ after Bonferroni adjustment).

¹S = Stomion; r = reconstructed; Overestimated = reconstructed point is situated above the actual position; Underestimated = reconstructed point is situated below the actual position.

(mean difference -0.2 mm, SD of difference 1.3 mm, not significant at $p < 0.05$, mean absolute error 1.0 mm).

In addition, the average actual position of the *stomion* in our sample corresponded to the mark plotted at 23% (SD = 13%) of the upper incisor height (measured from the cutting edge upward), but the variance of actual oral fissure position was rather large.

Lip Margin Position

Table 3 shows the detailed results of the comparison between the actual and predicted lip margin position. The method of George (20) estimated the upper lip margin more accurately than the methods of Lebedinskaya (16), Taylor (21), and Balueva and Veselovskaya (personal communication). The George's guideline performed with mean absolute error of 1.7 mm, and the actual and predicted mean values did not show statistically significant difference in comparison with the other methods, which overestimated the upper vermilion line by about 2.3 mm (with mean absolute error 2.5 mm). In reality, 83% of individuals in our sample had their upper vermilion line situated under the level of the upper margin of the central incisor crowns. Comparing the results separately for sexes, the method of George (20) worked more accurately for males (mean difference 0.2 mm and mean absolute error 1.6 mm), while for females (mean difference -1.5 mm and mean absolute error 1.7), the actual upper

vermilion line was situated above the reconstructed LS point in 89% of cases. The methods of Lebedinskaya (16), Taylor (21), and Balueva and Veselovskaya (personal communication) provided slightly better estimation of LS for females, but overestimated (see Table 3). The lower lip margin was predicted more accurately using the methods of Lebedinskaya (16), Taylor (21), and Balueva and Veselovskaya (personal communication) (mean absolute error 2.3 mm), both for the total sample and separately for sexes (see Table 3). The method of George (20) performed worse, having a mean absolute error 2.8 mm, and the actual lower lip margin was situated further down in 69% of males and 80% of females than the lower three-quarter mark of the mandibular central incisor.

Lip Thickness

The detailed results of the comparison between the actual and predicted lip thickness are summarized in Table 4, apart from the method of Taylor (21), which is described in the text. The upper lip thickness/height was predicted with the greatest accuracy using the method of Wilkinson et al. (12), although the actual and predicted values were significantly different. The mean absolute error of 1.3 mm represented 21% of the actual lip height. The method of George (20) predicted the upper lip thickness slightly worse, having mean absolute error of 1.7 mm (27% of the actual lip size). The guideline of Balueva and

TABLE 3—Comparison of the results of several methods for lip margin (LS, LI) prediction applied on the studied sample ($n = 86$, males = 51, females = 35).

Reconstructed feature	Lebedinskaya (16)					
	George (20)			Taylor (21)		
	Males	Females	Total	Males	Females	Total
Upper lip margin (LSr [†])						
Mean difference (mm)	0.2	-1.5*	-0.5	3.0*	1.3*	2.3*
SD of difference	2.0	1.5	1.9	2.0	1.4	1.9
Mean of the absolute error values (mm)	1.6	1.8	1.7	3.1	1.5	2.5
Rate of overestimated cases [‡] (%)	59	11	40	86	80	83
Rate of underestimated cases [‡] (%)	39	89	59	10	14	12
Rate of cases with zero difference (%)	2	0	1	4	6	5
Lower lip margin (LIr [†])						
Mean difference (mm)	1.6*	2.6*	2.0*	-0.8	0.2	-0.4
SD of difference	2.9	2.5	2.8	2.8	2.6	2.8
Mean of the absolute error values (mm)	2.6	2.9	2.8	2.4	2.1	2.3
Rate of overestimated cases [‡] (%)	69	80	73	35	54	43
Rate of underestimated cases [‡] (%)	31	17	26	57	40	50
Rate of cases with zero difference (%)	0	3	1	8	6	7

*Indicates a statistically significant difference from actual values ($p < 0.004$, equivalent to $p < 0.05$ after Bonferroni adjustment).

[†]LS = Labrale superior; LI = Labrale inferior; r = reconstructed; Overestimated = reconstructed point is situated above the actual position; Underestimated = reconstructed point is situated below the actual position.

Veselovskaya (personal communication) produced overestimated lip thickness with mean absolute error of 2.3 mm (37%), being the third best of four methods tested. The method of Lebedinskaya (16) performed the worst, with the largest mean absolute error of nearly 5 mm, which represented more than three-quarters (78%) of the average actual lip dimension. Comparing the results separately for sexes, the best estimation of upper lip thickness was provided by the method of Wilkinson et al. (12) for females, and the method of George (20) for males. The recorded mean absolute errors of 0.9 mm and 1.1 mm, respectively, corresponded to 13% and 19%, respectively, of the actual dimensions. In general, most of the methods overestimated the upper lip thickness, apart from the method of George (20), and all individuals (100%) in the sample had an upper lip thickness lower than the maxillary central incisor height, which supported the guideline of Taylor (21).

Similarly to upper lip, the lower lip thickness was estimated with the least error using the method of Wilkinson et al. (12). The mean difference of 0.6 mm was not statistically significant

and mean absolute error of 1.8 mm represented 20% of the actual lip dimension. The method of Balueva and Veselovskaya (personal communication) followed, with mean absolute error of 2.0 mm (23%). The method of George (20) underestimated the lower lip thickness, with mean absolute error of 2.4 mm (27%). The lower lip thickness was predicted the least accurately using the guideline of Lebedinskaya (16). The lip dimension was underestimated with mean absolute error 2.9 mm, representing one-third (33%) of its average actual height. In addition, following the guidelines of Taylor (21) for oral fissure position, the expected size of the lower lip (should be greater than the visible part of the mandibular central incisors, i.e., distance InS-Id1) was recorded in 78% of the sample. Comparing the results separately for sexes, the method of Wilkinson et al. (12) performed the best for both females and males, predicting the lower lip thickness with mean absolute error of 1.7 mm (18%) for females and 1.8 mm (21%) for males, respectively. Overall, the methods of Wilkinson et al. (12) and Balueva and Veselovskaya (personal communication) overestimated the lower lip thickness, and the method of George (20) and especially the method of Lebedinskaya (16) produced smaller lower lips than the actual dimension was in most of the cases.

As for the total lip thickness, all of the considered methods estimated with similar accuracy for total sample. The mean absolute error ranged from 3.4 mm, through 3.5 mm, to 3.6 mm, for the method of George (20), Wilkinson et al. (12), and Lebedinskaya (16), respectively. The methods of Lebedinskaya (16), Balueva and Veselovskaya (personal communication), and Taylor (21) provided equal results, as these methods recommend the same guideline for total lip thickness prediction. Such errors represented 23%–24% of the average actual total lip height. More than three-quarters of the sample (76%) showed thinner lips than the distance of the upper cementum-enamel junction to the lower cementum-enamel junction, but thicker lips than the distance between upper one-quarter mark of maxillary incisor and three-quarter mark of mandibular incisor. For females, the most accurate (mean absolute error 2.5 mm) was the guideline of Lebedinskaya (16), Balueva and Veselovskaya (personal communication), and Taylor (21); the least accurate (mean absolute error 4.2 mm) was the method of George (20). For males, the results were the opposite. The least mean absolute error (2.9 mm) was performed using the method of George (20), and the largest mean absolute error (4.4 mm) was recorded for the methods of Lebedinskaya (16), Balueva and Veselovskaya (personal communication), and Taylor (21). In general, similarly to the upper lip thickness prediction, most of the methods overestimated the total lip thickness, apart from the method of George (20).

As the method of George (20) displayed greater accuracy for males, again we tried to apply the male prediction guidelines to the female subsample, to see how a change in oral fissure vertical position influenced the accuracy of the method for upper and lower lip thickness. It was found that the upper lip thickness remained underestimated, but the mean absolute error became less by 11% (mean difference -1.3 mm, SD of difference 1.2 mm, statistically significant at $p < 0.05$, mean absolute error 1.5 mm, representing 22% of the actual upper lip height). On the other hand, the lower position of the *stomion* without a change in the estimated localization of the lower lip margin caused a reduction in the height of the lower lip (from -1.8 mm to -2.7 mm mean difference, SD of difference 2.8 mm, statistically significant at $p < 0.05$, mean absolute error 3.0 mm, representing 33% of the actual lower lip height), and thus a rise in mean absolute error of 7%.

TABLE 4—Comparison of the results of several methods for lip thickness prediction applied on the studied sample ($n = 86$, males = 51, females = 35).

Reconstructed feature	Wilkinson et al. (12)			George (20)			Balueva and Veselovskaya (personal communication)			Lebedinskaya (16)		
	Males	Females	Total	Males	Females	Total	Males	Females	Total	Males	Females	Total
Upper lip thickness												
Mean difference (mm)	1.3*	0.2	0.8*	-0.2	-2.3*	-1.1*	2.4*	0.8	1.7*	5.4*	4.2*	4.9*
SD of difference	1.4	1.2	1.4	1.4	1.2	1.6	2.4	1.7	2.3	1.5	1.2	1.5
Mean of the absolute error values (mm)	1.6	0.9	1.3	1.1	2.3	1.7	2.9	1.6	2.3	5.4	4.2	4.9
Mean of the absolute error as a percentage of the actual dimension	28	13	21	19	33	27	50	23	37	93	61	78
Rate of overestimated cases [†] (%)	80	49	67	47	6	30	86	63	77	100	100	100
Rate of underestimated cases [‡] (%)	20	51	33	53	94	70	14	37	23	0	0	0
Rate of cases with zero difference (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lower lip thickness												
Mean difference (mm)	1.0*	0.1	0.6	-1.2*	-1.8*	-1.5*	1.4*	0.4	1.0*	-1.6*	-3.1*	-2.2*
SD of difference	2.1	2.0	2.1	2.9	2.4	2.7	2.2	2.3	2.3	3.0	2.5	2.9
Mean of the absolute error values (mm)	1.8	1.7	1.8	2.4	2.4	2.4	2.0	1.9	2.0	2.6	3.3	2.9
Mean of the absolute error as a percentage of the actual dimension	21	18	20	28	26	27	24	21	23	31	36	33
Rate of overestimated cases [†] (%)	67	51	60	31	17	26	76	54	67	27	11	21
Rate of underestimated cases [‡] (%)	33	49	40	69	80	73	22	40	29	71	89	78
Rate of cases with zero difference (%)	0	0	0	0	3	1	2	6	3	2	0	1
Total lip thickness												
Mean difference (mm)	3.7*	1.7*	2.9*	-1.5*	-4.1*	-2.5*	equal to Lebedinskaya (16)			3.8*	1.1	2.7*
SD of difference	2.9	2.9	3.1	3.6	2.9	3.6				3.6	3.0	3.6
Mean of the absolute error values (mm)	4.1	2.7	3.5	2.9	4.2	3.4				4.4	2.5	3.6
Mean of the absolute error as a percentage of the actual dimension	29	17	23	20	26	23				31	16	24
Rate of overestimated cases [†] (%)	90	71	83	37	6	24				86	60	76
Rate of underestimated cases [‡] (%)	10	29	17	63	94	76				14	37	23
Rate of cases with zero difference (%)	0	0	0	0	0	0				0	3	1

*Indicates a statistically significant difference from actual values ($p < 0.004$ for upper and lower lip thickness, and $p < 0.006$ for total lip thickness, both equivalent to $p < 0.05$ after Bonferroni adjustment).

[†]Overestimated = reconstructed dimension is higher than actual dimension; Underestimated = reconstructed dimension is lower than actual dimension.

To summarize the main findings of this study, which could help increase the accuracy of facial reconstructions, we can state the following:

- The vertical position of the oral fissure was not sex specific (in contrast to the method of George (20)).
- The oral fissure was, in 99% of cases, positioned above the cutting edge of the upper incisors.
- The best estimation for oral fissure position seemed to be the method of George (20), the guideline for males. This guideline was in agreement with the average actual position of the *stomion* in the studied sample, which corresponded approximately with the lower quarter mark of maxillary incisors.
- If the upper central incisors are missing (postmortem), the cutting edge of the lower central incisors could be used as a guide for oral fissure positioning, as the method of Balueva and Veselovskaya (personal communication) suggests.
- The best estimation for the upper lip margin position was the method of George (20), especially for males, i.e., it was positioned opposite the upper quarter mark of the maxillary incisors, or slightly above this mark. For females, the upper vermilion line was mostly situated further up than for males, but its position usually (in 86%) did not overcome the level of the upper margin of the maxillary incisor crowns.

- The lower lip margin usually coincided with the lower margin of mandibular incisor crowns (16,21, Balueva and Veselovskaya, personal communication), especially for females; for males, it should be positioned slightly higher.
- The upper lip thickness was lower than the height of the maxillary incisor crowns in 100% of cases.
- To reconstruct the thickness of the lips, the best estimation for females was provided by the regression equations proposed by Wilkinson et al. (12) (both of the lips), and for males the method of George (20) for upper lip thickness. The lower lip thickness for males should be estimated according to Wilkinson et al. (12), or as the distance between the *stomion* as defined by George (20) and the *labrale inferior* as defined by Lebedinskaya (16), Taylor (21), or Balueva and Veselovskaya (personal communication).

Discussion

The anthropometry results were comparable with the results of previous studies (see Table 1). We found that females had greater actual lip dimensions than males in our sample. This is in agreement with the study of Farkas et al. (26). However, Farkas et al. (26) found that the difference was not statistically significant,

while we recorded a significant difference in upper lip thickness and total lip thickness, which could be due to limited sample size. This is in disagreement with the measurements of Wilkinson et al. (12), who found greater lip dimensions for males, namely the lower lip and total lip thickness, although they were statistically not significant (see Table 1). The differences between the present study and other studies may be a reflection of international variation or of the differences in measurement technique. The latter one could be the case of the sample in Wilkinson et al. (12), which showed smaller teeth dimensions (by about 2 mm) than the present study. Wilkinson et al. (12) measured teeth on living people ("The tooth measurement was from gingival margin to cutting edge", personal communication, 2015), and thus the real margin of the incisor crowns could be hidden under a gingiva. We measured the dimensions from the actual transition between the enamel and cementum of the teeth. In general, looking at the accuracy of the prediction guidelines for lip thickness, we can say that those methods that overestimate the average actual lip dimensions work better for females, and those methods that underestimate the average actual lip heights perform better for males. This observation reflects the anthropometric character of our sample and is a reason why the values computed for the total sample were used as the main criteria for classifying a particular method's accuracy. Moreover, most of the tested prediction guidelines are not sex specific.

The findings of the present study are appropriate to young adult individuals of central European affinity. Aging changes must be considered when the face of an elderly individual is to be reconstructed. The guidelines studied are not applicable for edentulous individuals, as the morphology of the lips changes with the loss of teeth. The results reported in this study appear to be directly applicable to two-dimensional drawing approximations, where photographic image of the skull or cephalogram is directly used for the basis of the facial approximation, and could be helpful while setting and evaluating skull-to-face videoperimposition.

The results of this study are extensive and can be sorted, classified, and interpreted from various points of view. We emphasize that we worked with average values. The statistical analysis of the mean differences between the actual and predicted dimensions, as used in this study, is similar to that used in previous tests of the accuracy of nose projection and mouth width prediction guidelines (1,2,4,11). However, an interpretation based only on mean values has to be treated with caution. Guidelines, while working fairly well on average, could still display considerable errors for some individuals. Even a small error (of about 2 mm) could represent a relatively large portion of the actual size of a particular feature (see Table 4) and change the facial proportions. An extreme example could be the lips estimated according to Lebedinskaya (16). Faces reconstructed following these guidelines showed unnaturally prominent upper lips, often apparently thicker than the lower lips. Such relative proportions are in strong contrast to the actual size of the lips measured in our sample. This might affect facial recognition, especially when combined with any soft-tissue prediction inaccuracies of other features. Nevertheless, from the practical point of view, error of about 1.5 mm can easily occur unintentionally when carrying out facial reconstruction (e.g., could be introduced by measurement error, the thickness of a line drawn with a pencil, shadowing the area around the mouth fissure, or more or less intense pressure when modeling with clay). Although most of the guidelines showed a statistically significant difference, the main criterion for evaluating the accuracy should be whether such a mean difference or

mean absolute error is recognizable or not in the context of the whole face, but this was not the purpose of this study.

Testing the commonly used methods for predicting lip size and position has revealed that some of the methods are robust enough to be applied to different samples with a good level of accuracy (e.g., Wilkinson et al. (12) for upper and lower lip thickness, George (20) for oral fissure position) and should be the methods of choice, while some of the methods should be reevaluated or even abandoned (e.g., Lebedinskaya (16) for upper and lower lip thickness). We are aware that our sample could not be representative of a whole population, and thus the results cannot be generalized or treated as definitive. As Wilkinson et al. (12) state, any relationship between soft-tissue lips and skeletal details of the mouth must be considered only as an approximation, and that other factors, such as prognathism, age, and ethnic origins, may play equally determinant roles in lip thickness. However, these data provide useful indicators about the errors involved in mouth position and vertical size prediction. Our study highlights the critical importance of reassessing traditional guidelines used in FR/FA and, as we hope, provide important information for facial reconstruction practitioners and users of particular guidelines and offer useful guidance for better application of the sometimes intricate details of the methods used for FR/FA.

Acknowledgments

The authors thank the Stomatology Clinic, Kralovske Vinohrady, Prague, for generating the X-ray images. Thank you to the anonymous reviewers for their constructive critiques and comments.

References

- Stephan CN, Henneberg M, Sampson W. Predicting nose projection and pronasale position in facial approximation: a test of published method and proposal of new guidelines. *Am J Phys Anthropol* 2003;122:240–50.
- Rynn C, Wilkinson CM. Appraisal of traditional and recently proposed relationships between the hard and soft dimensions of the nose in profile. *Am J Phys Anthropol* 2006;130:364–73.
- Rynn C, Wilkinson CM, Peters HL. Prediction of nasal morphology from the skull. *Forensic Sci Med Pathol* 2010;6:20–34.
- Mala PZ. Pronasale position: an appraisal of two recently proposed methods for predicting nasal projection in facial reconstruction. *J Forensic Sci* 2013;58:957–63.
- Stephan CN. Facial approximation: globe projection guideline falsified by exophthalmometry literature. *J Forensic Sci* 2002;47:730–5.
- Wilkinson CM, Mautner SA. Measurement of eyeball protrusion and its application in facial reconstruction. *J Forensic Sci* 2003;48:12–16.
- Stephan CN, Huang AJR, Davidson PL. Further evidence on the anatomical placement of the human eyeball for facial approximation and craniofacial superimposition. *J Forensic Sci* 2009;54:267–9.
- Guyomarc'h P, Dutailly B, Couture C, Coqueugniot H. Anatomical placement of the human eyeball in orbit – validation using CT scans of living adults and prediction for facial approximation. *J Forensic Sci* 2012;57:1271–5.
- Stephan CN. Position of superciliare in relation to the lateral iris: testing a suggested facial approximation guideline. *Forensic Sci Int* 2002;130:29–33.
- Guyomarc'h P, Stephan CN. The validity of ear prediction guidelines used in facial approximation. *J Forensic Sci* 2012;57:1427–41.
- Stephan CN. Facial approximation: an evaluation of mouth width determination. *Am J Phys Anthropol* 2003;121:48–57.
- Wilkinson CM, Motwani M, Chiang E. The relationship between the soft tissue and the skeletal detail of the mouth. *J Forensic Sci* 2003;48:728–32.
- Stephan CN, Murphy SJ. Mouth width prediction in craniofacial identification: cadaver tests of four recent methods, including two techniques for edentulous skulls. *J Forensic Odontostomatol* 2008;27:2–7.

1054 JOURNAL OF FORENSIC SCIENCES

14. Wilkinson CM. Facial reconstruction – anatomical art or artistic anatomy? *J Anat* 2010;216:235–50.
15. Gatliff BP. Facial sculpture on the skull for identification. *Am J Forensic Med Pathol* 1984;5:327–32.
16. Lebedinskaya GB. Rekonstrukcia lica po cerepu (metodiceskoje rukovodstvo). Moskva, Russia: Staryj Sad, 1998.
17. Stephan CN, Henneberg M. Predicting mouth width from inter-canine width – a 75% rule. *J Forensic Sci* 2003;48:725–7.
18. Balueva TS, Veselovskaya EV. New developments in facial reconstruction. *Archaeol Ethnol Anthropol Eurasia* 2004;17:143–50.
19. Angel JL. Restoration of head and face for identification. Proceedings of the 30th Annual Meeting of the American Academy of Forensic Sciences; 1987 Feb 20–25; St. Louis, MO. Colorado Springs, CO: American Academy of Forensic Sciences, 1987.
20. George RM. The lateral craniographic method of facial reconstruction. *J Forensic Sci* 1987;32:1305–30.
21. Taylor KT. Forensic art and illustration. New York, NY: CRC Press, 2001.
22. Wilkinson CM, Rynn C, Peters H, Taister M, How Kau C, Richmond S. A blind accuracy assessment of computer-modeled forensic facial reconstruction using computer tomography data from live subjects. *Forensic Sci Med Pathol* 2006;2:179–87.
23. Gerasimov MM. Vosstavlenie lica po cerepu. Moskva, Russia: Izdatelstvo Akademii Nauk, 1955.
24. Smahel Z, Brejcha M. Differences in craniofacial morphology between complete and incomplete unilateral cleft-lip and palate in adults. *Cleft Palate J* 1983;20:113–27.
25. Mackova K, Velemínska J. Craniometrical norms for recent Czech population intended for evaluation of the cranial size and shape using lateral X-ray films. *Anthropologie* 2007;45:261–74.
26. Farkas LG, Hreczko TA, Katic MJ. Craniofacial norms in North American Caucasians from birth to young adulthood. In: Farkas LG, editor. *Anthropometry of the head and face*, 2nd edn. New York, NY: Raven Press, 1994;241–335.

Additional information and reprint requests:
Pavla Zednikova Mala, M.Sc.
Department of Anthropology and Human Genetics
Charles University in Prague
Vinicna 7
12000 Prague
Czech Republic
E-mail: mala.mala@email.cz



TECHNICAL NOTE

ANTHROPOLOGY

Pavla Zednikova Mala,^{1,2} M.Sc.; and Jana Velemínska,¹ Ph.D.

Eyeball Position in Facial Approximation: Accuracy of Methods for Predicting Globe Positioning in Lateral View

ABSTRACT: This study measured the accuracy of traditional and validated newly proposed methods for globe positioning in lateral view. Eighty lateral head cephalograms of adult subjects from Central Europe were taken, and the actual and predicted dimensions were compared. The anteroposterior eyeball position was estimated as the most accurate method based on the proportion of the orbital height (SEE = 1.9 mm) and was followed by the “tangent to the iris method” showing SEE = 2.4 mm. The traditional “tangent to the cornea method” underestimated the eyeball projection by SEE = 5.8 mm. Concerning the superoinferior eyeball position, the results showed a deviation from a central to a more superior position by 0.3 mm, on average, and the traditional method of central positioning of the globe could not be rejected as inaccurate (SEE = 0.3 mm). Based on regression analyzes or proportionality of the orbital height, the SEE = 2.1 mm.

KEYWORDS: forensic science, facial approximation, facial reconstruction, soft-tissue prediction, eyeball position, accuracy test, head cephalograms

The morphological and structural features of the orbital region play important roles in facial recognition. Correct recognition is the ultimate goal of facial approximation. Positioning of the eyeball within the orbit is one of the first steps in any facial approximation, and it is assessed in the process of evaluating the degree of match between a skull and an antemortem photograph in superimposition. Globe location in the mediolateral and superoinferior directions influences facial proportions. Individuals are very sensitive to perception of eye displacement within these directions, while recognizing familiar faces (1,2). The globe projection (i.e., the location in the anteroposterior direction) relative to the orbital rims tends to influence the morphology of the eyelids and gives an impression of deep set/narrow eyes or bulging/wide eyes.

The method of facial approximation depends on accurate anatomical understanding of soft tissue relationships with the skull. The accuracy of many facial prediction rules was reviewed, reevaluated, or additionally found (e.g., ref. n. 3 for *superciliare* position; 4–6 for *pronasale* position; 7–10 for lip size and position; and 11 for ear size and morphology), and new prediction guidelines based on empirical findings were proposed (e.g., 4,5,7,11–13). Prediction guidelines for globe locations have also been recently discussed. According to traditional rules, the eyeball is positioned centrally within the orbit in the frontal view (i.e., the apex of the cornea corresponded to the midpoint of the orbital height and orbital breadth), and by placing the

cornea tangent to a line connecting the midpoints of the superior and inferior margins of the orbit in the anteroposterior direction (e.g., 14–16), herein referred to as the “tangent to the cornea method”, Fig. 1a). These guidelines were first rejected as inaccurate by Stephan (17) who reviewed the exophthalmometry reports; the inaccuracy was proven by cadaver-based studies (18,19), through magnetic resonance imaging (MRI) (20), and by computer tomography (CT) (21) of large databases of living subjects. Regarding the anteroposterior (AP) position of the eyeball within the orbit, Stephan (17) found that the anterior most point of the cornea falls, on average, 3.7 mm anterior to the tangent line connecting the midpoints of the superior and inferior orbital margins. Wilkinson and Mautner (20) examined MRI scans of 39 adult living individuals. They determined that the eyeball protruded past the tangent line connecting the midpoints of the superior and inferior margins from 0 to 9.4 mm, with a mean of 3.8 mm, and that the globe could be positioned in the orbit so that the tangent touched the iris, rather than the cornea. This guideline was in agreement with the study of Balueva and Veselovskaya (personal communication, 2004), placing the apex of the cornea approximately 4 mm forward to the line connecting the most superior point and the most inferior point of the orbital rim contour from the lateral view. These guidelines are herein referred to as the “tangent to the iris method,” and a value of 4 mm was used to calculate the accuracy of this guideline (Fig. 1b). The most recent prediction guidelines were proposed by Guyomarc’h et al. (21), who developed regression equations and determined percentages for proportional placement of the eyeball within the orbit in all three planes based on measurements of orbital height (OBH) and orbital breadth (OBB). They based their method on a large sampling of CT scans of 375 live adults. The guidelines for AP eyeball position that were tested in this study have been referred to as the “proportion of OBH

¹Department of Anthropology and Human Genetics, Faculty of Science, Charles University, Viničná 7, 120 00, Prague 2, Czech Republic.

²Department of Anthropology, Biology and Physiodetection, Institute of Criminalistics Prague, Police of the Czech Republic, Bartolomějská 12, 110 00, Prague 1, Czech Republic.

Received 21 Nov. 2016; and in revised form 8 Mar. 2017; accepted 10 Mar. 2017.

method" (Fig. 1c). Concerning the superoinferior (SI) position of the eyeball within the orbit, the traditionally accepted central position (herein referred to as the "prediction by OBH midpoint," Fig. 2a) was found to be inaccurate by Stephan et al. (18,19). They reported a median divergence from the orbit center 1.4 mm superiorly. The study was based on 13 cadavers. The central position of the globe was also corrected by Guyomarc'h et al. (21), reporting a mean divergence of 2 mm superiorly, and proposing new guidelines for eyeball position prediction (herein referred to as the "prediction through regression" and the "prediction by proportionality from OBH," Fig. 2b).

This study focused on the position of the eyeball within the orbit in lateral view (in the SI and AP positions). The aim of this study was to test, using lateral head cephalograms, the accuracy of the traditional and especially of the recently proposed prediction guidelines that are supposed to estimate eyeball projection and its SI position within the orbit with less error, in order to validate the recently proposed methods, and to quantify the error in these guidelines applied to a Central European sample population.

Materials and Methods

The population sample was based on the lateral head cephalograms of 80 healthy adult subjects of Central European descent: 52 males, age 21–43 years (mean age, 30 years), and 28 females, age 19–39 years (mean age, 21 years). The X-ray images were taken between 1977 and 1992 at the Stomatology Clinic, Kralovské Vinohrady, Prague, Czech Republic. Because these images were used as controls in the study of patients with congenital craniofacial defects, the samples were from individuals without obvious facial disharmony or reverse occlusion, as well as from individuals never having undergone orthodontic treatment.

The lateral X-ray images were taken under standard conditions: Centric occlusion and the patients' heads were fixed in a stable position with a cephalostat. The focus film distance was always 400 cm, and the object film distance was 30 cm; the extent of enlargement was always constant, at 8.1% (22). One of the important advantages of teleroentgenography is its very small distortion and the sharp contours of the displayed structures (23). An illustrative figure of the image product of a teleroentgenogram is displayed in Fig. 3a,b.

One tracing was made of each cephalogram image, including both soft tissue and bony facial profiles, using a 0.5 mm HB retractable pencil and a fluorescent light box in a darkened room with aperture style shields to remove excess light generated by the light box (Fig. 3c). The Frankfurt horizontal (FH) was also recorded on each tracing. Each tracing was digitalized with a scale by a 2-dimensional (2D) table scanner at 300 dpi resolution so that 1:1 images were obtained, to be stored and used for further research. The tracings were then processed using Adobe Photoshop CS5 (Adobe Systems, San Jose, CA). At first, the actual relative positions of relevant anthropometric points (Fig. 3d, Table 1) were recorded as the distance of the point from a reference line parallel to the FH running across the superior orbital margin (point *sk*) for vertical measurements, and from a perpendicular line to the FH crossing the most posterior point of the lateral orbital margin (point *d_{lom}*) for horizontal measurements; all measurements were projected. The linear dimensions were measured using the measuring tool in Adobe Photoshop CS5 (Adobe Systems) and were then corrected with regard to the 8.1% enlargement. Subsequently, the corrected measurements were used to calculate the reconstructed/predicted position of the eyeball (point *oa*) in the AP (relative to *d_{lom}*) and SI (relative to *sk*) directions for each of the methods. The calculations were processed using MS Excel 2010 (Microsoft Corporation, Redmond, WA). All measurements were repeated on 10 individuals. The coefficients of variation of the error (CVE, intra-observer and inter-observer) were calculated by taking the sum of the squared differences between the test and retest values, and dividing it by two times the number of remeasured individuals. The square root of the result was taken and divided by the mean of the test/retest result for the first individual (18).

Statistical analyzes were conducted using Statistica, version 7.0 (StatSoft, Inc., Tulsa, OK). The differences in actual dimensions of the orbital regions between sexes were studied using a one-way analysis of variance. The descriptive statistics and correlations were calculated, and the actual and predicted measurements (mean values) were compared using the appropriate *t*-test. The level of statistical significance was set at $p < 0.05$, but altered according to the Bonferroni correction. A positive mean difference indicated that the method overestimated and that the reconstructed feature (*oa*) was positioned more forward or higher than the actual one; a negative mean difference indicated the opposite. Error magnitude for each of the prediction guidelines

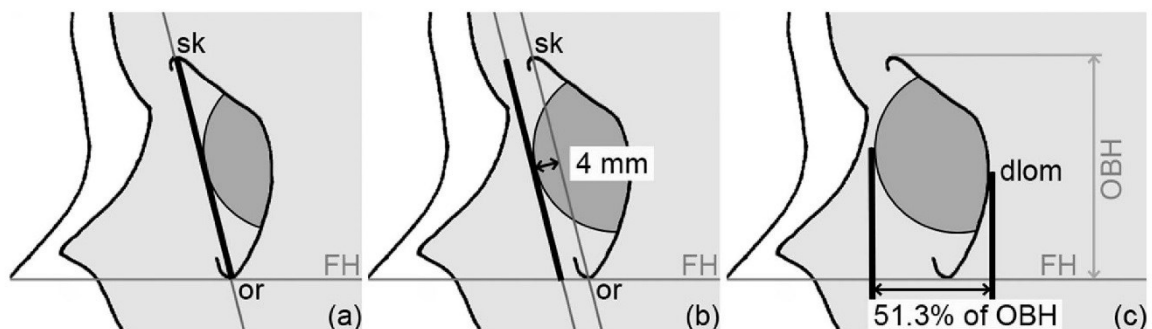


FIG. 1—Schematic illustration of the methods used for estimation of the eyeball projection, that is, the eyeball position within the orbit in the anteroposterior direction. A lateral contour of the eyeball and the orbit. (a) "Tangent to the cornea method" (14–16). (b) "Tangent to the iris method" (17,20, Balueva and Veselovskaya, personal communication). (c) "Proportion of OBH method" (21).

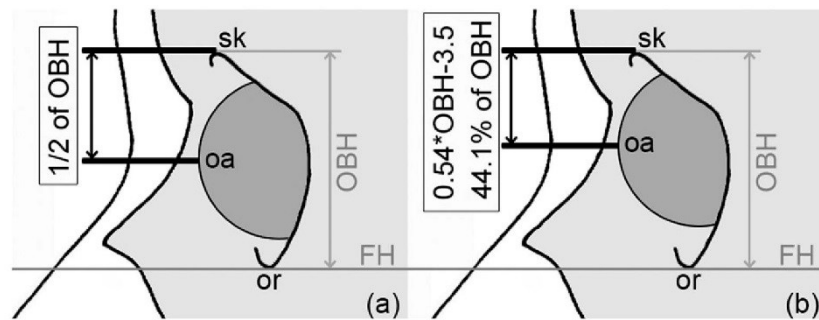


FIG. 2—Schematic illustration of the methods used for estimation of the eyeball position in the superoinferior direction. A lateral contour of the eyeball and orbit. (a) For the “prediction by OBH midpoint,” the eyeball is positioned centrally in the superoinferior direction, and the apex of the cornea corresponds to the midpoint of the orbital height (15, Balueva and Veselovskaya, personal communication). (b) For the “prediction through regression/prediction by proportionality from OBH,” the superoinferior position of the eyeball is determined through a regression or proportionality equation, both based on orbital height (21).

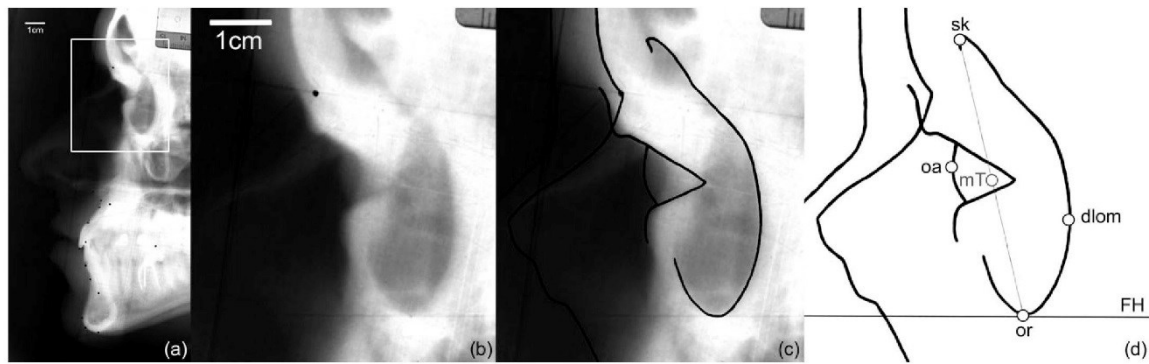


FIG. 3—Illustrative figure of the image product of teleroentgenography and the position of the anthropometric points. (a) Overall view of the facial skeleton and soft-tissue contour. (b) Detailed view of the orbital region. (c) Cephalogram superimposed by the tracing. (d) Lateral contour of the orbit, eyeball, eyelids, and nearby nasal region with positioned anthropometric points used for measurements. Definitions of the points are described in the Table 1; sk, supraconchion; or, orbitale; dlom, the deepest point of the lateral margin; oa, oculus anterior; mT, the midpoint of sk-or line segment.

TABLE 1—Landmarks used in this study.

Abbreviation	Landmark	Definition
or*	Orbitale	The lowest point on the orbital rim
sk*	Supraconchion	The highest point of the orbital rim
dlom*	Deepest point of the lateral orbital margin	The most posterior point on the lateral orbital rim
oa*	Oculus anterior	The most anterior point of the eyeball
mT	Midpoint of the Tangent (sk-or)	The midpoint of the line connecting sk and or

sk, supraconchion; or, orbitale; dlom, the deepest point of the lateral margin; oa, oculus anterior; mT, the midpoint of sk-or line segment.

*Adopted from (21).

was further calculated as standard error of the estimate (SEE). SEE values were then evaluated as a percentage of the average actual dimension (i.e., of the actual eyeball position defined by the sk-*oa* and *dlom-oa* distances). To consider individual cases, the proportions of individuals whose reconstructed features showed more forward or less projection, higher or lower, or equal (i.e., $\pm 0.1\text{ mm}$ difference) position compared with the

actual position were calculated, as well as the proportion of cases where the eyeball position was predicted within 5% error for each of the methods.

Results

Coefficients of variation of the error for all measurements used in this study are shown in Table 2. CVEs were generally low, not exceeding 3.1%. All variables followed a normal distribution according to the Shapiro-Wilk test.

In the samples studied, the average actual eyeball projection from the most posterior point of the lateral orbital rim was 17.4 mm, (standard deviation [SD] = 1.9 mm; min = 9.2 mm; max = 20.2 mm), and the average actual globe position in the SI direction was 16.9 mm, (SD = 1.7 mm; min = 12.7 mm; max = 21.5 mm), measured from the highest point of the orbital rim. No significant difference between the sexes was detected except the orbital height of males had higher orbits, by 1.5 mm, on average. The relative position of the eyeball to the lateral and superior margin was converted to the percentage of the OBH for possible comparison of the results with those of Guyomarc'h et al. (21). The projection of the eyeball (*oa*) from the most

TABLE 2—Measurements used in this study and coefficients of variation of the error (CVE).

Measurements	CVE (%)	
	Intra-Observer	Inter-observer
Horizontal measurements*		
<i>dlom-oa</i>	1.1	1.2
<i>dlom-mT</i>	2.0	3.1
Vertical measurements*		
Orbital height (OBH), <i>sk-or</i>	0.6	0.8
<i>sk-oa</i>	2.2	2.3
<i>sk-mT</i>	0.9	1.1

*Measurements were taken parallel or perpendicular to Frankfurt horizontal (FH).

posterior point of the lateral orbital margin (*dlom*) averaged 50.5% of the orbital height (SD = 4.2%; min = 39.7%; max = 63.4%). The distance from the corneal apex (*oa*) to the most superior point of the orbital rim (*sk*) averaged 49% of the orbital height (SD = 2.3%; min = 38.2%; max = 57.5%). The SI position of the eye globe was well correlated to the orbital height ($r = 0.79$), and the eyeball projection showed a significant but lower correlation to the orbital height ($r = 0.29$). The eyeball protruded past the tangent line in the range from 0 to 11.2 mm, with a mean of 5.5 mm (SD = 1.4 mm), and it diverged from the orbital center (midpoint of the orbital height) from -2.5 mm to 4.3 mm, with a mean and a median both equal to 0.3 mm.

The results of prediction guideline accuracy for eyeball position in the AP direction are summarized in Table 3. The best estimation for eyeball projection was obtained using the "proportion of OBH method" recently proposed by Guyomarc'h et al. (21). This method slightly overestimated the position, but the mean difference of 0.3 mm was not statistically significant. The SEE was 1.9 mm and represented 10.8% of the actual average globe projection, and the estimation was within 5% error (i.e., the difference between the actual and predicted position did not exceed 5% of the actual projection) in nearly half of the cases. This method provided better values in females (see Table 3). The "tangent to iris method" underestimated the eyeball projection, on average, by 1.5 mm with a SEE of 2.4 mm (13.7% of the actual average projection). The globe position was estimated within 5% error in approximately one-third of the studied sample, and in 81% of individuals, the eyeball projected more than 4 mm forward to the line tangent to the most superior and the most inferior point of the orbital rim. This guideline worked better in females, providing comparable SEEs as the method based on proportion of the OBH (21) for the total sample. The eyeball position reconstructed according to the "tangent to the cornea method" was underestimated on average by 0.5 cm. This method performed the worst with a SEE of 5.8 mm, which represented 33.5% of the actual eyeball projection. In no case was the cornea deeper than the tangent line, and only in 1% of the cases was the eyeball position estimated within 5% error.

The results of the comparisons between the actual and predicted eyeball positions in the superoinferior (SI) direction are summarized in Table 4. The "prediction by OBH midpoint" (the rule of eyeball central position) provided a more accurate estimation than the "prediction through regression or by proportionality from OBH" method developed by Guyomarc'h et al. (21). The mean difference between these "traditional" and "recently proposed" methods was approximately 1.5 mm, and the SEE differed by 1.8 mm. Although statistically significant, the mean

difference between the actual and centrally (in SI direction) positioned eyeball was only -0.3 mm, and the SEE was 0.3 mm, representing 1.6% of the average actual SI position of the eyeball within the orbit (*oa-sk* distance). The eyeball position was predicted with zero difference or within 5% error in 100% of the cases and the guideline worked better for females. The other methods based on regression and proportionality of the orbital height (21) provided similar results, but the prediction by proportionality performed slightly better than the prediction through regression. These methods overestimated the SI position of the globe by 1.8 mm (it should be positioned more downwards) with a SEE of 2.1 mm (12.5% of the average actual distance of the cornea apex from the most superior point of the orbital rim). The eyeball was positioned within 5% error in one-fifth of the samples, and the methods worked better for males.

Discussion

The average eyeball protrusion measured from the lateral orbital rim in this sample set (17.4 mm, SD = 1.9 mm) fell within the range of the eyeball projection of the Caucasian adult population, with a mean of 16.2 mm previously reported by exophthalmometry studies (17), a median of 16.8 mm measured on cadavers (19), and a mean of 18.3 mm based on a large sample of CT scans of living people (21). As previous observations have confirmed, the SI position of the eyeball within the orbit showed divergence from the central to more superior position, but only by 0.3 mm. Stephan et al. (19) reported a median divergence of 1.4 mm, while Guyomarc'h et al. (21) reported a mean divergence 4.1 mm.

The results of this study confirmed the findings of former studies (17,19-21), suggesting that the eyeball projects past the tangent line connecting the midpoints of the superior and inferior margins. These studies used 3D corporeal or virtual (CT/MRI) skull scans. In this study, we examined lateral head cephalograms and used the tangent connecting the most superior point and the most inferior point of the orbital rim contour from the lateral view, as was reported by Balueva and Veselovskaya (personal communication), while drawing facial approximations from the profile. The shadows on a lateral cephalogram depicted the contour of the orbital margin, while the tangent used by Taylor (15) or Wilkinson and Mautner (20) connected anterior surfaces of the frontal and zygomatic/maxillary bones close to the orbital entrance that are situated more forward (see ref. n. 20, Fig. 2, p. 14). The AP position of the most superior and the most inferior point of the orbital margin also could slightly differ from the AP position of the supraorbital and infraorbital midpoints. Thus, the magnitude of the difference between actual eyeball position and eyeball position reconstructed according to the methods using the tangential line to the midpoints as the reference line could be slightly smaller than was calculated in this study. This could increase the accuracy of the "tangent to the iris method," but the "tangent to the cornea method" would still underestimate the eyeball projection. Nevertheless, the most accurate prediction guideline was the "proportion of OBH method," where the SEE was even smaller in the sample (1.9 mm in comparison to 2.3 mm as reported by Guyomarc'h et al.(21)), and should therefore be the method of choice. The accuracy of the method for the globe projection prediction based on regression analyzes proposed by Guyomarc'h et al. (21) could not be assessed in this study because the regression equation required a direct distance from the *nasion* to the *frontomale orbitale* that was not possible to measure on radiograms.

TABLE 3—Comparison of the results of several methods for eyeball prominence prediction applied on the studied sample (n = 80, males = 52, females = 28).

Method	“Tangent to the Cornea Method”			“Tangent to the Iris Method”			“Proportion of OBH Method”		
	Gatliff (14), Taylor (15), Lebedinskaya (16)			Stephan (17), Wilkinson and Mautner (20), Balueva and Veselovskaya (Personal Communication)			Guyomarc’h et al. (21)		
Proposed/Used by Author(s)	Males	Females	Total	Males	Females	Total	Males	Females	Total
Mean difference (mm)	-5.7	-5.1	-5.5	-1.7	-1.1	-1.5	0.3	0.3	0.3
SD of difference	2	1.5	1.8	2	1.5	1.8	2	1.5	1.9
SEE	6.1	5.3	5.8	2.6	1.8	2.4	2.1	1.5	1.9
SEE as a percentage of the average actual dimension	35.9	30.5	33.5	15.5	10.5	13.7	11.9	8.4	10.8
Rate of overestimated cases* (%)	0	0	0	14	18	15	54	54	54
Rate of underestimated cases* (%)	100	100	100	85	75	81	44	46	45
Rate of cases within 5% error (%)	2	0	1	40	29	31	42	47	44
Rate of cases with zero difference	0	0	0	2	7	4	2	0	1

SEE, standard error of estimate.

Bold indicates a statistically significant difference from actual values ($p < 0.017$, equivalent to $p < 0.05$ after Bonferroni adjustment).

*Overestimated, reconstructed cornea projected more forward than the actual position is; underestimated, reconstructed cornea projected less forward than the actual position is.

TABLE 4—Comparison of the results of several methods for the eyeball superoinferior position prediction applied on the studied sample (n = 80, males = 52, females = 28).

Method	“Prediction Through Regression”			“Prediction by Proportionality”			“Prediction by OBH Midpoint”		
	Guyomarc’h et al. (21)			Guyomarc’h et al. (21)			Taylor (15), Balueva and Veselovskaya (Personal Communication)		
Proposed/Used by Author(s)	Males	Females	Total	Males	Females	Total	Males	Females	Total
Mean difference (mm)	1.6	2.1	1.8	1.6	1.9	1.7	-0.5	-0.1	-0.3
SD of difference	0.9	1.4	1.1	0.9	1.5	1.2	0.9	1.5	1.1
SEE	1.9	2.5	2.1	1.8	2.4	2.1	0.3	0.2	0.3
SEE as a percentage of the average actual dimension	11.0	15.0	12.6	10.8	14.3	12.2	1.7	1.5	1.6
Rate of overestimated cases* (%)	92	96	94	92	89	91	37	18	30
Rate of underestimated cases* (%)	8	4	6	4	11	6	52	75	60
Rate of cases within 5% error (%)	17	14	16	17	21	19	88	93	90
Rate of cases with zero difference	0	0	0	4	0	3	12	7	10

SEE, standard error of estimate.

Bold indicates a statistically significant difference from actual values ($p < 0.017$, equivalent to $p < 0.05$ after Bonferroni adjustment).

*overestimated, reconstructed cornea was positioned above its actual position; underestimated, reconstructed cornea was positioned below its actual position.

This sample showed only small shifting of the eyeball from the orbital center to the superior orbital margin. It resulted in greater accuracy of the traditional guideline of central positioning of the globe in the SI direction. Both approaches to prediction of the SI position of the eyeball recently proposed by Guyomarc’h et al. (21) (through regression and by proportionality of OBH) resulted in overestimation and an increased SEE in comparison with SEEs previously reported (i.e., from 1.4 mm to 2.1 mm). Regarding the magnitude of error (inaccuracy) and its influence on the ability to recognize the face, it was found that people were very sensitive to SI position of the eyes. However, this sensitivity was not found to be of such a magnitude as the previously reported errors. Brooks and Kemp (1) found that, on average, individuals were able to reliably detect displacement of the eyes by 4.5% of the interocular distance, or approximately 3 mm on a corporeal face regardless of the direction of SI displacement. For familiar faces, the threshold was slightly smaller, but not more than 2.5 mm. It could be assumed that (in)accuracy

of the tested methods for prediction of SI eyeball position had no influence on the reconstructed face to be correctly recognized. However, eyes were moved separately from the rest of the face that remained without changes in the experiment performed by Brooks and Kemp (1). Unfortunately, the eyes are not the only feature that could be reconstructed with error. Errors are introduced into the facial approximations with subsequent estimation of each facial feature. These errors accumulate and the final facial approximation could largely differ from the actual target individual, probably resulting in misidentification (24).

This study follows on from previous studies that evaluated the accuracy of traditional rules, and validates recently proposed prediction guidelines. We are aware that our sample is not representative of the whole population; thus, the results of the present accuracy test cannot be generalized or treated as definitive. We further emphasize the importance of large-sample studies that may decrease the level of subjectivity and increase the validity of facial approximation methods.

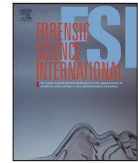
Acknowledgments

The authors thank the Stomatology Clinic, Kralovske Vinohrady, Prague, for generating the X-ray images.

References

1. Brooks KR, Kemp RI. Sensitivity to feature displacement in familiar and unfamiliar faces: beyond the internal/external feature distinction. *Perception* 2007;36(11):1646–59.
2. Haig ND. The effect of feature displacement on face recognition. *Perception* 1984;13(5):505–12.
3. Stephan CN. Position of superciliare in relation to the lateral iris: testing a suggested facial approximation guideline. *Forensic Sci Int* 2002;130(1):29–33.
4. Stephan CN, Henneberg M, Sampson W. Predicting nose projection and pronasale position in facial approximation: a test of published method and proposal of new guidelines. *Am J Phys Anthropol* 2003;122(3):240–50.
5. Rynn C, Wilkinson CM. Appraisal of traditional and recently proposed relationships between the hard and soft dimensions of the nose in profile. *Am J Phys Anthropol* 2006;130(3):364–73.
6. Mala PZ. Pronasale position: an appraisal of two recently proposed methods for predicting nasal projection in facial reconstruction. *J Forensic Sci* 2013;58(4):957–63.
7. Wilkinson CM, Motwani M, Chiang E. The relationship between the soft tissue and the skeletal detail of the mouth. *J Forensic Sci* 2003;48(4):728–32.
8. Stephan CN. Facial approximation: an evaluation of mouth width determination. *Am J Phys Anthropol* 2003;121(1):48–57.
9. Stephan CN, Murphy SJ. Mouth width prediction in craniofacial identification: cadaver tests of four recent methods, including two techniques for edentulous skulls. *J Forensic Odontostomatol* 2008;27(1):2–7.
10. Mala PZ, Velemínska J. Vertical lip position and thickness in facial reconstruction: a validation of commonly used methods for predicting the position and size of lips. *J Forensic Sci* 2016;61(4):1046–54.
11. Guyomarc'h P, Stephan CN. The validity of ear prediction guidelines used in facial approximation. *J Forensic Sci* 2012;57(6):1427–41.
12. Rynn C, Wilkinson CM, Peters HL. Prediction of nasal morphology from the skull. *Forensic Sci Med Pathol* 2010;6(1):20–34.
13. Stephan CN, Henneberg M. Predicting mouth width from inter-canine width – a 75% rule. *J Forensic Sci* 2003;48(4):725–7.
14. Gatliff BP. Facial sculpture on the skull for identification. *Am J Forensic Med Pathol* 1984;5(4):327–32.
15. Taylor KT. *Forensic art and illustration*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.
16. Lebedinskaya GB. Rekonstrukcia lica po cerepu (metodiceskoje rukovodstvo) [The 'resurrected' woman from Abusir]. Moscow, Russia: Staryj sad, 1998.
17. Stephan CN. Facial approximation: globe projection guideline falsified by exophthalmometry literature. *J Forensic Sci* 2002;47(4):730–5.
18. Stephan CN, Davidson PL. The placement of the human eyeball and canthi in craniofacial identification. *J Forensic Sci* 2008;53(3):612–9.
19. Stephan CN, Huang AJR, Davidson PL. Further evidence on the anatomical placement of the human eyeball for facial approximation and craniofacial superimposition. *J Forensic Sci* 2009;54(2):267–9.
20. Wilkinson CM, Mautner SA. Measurement of eyeball protrusion and its application in facial reconstruction. *J Forensic Sci* 2003;48(1):12–6.
21. Guyomarc'h P, Dutailly B, Couture C, Coqueugnot H. Anatomical placement of the human eyeball in orbit – validation using CT scans of living adults and prediction for facial approximation. *J Forensic Sci* 2012;57(5):1271–5.
22. Smahel Z, Brejcha M. Differences in craniofacial morphology between complete and incomplete unilateral cleft-lip and palate in adults. *Cleft Palate J* 1983;20(2):113–27.
23. Mackova K, Velemínska J. Craniometrical norms for recent Czech population intended for evaluation of the cranial size and shape using lateral X-ray films. *Antropologie* 2007;XLV(2–3):261–74.
24. Stephan CN, Henneberg M. Building faces from dry skull: are they recognized above chance rates? *J Forensic Sci* 2001;46(3):432–40.

Additional information and reprint requests:
Pavla Zednikova Mala, M.Sc.
Department of Anthropology and Human Genetics
Faculty of Science
Charles University
Viničná 7
120 00 Prague 2
Czech Republic
E-mail: mala.mala@email.cz



How tight is the relationship between the skeletal and soft-tissue facial profile: A geometric morphometric analysis of the facial outline



Pavla Zedníková Malá^{a,*}, Václav Krajíček^b, Jana Velemínská^a

^a Department of Anthropology and Human Genetics, Faculty of Science, Charles University, Vinická 7, 128 43 Prague, Czech Republic

^b Department of Software and Computer Science Education, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Malostranské Náměstí 25, 11800 Prague, Czech Republic

ARTICLE INFO

Article history:

Received 18 February 2018
Received in revised form 26 August 2018
Accepted 15 September 2018
Available online 26 September 2018

Keywords:

Forensic anthropology
Craniofacial relationships
Shape analysis
Facial approximation
Facial profile

ABSTRACT

Correlations between facial bony structures and soft facial features are fundamental for facial approximation methods. The purpose of this study was to assess the strength of the association between craniofacial shape and the shape of the soft-tissue profile and to determine the extent to which it might be possible to predict the latter from the former. Soft-tissue and skeletal facial profile curves were extracted from 86 lateral head cephalograms of a recent Central European population (52 males and 34 females, aged between 19 and 43 years), divided into five parts, segmented automatically and evaluated using geometric morphometrics. The magnitude of the hard–soft shape association was assessed by principal component analysis and subsequent multiple linear regression (Halazonetis, 2007), by partial least square analysis (PLS) (Rohlf and Corti, 2000) and the RV coefficient (Klingenberg, 2009). The greatest amount of association between the skeletal contour and overlying soft tissues was exhibited by the region of the forehead (predictive power: 95.1%, $RV = 0.91$, correlation for PLS1 $r = 0.96$), followed by the region of the nasal root (predictive power: 40.2%, $RV = 0.42$, $r_{PLS1} = 0.72$) and the lower lip and chin (predictive power: 37.3%, $RV = 0.41$, $r_{PLS1} = 0.65$). The smallest statistically significant covariation was displayed by the upper lip and the maxilla (predictive power: 9.6%, $RV = 0.14$, $r_{PLS1} = 0.43$). The shape covariation between the nasal bridge and the tip and lateral border of the nasal aperture was found to be statistically insignificant (predictive power: 5.8%, $RV = 0.05$, $r_{PLS1} = 0.26$). Shape covariation was visualized and described by thin-plate spline grids. These findings correspond with the observation that the shape of the nasal profile and the upper lip contour are difficult to reconstruct or predict reliably in facial approximations. It seems that the shape of soft tissues might not follow underlying structures as closely as expected.

© 2018 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Skeletal structures and overlying soft tissues of the face are expected to be intercorrelated both in form and function for purely biological reasons. This relationship is of scientific interest in many disciplines, including orthodontics, craniofacial surgery, plastic and reconstructive surgery, and forensics and anthropology [1], namely (forensic) facial approximation, for developing more accurate facial estimation procedures.

All facial approximation techniques are based on the assumed relationship between the soft tissue envelope and the underlying skull substrate [2–7]. In manual facial approximation methods these relationships are described as prediction guidelines, they are

based on statistical analysis of linear or angular measurements or observations and focused especially on estimation of size and shape of facial organs (eyes, nose, mouth and ears), e.g. [8–13]. In computerized methods, the anatomical relation of face to skull (CFI – craniofacial information) is contained in craniofacial model (CFM) and rises from knowledge of facial surfaces, skull surface, facial muscles, soft tissues thickness learned from a large and diverse facial reference database [4,14–17].

According to Stephan and Henneberg [18], facial approximations infrequently result in specific and purposeful facial recognition. Poor correlations between facial bony structures and facial soft features are one of the main points of critiques of facial approximation methods. Suk [19], based on his research of the relationship between measurements of the nose and the piriform aperture, rejected the existence of any correlations between soft tissues of the face and the skull and stated that any identification based on comparing a skull with a portrait is completely

* Corresponding author.

E-mail address: mala.mala@email.cz (P. Zedníková Malá).

unscientific. Brues [20] stated that areas of the face, such as the tip of the nose, the lips, and the fleshy part of the cheek are not predictable from the skull, and three-dimensional clay facial approximation methods are better left to detective fiction. Similarly, the inability to predict soft-tissue features vital for face recognition (the nose, lips and eyes) is mentioned by Rathbun [21]. Haglund and Reay [22] experienced a failure of facial approximation to achieve its goal and discussed its usefulness for personal identification. Stephan [23] reported that the traditional facial approximation method, in its entirety, appears to be more appropriately described as a pseudoscience. A certain amount of skepticism accompanies facial approximation methods ever since they were first used in practice. Limitations that render facial approximation methods unlikely to generate accurate face appearance are still present and well described by Stephan [24]. A limited number of described and empirically proved relationships between the skull and the face (prediction guidelines) [8–13,25–35] cannot represent the intricacy and complexity of the soft tissues overlying the skull.

Craniofacial relationships and the predictive potential of the facial skeleton for estimating the soft-tissue form of the facial profile have been previously studied by several authors. Subtelny [36] concluded that all parts of the soft-tissue profile do not directly follow the underlying skeletal profile. Park and Burstone [37] suggested that any given dentoskeletal standard had questionable validity in producing either desirable aesthetics or reproducible profiles following treatment. The relationship between the lips posture and the underlying structures have been investigated mainly by orthodontists. The effect of orthodontic treatment on the upper and lower lip changes was examined by many of them [38–44] with varying results. Yasutomi et al. [45] proposed prediction of the lips position from the changes of the maxillary and mandibular incisors position. Lee et al. [46] focused their research on the perioral region and evaluated skeletal and dental variables affecting soft tissue thickness by comparing sample of skeletal Class II malocclusion and normal occlusion of Class I. Many researchers have studied the nasal region. Inada et al. [47], Utsuno et al. [48] and Allam et al. [49] investigated relationship between the cephalometric nasal and the skeletal landmarks in children. Utsuno et al. [31] studied the morphology of the maxilla and nasal bone in the mid-sagittal plane in order to predict the position of the *subnasale* point. Stephan et al. [25], Rynn et al. [10], Utsuno [32], Tedeschi-Oliveira et al. [50], proposed methods for the estimation of nasal tip position and George [51] developed technique for entire facial profile approximation based on lateral cephalographs. Ridel et al. [52] and Lee et al. [53] used linear dimensions obtained from cone-beam computed tomography (CBCT) scans to determine correlations between hard and soft tissues of the nose, and proposed population-specific regression equations to predict the nose position for a South African and a Korean sample, respectively.

The aforesaid studies analysed linear and angular measurements of the whole cranium or its regions and linear or angular measurement of soft tissues. Spatially sparse distance measurements are usually simple to implement, but they are not sufficient to represent the rich details of the region [54], especially of shape variation. Compared with classical morphometrics, which use distances, angles or ratios, geometric morphometric methods use coordinate data in 2D or 3D for the analysis of shape variation [55]. All geometric information is considered simultaneously throughout the statistical analysis, which enables the effective visual representation of shape changes [56–58], rather than solely the examination of changes of individual traits [55]. Together with the relatively large amount of shape variables, this gives rise to a specific exploratory style of analysis [59]. The use of geometric morphometric methods is widespread in biology, and their application has recently extended to forensic anthropology [60].

A few attempts have been made to employ geometric morphometrics to explore shape covariation between the skull and face and to estimate the shape of facial organs [54,61,62] or the whole facial profile [1,63] or the entire facial surface [54,62,64]. Kustár et al. [61] studied computed tomography (CT) records of 400 clinical patients and evaluated the amount of covariance between skeletal landmarks (37 in total) located around the orbits, nasal aperture and lower border of the mandible, as well as soft-tissue landmarks (30 in total) on the nose and the general facial outline. They revealed a highly significant overall strength of covariation between hard- and soft-tissue shape changes that reinforced some previously suggested specific prediction guidelines [10,25,65]. Guyomarch [62] examined CT scans of 500 individuals to create a new computerized method for estimating face shape. The position and shape of the eyes, nose, mouth and ears (41 sensory landmarks) was inferred from cranial landmarks (87 in total) by means of geometric morphometrics, which revealed significant correlations between bone and soft tissues in terms of shape. They conclude that it is possible to infer facial appearance using cranial morphology to a certain extent and that the use of outlines may help improve the accuracy of the estimation [62]. Similarly, Deng et al. [17], who suggested an improved regional method for computerized craniofacial reconstruction, explored craniofacial relationships using 80 cranial and 25 facial landmarks, and found a strong association between the shape of soft tissues and the shape of the underlying bones in particular facial regions (see Fig. 9 in Ref. [17]). Rose et al. [63] employed Fourier analysis to analyse the shape of the lateral soft-tissue profile and investigated the relationship between Fourier harmonics and traditional skeletal cephalometric measurements in attempt to formulate a soft-tissue prediction model. They found statistically significant linear correlations. Although the predicted images of the facial profile showed loss of fine details, the authors stated the method could be useful in forensic facial reconstruction because it provides an estimation of the overall facial shape and contour [63]. Halazonetis [1] considered 19 dento-skeletal (10 of them located on the facial skeleton) and 22 soft-tissue landmarks of the profile outline, and assessed the correlation between these two shapes. He pointed out the importance of the nasal and incisor points to increase significantly the predictive power of the facial hard-tissue pattern and stated that the results of his prediction model seemed decidedly better than those produced by Rose et al. [63]. Young et al. [64] evaluated the degree to which external three-dimensional face shape (29 landmarks) is an accurate proxy of skeletal morphology (114 landmarks) and found highly significant covariation of these two shapes.

In contrast to the studies listed above, where investigations were performed on a more or less dense 'cloud' of separate landmarks, we considered continuous curves to maintain detailed shape information on both soft tissues and hard tissues. The purpose of this study was to assess the strength of the association between craniofacial shape and the shape of soft tissues in the profile and to determine the extent to which it might be possible to predict the latter from the former.

2. Materials and methods

2.1. Materials

The population sample consisted of lateral head cephalograms of 86 healthy adult subjects of Central European descent: 52 males (aged 21–43 years) and 34 females (aged 19–39 years). The X-ray images were taken between 1977 and 1992 at the Stomatology Clinic of the Kralovske Vinohrady hospital in Prague, Czech Republic. The samples were from individuals without obvious facial disharmony or reverse occlusion, as well as from individuals

never having undergone orthodontic treatment. Most of the individuals were of young adult age (males, mean age: 30 years; females, mean age: 21 years). The soft-tissue profiles were therefore not influenced by advanced ageing changes.

The lateral X-ray images were taken under standard conditions: The centric occlusion and the patients' heads were fixed in a stable position with a cephalostat. The focus film distance was always 400 cm, and the object to film distance was 30 cm; the magnitude of enlargement was always constant, at 8.1% [66]. One of the important advantages of teleroentgenography is its very small distortion and the sharp contours of the displayed structures [67].

2.2. Methods

2.2.1. 2D imaging

The lateral profile outline, including both soft-tissue and bony facial profiles, was traced from each cephalogram (Fig. 1A–C, for more detailed example of cephalograms see [28,29]), using a 0.5 mm HB retractable pencil and a fluorescent light box in a darkened room with aperture style shields to remove excess light generated by the light box. A similar technique was used by Stephan et al. [25], Rynn et al. [10], Inada et al. [47] and Utsuno et al. [31]. The Frankfort horizontal reference plane was drawn to assist in the orientation of the profile outlines. Each tracing was then scanned with a scale by a 2-dimensional (2D) table scanner at 300 dpi resolution. The images were further processed using Adobe Photoshop CS5 (Adobe Systems, San Jose, CA). The images were saved in black and white, rescaled with regard to the 8.1% enlargement back to size 1:1 and cropped. Relevant anthropometric points were marked (Table 1, Fig. 3A). Two separate images were produced from each tracing, one with the soft-tissue profile outline and the other with the bony profile outline. The right side of the profile image was then bucket-filled in black and the plane and any impurities on the left side of the profile image were deleted so that a pure silhouette remained (Fig. 2). Some of the bony silhouettes required further arrangements of the upper part of the nasal aperture contour and of the teeth region contour (Fig. 1D–E), to prevent the introduction of any interference into the curve analysis. If there was an uneven (serrated) distal margin of nasal bones forming the contour of the nasal aperture, it was smoothed by connecting the points *rhinion* and *naso-gnatic* by a straight line. In the presence of a psalidont occlusion (i.e. when the maxillary incisors overbite the incisal margins of the mandibular incisors), the points *incision superior* and *infradentale* were connected by a

straight line as well. If there was a pronounced depression between the alveolar margin (points *prosthion* and *infradentale*) and the margin of the tooth crown, this area of transition between bone and tooth was smoothed similarly as described above (compare the skeletal outlines in Fig. 1C–E).

2.2.2. Semilandmark acquisition

Semilandmarks on opened curves (contours of the soft-tissue and bony facial profile) were employed in this study. The geometric morphometric procedure, including the acquisition of semilandmark coordinates, was executed in the software Morphome3cs [www.morphome3cs.com]. First, the outline of the facial profile was divided into several parts for reasons concerning the aim of this study and the statistics used: (i) The curve of the facial profile contour as a whole is highly complex and would not allow a detailed analysis focused on particular facial regions, and (ii) Too many semilandmarks along the whole facial curve in relation to sample size would have to be used to analyse it as a whole. Each particular part of the curve was defined as the bone/soft-tissue contour connecting two adjacent landmarks (defined anthropometric points, Fig. 3B, Table 1). The segmentation of the curve was an automatic procedure. For each bone and soft-tissue part of the curve, 18 semilandmarks were placed at constant curvilinear increments along the edge of the bone/soft tissues (bone/soft tissues – background interface) between two border landmarks, recording their locations (Fig. 3C). The result of the segmentation was a sequence of 2D coordinates for 20 points. Simultaneously with the segmentation, the coordinates were standardized in way that the first landmark was defined by the coordinates 0.5 and 0, and the last one by the coordinates –0.5 and 0. Semilandmarks were regarded as landmarks in the subsequent analysis.

2.2.3. Measurement error

Intra-observer error analysis assessed variation caused by various steps in the method. Ten randomly selected specimens were measured five times by one observer with an interval at least one week. It involved repeated outlining from input X-Ray images, profile curve starting and ending landmarks digitization, automatic curve segmentation and final semilandmarks coordinates acquisition in the software for representative subset of profile curves (4 soft and 4 hard ones).

In order to prove that groups of specimen measurements are distinguishable from each other, multivariate analysis of variance (MANOVA) was performed on PCA scores of all measurements for

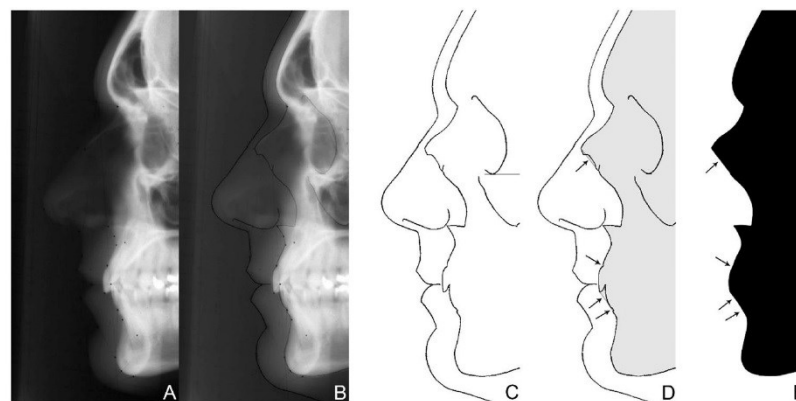


Fig. 1. An example of outline extraction and adjustments in upper nasal and dental area. (A) A lateral head cephalogram (cropped); (B) A superimposition of the cephalogram and the traced outline of the soft-tissue and hard-tissue profile; (C) A contour of the soft-tissue and the skeletal facial profile; (D) An illustration of adjustments made in some of the outline tracings, marked by arrows; (E) A silhouette of the skeletal profile after contour adjustments.

Table 1
Soft-tissue and hard-tissue landmarks along the profile contour of the skull and face^a.

Landmark	Abb.	Type [68]	Definitions	Reference
Skeletal landmarks along the contour line/midline				
Vertex	V	III	The highest ectocranial point	[69]
Supraglabellare	Sg	III	The deepest point in the groove superior to the glabella [fossa supraglabellaris]	[51]
Glabella	G	III	The most anterior point on the frontal bone	[69]
Rhinion	Rhi	I	The point at the inferior free end of the nasal bones	[69]
Naso-gnathic	Ng	I	The lowest point of the nasal-maxillary suture, on the border of the piriform aperture	[70]
Nasal Aperture Base	NAB	III	The point at the nasal aperture border at its base	[25]
Acanthion	Ac	I	The tip of the anterior nasal spine	[10]
Prosthion	Pr	II	The point at the most anterior edge of the alveolar ridge of the maxillae	[69]
Incision Anterior	InA	III	The most anterior point on the labial surface of the maxillary incisor	Author
Incision Superior	InS	I	The tip of the maxillary incisor crown	[28]
Infradentale	Id	II	The point at the most anterior edge on the alveolar ridge of the mandible	[71]
Menton	M	III	The most inferior point at the mental symphysis of the mandible	[69]
Soft-tissue landmarks along the contour line/midline				
Vertex'	V'	III	The highest soft-tissue point of the head; perpendicular to the skeletal counterpart vertex [V]	[69]
Supraglabellare'	Sg'	III	The deepest point in the groove superior to the glabella' [G']; perpendicular to the skeletal counterpart supraglabellare [Sg]	[51]
Glabella'	G'	III	The most anterior midline soft-tissue point overlying the hard-tissue glabella [G], on perpendicular to the skeletal counterpart [G]	[69]
Rhinion'	Rhi'	I	The soft-tissue point directly above the hard-tissue rhinion, perpendicular to the skeletal counterpart rhinion [Rhi]	[69]
Collumela Flexure	CF	III	The point of transition between the nasal tip upward flexure and the collumela/septum downward flexure, anterior to the subnasale soft-tissue point	Author
Labrale Superior	LS	I	The point in the vermilion border of the upper lip	[51]
Labrale Inferior	LI	I	The point in the vermilion border of the lower lip	[51]
Menton'	M'	III	Most inferior soft-tissue point at the chin directly overlying the hard-tissue menton, perpendicular to the skeletal counterpart menton [M]	[69]

^a Skull/Soft-tissue face oriented according to Frankfurt' horizontal plane.

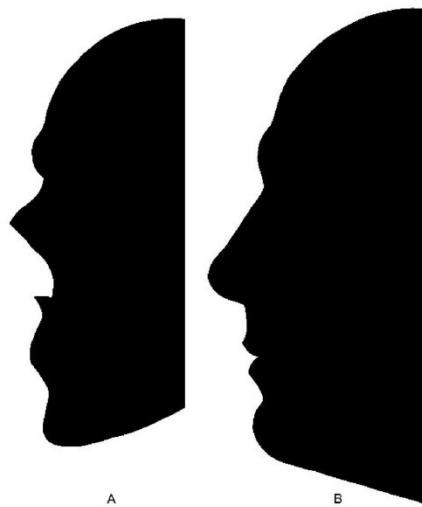


Fig. 2. Examples of images used for facial curve analysis. (A) A silhouette of the skeletal profile used for the acquisition of semilandmarks, contour after adjustments in the upper nasal and the dental area; (B) A silhouette of the soft-tissue profile used for semilandmark acquisition.

each profile curve as dependent variables and specimen as a factor [72]. Number of components which were included into MANOVA test was chosen based on Broken stick criterion [73] and was in all cases 2 or 3 and covered approx. 95% overall variability. In all cases, specimen factor has statistically significant effect shape variables (see Table 2).

Apart from statistical proof of differences between specimen measurements, error of repeated measurements was computed and compared with variability of specimens [74]. It was found that for all profiles variability of specimens was at least three times larger than variability of repeated measurements, which is better than was acceptable for similar curve analysis study [75].

Coefficient of reliability and starting and ending landmarks digitization mean error for each of the curves were calculated.

2.2.4. Statistical analysis

There are several approaches to evaluating (i.e. describing and quantifying) mutual relationships between the soft-tissue profile and the bony profile of the face. In this study, statistical analysis was performed according to the procedure of Halazonetis [1], Rohlf and Corti [76] and Klingenberg [77].

Following Halazonetis [1], shape coordinates of each part of the profile curves were subjected to principal component analysis (PCA), which produced a set of variables called principal components (PCs). The number of PCs included in the subsequent statistical testing was determined by the broken-stick rule [73]. PCs of the skeletal and soft-tissue shapes were then entered into the correlation analysis. Multiple linear regression between each soft-tissue PC (dependent variable) and all PCs of the bony profile curve (the predictors) were calculated. The total variance of soft-tissue shape that could be predicted by each skeletal shape was calculated by multiplying the variance explained by each soft-tissue PC with the corresponding coefficient of determination (r^2) of the multiple regression and adding the results. This method was considered statistically sound because the PCs are uncorrelated to each other. The final result represents the total percentage of variance of soft-tissue shape that could be explained (or predicted) by skeletal shape. A predictive power of 50% should not be interpreted as implying that the prediction results were equivalent

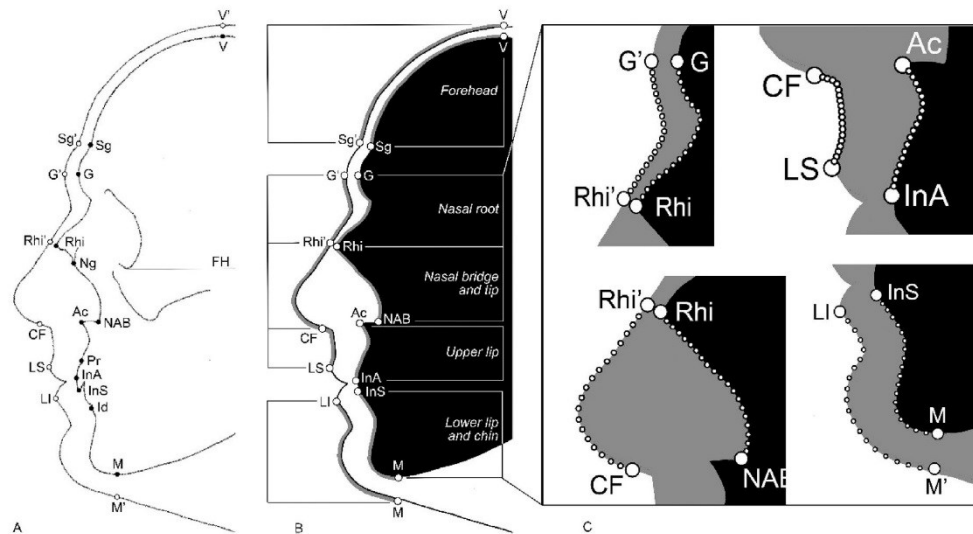


Fig. 3. Landmarks and facial profile curve division and segmentation. (A) Anthropometric points used in this study, definitions are summarized in Table 1, FH – Frankfurt's horizontal plane; (bB) Profile curve division. Forehead – cranial vault and overlying soft tissues between points V-Sg/V'-Sg', Nasal root – frontonasal transition and 'bony' part of the nose between points G-Rhi/G'-Rhi', Nasal bridge and nasal tip – contour of the lateral part of the nasal aperture and 'cartilaginous' part of the nose between points Rhi-NAB/Rhi'-CF, Upper lip – contour of the maxilla and upper incisors and cutaneous part of the upper lip between points Ac-InA/CF-LS, Lower lip and chin – contour of lower incisors and the mandible between points InS-M/LI-M'; (C) An illustration of segmentation of the facial profile curves into 20 landmarks made automatically in the software Morphome3cs.

Table 2
Summary of intra-observer error analysis for representative subset of profile curves.

Profile curve	PCA components	Pillai's Trace	F (df= 18, 80)	P	Coefficient of reliability	Mean border landmarks error (mm)
Hard-tissue contour						
G-Rhi	2	1.9022	86.49	<2.2e-16 ***	0.96	0.2
Rhi-NAB	2	1.8534	56.206	<2.2e-16 ***	0.96	0.2
Ac-InA	2	1.9279	118.87	<2.2e-16 ***	0.96	0.3
InS-M	2	1.9811	467.15	<2.2e-16 ***	0.99	0.2
Soft-tissue contour						
G'-Rhi'	2	1.8657	61.749	<2.2e-16 ***	0.94	0.2
Rhi'-CF	3	2.7379	46.419	<2.2e-16 ***	0.92	0.2
CF-LS	2	1.8688	63.305	<2.2e-16 ***	0.95	0.2
LI-M'	3	2.7931	60.01	<2.2e-16 ***	0.97	0.5

to guesswork, but it means that we improved on the average by moving toward the true shape 50% of the way [1].

Another approach used to explore the pattern of covariation between two sets of variables (shapes) was partial least squares (PLS) analysis [76] between two blocks. The PLS analysis described the relationship between two shapes by the amount (percentage) of covariance explained by paired singular vectors and the correlation 'r' of the PLS scores between two blocks (shapes). This correlation coefficient 'r' was used as a measure of the correspondence between the two curves [78]. Permutations tests (N = 10,000) were calculated to assess the statistical significance of the singular warp scores correlations. PLS analysis was performed in such a way that the shapes of the corresponding curves were analysed separately, as they were entirely separate configurations (the 'separate-subset' approach) [79]. This approach ignores the anatomical connection of the two subsets and therefore records covariation between the subset only if there are joint changes of shape within each subset. The results of the PLS analysis were visualized by thin-plate splines (Figs. 6–9), it should be mentioned that the thin-plate splines and curves presented in the figures did not reflect their actual relative positions.

Finally, the RV coefficient introduced by Klingenberg [77] was used as a scalar measure of the strength of the association between the coordinates of the two corresponding curves. The RV coefficient takes values between zero and one. It is zero if all covariances between two sets of variables are zero, which means that the two corresponding curves are completely uncorrelated with each other. The RV coefficient equals one if one of the sets of variables differs from the other only by some combination of rotation, reflection, scaling or translation.

All analyses were carried out using Morphomet3cs software (version 2.0, Department of Software and Computer Science Education, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague), Morpho J software (version 1.05d, [79]), PAST software (version 2.17b, [80]), the Thin-Plate Spline (TPS) package (<http://life.bio.sunysb.edu/morph/>) and MS Excel 2010 [Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA].

3. Results

The results are summarized in Table 3 and illustrated in Fig. 4–9.

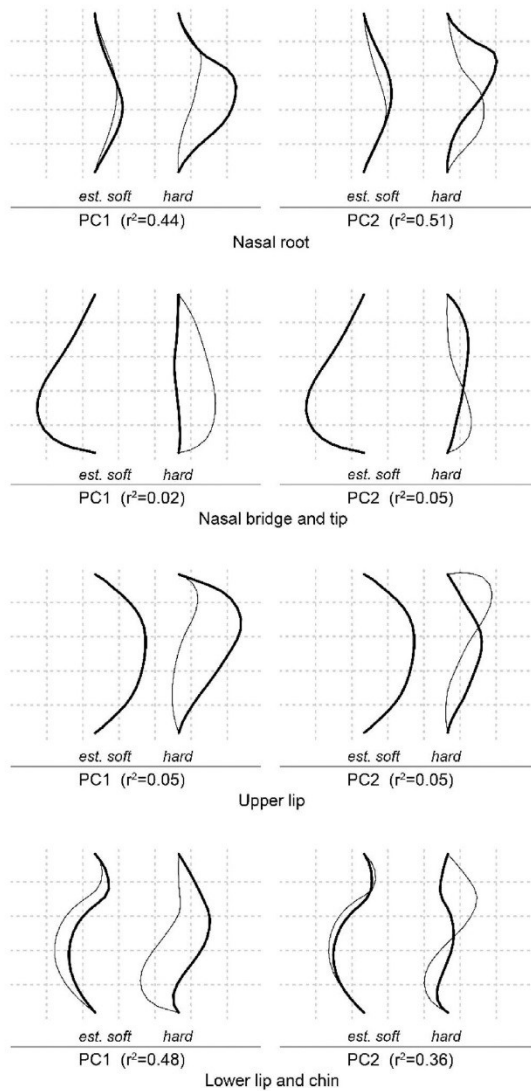


Fig. 4. Visualization of predictive power of the bony contour according to Halazonetis [2007].

The hard-tissue shapes (generated according to individual PC extremes with ± 3 sd of PC score values) as predictors (graphs on the right side of each soft/hard-tissue pair) and the corresponding estimates of soft-tissue shapes (graphs on the left side of each soft/hard tissue pair) are displayed for each of the profile curve. For the hard-tissue shapes bold line represents $+3$ sd of PC scores, thin line represents -3 sd of PC scores, for the soft-tissue estimates bold and thin lines represent predictions corresponding to hard-tissue shapes, r^2 -weighted coefficient of determination. Note that very low r^2 for Nasal bridge and tip and Upper lip did not allow any visible prediction of soft-tissue shape (bold lines and thin lines are superimposed over each other in consensus (average) of the shape).

Variability of the hard-tissue and soft-tissue shapes was described by 36 PCs. The significant PCs (Broken stick rule [73]) accounted for more than 93% of the total shape variance. The graphic depiction of the first two PCs is given in Fig. 4 for hard-tissue shapes and in Fig. 5 for soft-tissue shapes. In general, the main shape changes occurred along the horizontal and vertical

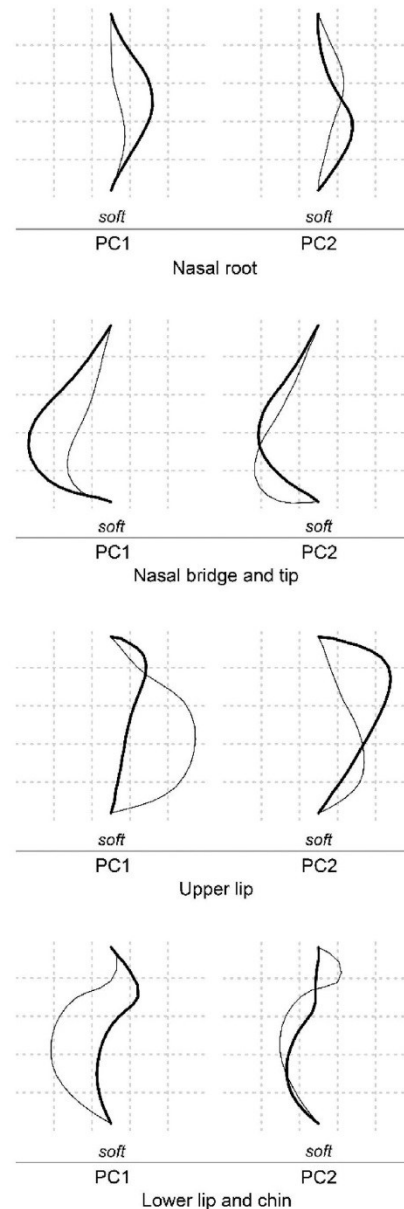


Fig. 5. The variability of soft-tissue profile curves described by significant PCs. Bold line represents $+3$ sd of PC scores, thin line represents -3 sd of PC scores.

axes, i.e. they concerned the antero-posterior position (protruding/flat/deep character of the particular feature) and the vertical position of the most anterior (prominence) or posterior (depression) points of the curves.

Multiple linear regression revealed coefficients of determination (r^2) for soft-tissue shape estimation (Fig. 4), they ranged from to 0.02 (Nasal bridge and tip and Upper lip) to 0.5 (Nasal root and Lower lip and chin). To gain a visual impression of the predictive

Table 3

The results of statistical analysis (multiple linear regression, PLS and RV coefficient) of all corresponding parts of the facial profile curves.

Part of the facial curve	Multiple linear regression Halazonetis [1]	Two block-partial square analysis Bastir et al. [78], Klingenberg [77] separate subset				RV coefficient Klingenberg [77] separate subset
		PLS1		PLS2		
		% total covar.	correl.	% total covar.	correl.	
Forehead	95.1%	99.6%	0.96	0.42% ^a	0.72	0.91
Nasal root (bony part of the nose)	40.2%	65.6%	0.72	34.3%	0.58	0.42
Nasal bridge and nasal tip (cartilaginous part of the nose)	5.8%	97.8% ^a	0.26 ^a	1.6% ^a	0.19 ^a	0.05 ^a
Upper lip	9.6%	99.1%	0.43	0.4% ^a	0.1 ^a	0.14
Lower lip and chin	37.3%	95.1%	0.65	4.6%	0.57	0.41

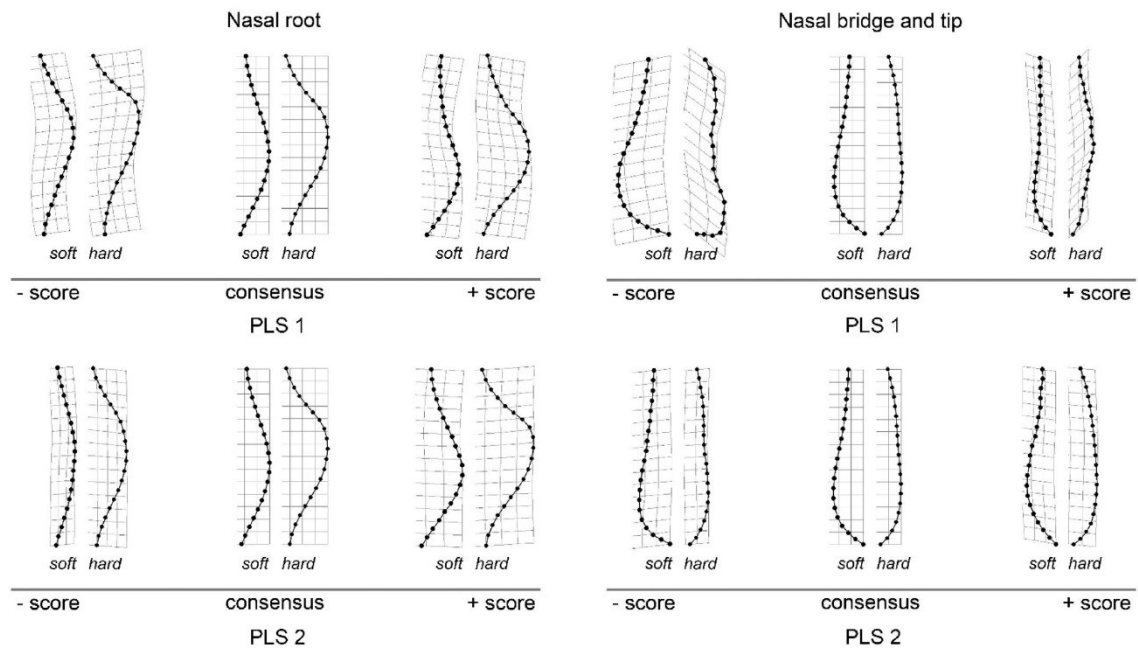
^a Not statistically significant.

Fig. 6. PLS analysis of the nasal root curve. Top: PLS1. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the skeletal (right curve) and soft-tissue (left curve) nasal root along the PLS1 axis (65.6% of total covariation). Correlation of PLS1 scores (first singular warps) between the skeletal and soft-tissue nasal root, $r = 0.72$ ($P < 0.0001$). Bottom: PLS2. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the skeletal (right curve) and soft-tissue (left curve) nasal root along the PLS2 axis (34.3% of total covariation). Correlation of the PLS2 scores (second singular warps) between the skeletal and soft-tissue-nasal root, $r = 0.58$ ($P < 0.0001$).

Fig. 7. PLS analysis of the nasal bridge and tip curve. Top: PLS1. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the contour of the nasal aperture (right curve) and the soft-tissue nasal bridge and tip (left curve) along the PLS1 axis (97.8% of total covariation). Correlation of PLS1 scores (first singular warps) between the nasal aperture and the soft-tissue nasal bridge and tip, $r = 0.26$ ($P = 0.1330$). Bottom: PLS2. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the contour of the nasal aperture (right curve) and the soft-tissue nasal bridge and tip (left curve) along the PLS2 axis (1.6% of total covariation). Correlation of PLS2 scores (second singular warps) between the nasal aperture and the soft-tissue nasal bridge and tip, $r = 0.19$ ($P = 0.4488$).

power of hard-tissue shapes the regression equations were used to derive estimates for the first two PCs of the soft-tissue shapes (Fig. 4). It is evident that estimations of soft-tissue shapes in the regions with the greatest predictive power (i.e. ca. 40%, Nasal root and Lower lip and chin) hardly cover the shape variability of soft tissues as expressed by the first two PCs (Fig. 5). Prediction power lower than 10% (region of Upper lip and Nasal bridge and tip) was not sufficient to produce any visible soft-tissue shape estimate.

3.1. Forehead

The curves of the cranial vault and overlying soft tissues showed the greatest amount of association. The predictive power,

calculated according to Halazonetis [1], was 95.1% and the RV coefficient [77] was 0.91. Partial least square (PLS) analysis revealed one significant ($P < 0.0001$) singular value (PLS1) that explained 99.6% of the total shape variance and showed a strong statistically significant ($P < 0.0001$) correlation between skeletal and soft-tissue contours, $r = 0.96$. The strength of the association of this part of the profile curves was evaluated just to establish the maximum level of covariation between the shape of hard and soft tissues of the facial profile for comparison with other parts of the profile facial curve.

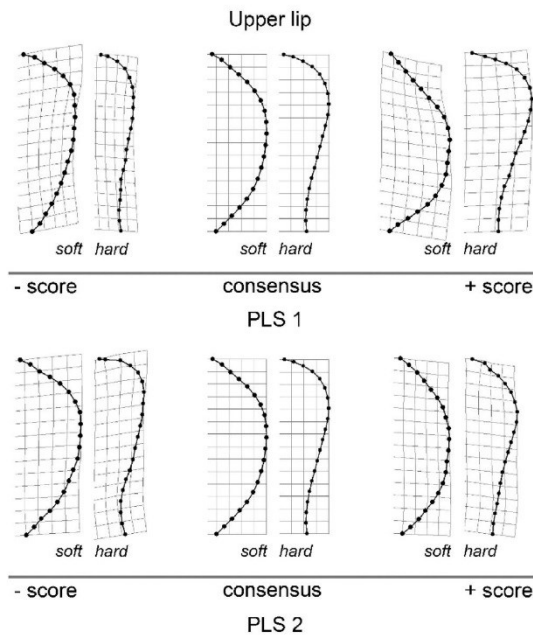


Fig. 8. PLS analysis of the upper lip curve. Top: PLS1. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the contour of the maxilla (right curve) and the soft-tissue upper lip (left curve) along the PLS1 axis (99.1% of total covariation). Correlation of PLS1 scores (first singular warps) between the contour of the maxilla and the soft-tissue upper lip, $r=0.42$ ($P<0.001$). Bottom: PLS2. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the contour of the maxilla (right curve) and the soft-tissue upper lip (left curve) along the PLS2 axis (0.4% of total covariation). Correlation of PLS2 scores (second singular warps) between the contour of the maxilla and the soft-tissue upper lip, $r=0.1$ ($P=0.7573$).

3.2. Nasal root

This part of the face displayed the second strongest degree of association between hard and soft tissues. The predictive power of the bony nasal contour was 40.2%, which means that we improved on the average by moving toward the true shape 40% of the way. The RV coefficient was 0.42.

PLS analysis revealed two statistically significant ($P<0.0001$) singular values and correlations of PLS scores (i.e. singular warps, [78]) between the shape of hard and soft-tissue curves of the frontonasal transition. The first PLS (PLS1) explained 65.6% of the total covariation between the shapes, and the correlation between the skeletal PLS1 axis and the soft-tissue PLS1 axis was 0.72. PLS1 described (Fig. 6) the shifting of the deepest point of the nasal root along the vertical axis and represented the relative height of the frontal part to the nasal part of the frontonasal transition. The most posterior point of the frontonasal transition of the skull was positioned always higher than the corresponding point of the soft tissues.

The second PLS (PLS2) accounted for 34.3% of the total shape covariation, and the correlation between the skeletal PLS2 axis and the soft-tissue PLS2 axis was 0.58. PLS2 represented the depth of the nasal root region in terms of whether it was shallow or pronounced. The contour of soft tissues followed the shape of the underlying bones; a deeper skeletal contour was connected with a deeper soft-tissue frontonasal transition. However, the amount of shape changes was not equal, as soft tissues were always shallower than the underlying bone. Soft tissues displayed a tendency to smooth down a pronounced frontonasal transition (Fig. 6).

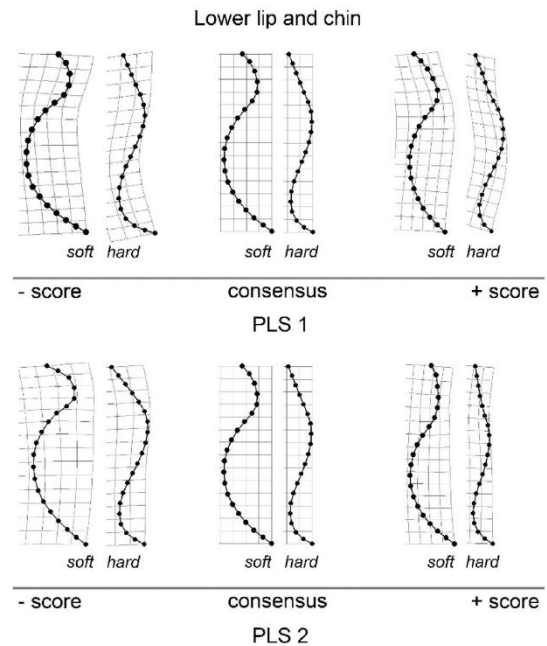


Fig. 9. PLS analysis of the lower lip and chin curve. Top: PLS1. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the contour of the mandible (right curve) and the soft-tissue lower lip and chin (left curve) along the PLS1 axis (95.1% of total covariation). Correlation of PLS1 scores (first singular warps) between the contour of the mandible and the soft-tissue lower lip and chin, $r=0.65$ ($P<0.0001$). Bottom: PLS2. Thin-plate splines indicating the shape covariation between the contour of the mandible (right curve) and the soft-tissue lower lip and chin (left curve) along the PLS2 axis (4.6% of total covariation). Correlation of PLS2 scores (second singular warps) between the contour of the mandible and the soft-tissue lower lip and chin, $r=0.57$ ($P<0.0001$).

3.3. Nasal bridge and tip

The lateral contour of the nasal aperture and the soft-tissue nasal bridge and nasal tip showed the lowest amount of association within the explored parts of the facial profile curve. The predictive power of the bony contour was 5.8% and the RV coefficient was 0.05 ($P=0.0645$). The first PLS score (PLS1) revealed by PLS analysis was on the border of statistical significance ($P=0.0647$), although it explained 97.8% of the total shape covariation between the hard- and soft-tissue contours. PLS1 described shape changes of the lateral contour of the piriform aperture in the sense of the convexity and concavity of its middle part and the angular and rounded pattern of its inferior part ($r=0.26$, $P=0.1330$). Associated shape changes of the soft-tissue nasal profile were less marked. A waved (convex middle part) nasal aperture border and its posteriorly rounded base was connected with a rounded and anteriorly projecting nasal tip (the most negative values of PLS1). A concave contour that is angular at its base (i.e. the angular transition between the lateral border and the bottom of the nasal aperture) was related to a rather straight nasal profile and a small/pointed and not prominent nasal tip (Fig. 7). However, the association between skeletal and soft-tissue curves was weakly correlated ($r=0.26$, $P=0.1330$).

The other PLS scores (statistically insignificant, $P>0.3$) described only small and local shape changes ($r<0.2$, $P>0.4$) (Fig. 7).

3.4. Upper lip

The upper lip (cutaneous part) and the underlying maxilla showed the second lowest amount of association between the skeletal and soft-tissue profile curves. The predictive power of the bony contour was 9.6% and the RV coefficient was 0.14 ($P < 0.001$). PLS analysis found one statistically significant ($P < 0.0002$) PLS scores (PLS1) that explained 99.1% of the total shape covariation. The correlation between the skeletal PLS1 axis and the soft-tissue PLS1 axis was 0.42 ($P < 0.001$). PLS1 comprised changes in the depth of the upper jaw contour (anteroposterior position of *subspinale* point/point A) and corresponding changes in the relative length of the anterior nasal spine inferior crest. Soft-tissue shape changes showed a similar pattern as the underlying bone. The upper lip contour ranged from rather straight/shallow to very concave/deep. Beside these changes, the vertical position of the most posterior point on the lip contour shifted, corresponding with changes of the height of the cutaneous part of the upper lip (Fig. 8). In summary, a shallow contour of the maxilla and a short anterior nasal spine were associated with a rather straight upper lip and a short/less projecting nasal columella. The deeper contour of the maxilla and the more projecting anterior nasal spine were, the more concave and less high was the upper lip. The shapes of the skeletal and soft-tissue contours were more similar to each other in cases of a flat upper jaw (negative scores of PLS1) in contrast to more different shapes of hard and soft tissues in cases of a pronounced curvature of the maxilla. Similarly as in the case of the frontonasal transition, it seems that soft tissues tend to smooth down notably deep skeletal contours.

The other singular PLS values were statistically insignificant ($P > 0.2$), showing weak and insignificant ($P > 0.3$) correlations ($r = 0.1$) (Fig. 8). However, Fig. 8 shows associated shape changes of hard and soft tissues along the PLS2. It described the height and anterior projection of the anterior nasal spine inferior crest together with direction of the inferior edge of the anterior nasal spine tip that might be related to a visible/hidden and upturned/straight forward directed nasal columella. It could be noted that inferior part of the hard-tissue curve representing maxillary teeth didn't produce any response in soft-tissue shape.

3.5. Lower lip and chin

The strength of the association between the skeletal and the soft-tissue lower part of the facial profile curve was similar to that of the nasal root. The predictive power of the contour of the mandible was 37.3%, and the RV coefficient was 0.41. PLS analysis revealed two statistically significant ($P < 0.0001$) singular values and correlations of PLS scores between the shape of hard and soft-tissue profile curves of the lower face. The first PLS axis (PLS1) explained 95.16% of the total covariation between the shapes, and the correlation between the skeletal PLS1 axis and the soft-tissue PLS1 axis was 0.65 ($P < 0.0001$). PLS1 described the continuum between a protruding (robust) and receding (gracile) mental eminence together with changes in mental eminence height relative to the height of the supramental/alveolar part. The soft-tissue contour followed the same pattern, but it was not 'a copy' of the mandibular contour. Soft tissues seemed to be more pronounced and, opposite to the nasal root part, they highlighted the shape pattern of the underlying bone (Fig. 9). Cranial points *B* (the most posterior point of the mandible profile) and *pogonion* were positioned lower than their soft-tissue counterparts.

The second PLS (PLS2) explained 4.6% of the total shape covariation, and the correlation between the skeletal PLS2 axis and the soft-tissue PLS2 axis was 0.57 ($P < 0.0001$). PLS2 described the transition between a shallow/flat contour and a well-curved contour of the lower jaw and alveolar/dental prognathism (Fig. 9).

A strongly concave contour of the mandible was associated with a pronounced chin, a deep inferior labial sulcus and a prominent lower lip. A flat contour of the lower jaw was associated with a rather flat chin and a straight lower lip without a notable inferior labial sulcus fold.

4. Discussion

The sample was analysed as a whole without being subdivided into male and female groups. This was done because of the relatively small sample size ($n = 86$) and because facial approximation techniques and principles, apart from only a few prediction guidelines, did not distinguish between the sexes. Similarly, age effects were not investigated because the sample was relatively age-homogenous.

4.1. Forehead

Soft tissues of the cranial vault and forehead are closely attached to the underlying bone and it was expected that this region would show the greatest amount of shape association. It was analysed to provide the relevant maximum level of covariation between the shape of hard and soft tissues of the facial profile and to serve as a reference value for comparison with other parts of the profile facial curve.

4.2. Nasal root

The thin-plate spline of PLS1 revealed that the soft-tissue landmark *nasion* is positioned lower than the cranial landmark *nasion*, in agreement with George [81], and that a very deep frontonasal transition does not necessarily lead to a very deep nasal root. Simple copying of the skeletal contour to the soft-tissue outline, as sometimes occurs in facial approximations (e.g. [5], see Fig. 13.45, p. 461), does not constitute a valid approach. The estimated depth of the frontonasal transition in profile influences the overall nasal and midorbital appearance from frontal view and incorrect approximation of this region can alter the overall look of the face and make facial recognition more difficult. A pattern of shape changes similar to the one described here by the PLS2 axis was found by Kustár et al. [61].

4.3. Nasal bridge and nasal tip

Much attention has been dedicated to the relationships between the morphometry of the nasal aperture and adjacent skeletal structures and the nasal projection (position of the *pronasale* point) and their validation [10,25,30,27,32,82], but the approximation of the shape of the nasal profile line was omitted and described by only one method [6,70]. PLS analysis in this study revealed a very small amount of association between the nasal aperture lateral border and the shape of the cartilaginous part of the nose in profile. It does not seem that the shape of the soft-tissue nasal profile is simply a mirror image of the opposite nasal aperture viewed from the profile [6,70]. Only a statistically insignificant association between a rounded/angularized base of the piriform aperture contour and a rounded/pointed nasal tip was observed. This pattern in shape covariation was reported by Rynn et al. [10] as significant. Prediction of the nasal profile shape, if possible, deserves more attention in future research.

4.4. Upper lip

The strength of the association between the sub-nasal region of the maxilla and the upper lip was relatively small in this sample, despite the skeletal support provided by alveolar surface and

anterior teeth. The role of maxillary incisors in lip morphology was commonly studied by orthodontists [36,37–42,45] but findings concerning results after teeth treatment vary. No significant correlation between the nasolabial angle and the anterior teeth correlation was reported by Yasutomi et al. [45] and Bourzgui et al. [42] and weak predictability of the upper lip based on the most anterior point of the incisor landmark was found [45]. In contrary, other authors [43] found strong correlation between the dental changes and the soft-tissue changes in this area. Reports of the correlation between maxillary incisor retraction and soft-tissue changes considerably vary according to sex, ethnicity, lip posture, lip strain, lip thickness or due to any other complex anatomy of the lips. There is agreement in the finding that changes in upper incisors don't affect position of *subnasale* point [43,44]. It seems that the maxillary incisors had only a local influence on the Upper lip curve shape in our study.

In fact, inaccuracies in sub-nasal soft-tissue contour approximation often occur in practice (e.g. [83], see Fig. 9, p. 161.e5) and, apart from soft-tissue depth measurement and recently proposed method for positioning of *subnasale* point [31], no reliable prediction guidelines exist for this part of the facial outline, which leaves the exact shape estimation of this feature rather problematic. Even such a detail influences the relative proportions of the nasal tip, nasal wings and the form of the nasal base/columella, both in lateral and frontal view.

4.5. Lower lip and chin

The lower part of the facial profile showed a good level of predictive power and association, similar to the nasal root, in relation to other parts of the facial outline, but the soft-tissue contour was not an exact copy of the underlying skeleton that was just shifted forward. The relationship between the cranial landmarks *pogonion* and *supramentale* (point B) and their soft-tissue counterparts *pogonion'* and *inferior labial sulcus* confirmed the results of George [81] that soft-tissue landmarks were positioned higher than cranial ones. Lower lip inclination was influenced by upper incisor inclination and projection (starting point of the curve). This trend was similar to the findings of Jogaki et al. [43]. On the other hand, Yasutomi et al. [45] found no significant correlation between labiomental angle and any anterior teeth position.

4.6. Overall results of strength of association

Direct comparison with other studies was difficult because of different assessment criteria.

Our results based on multiple linear regression [1] show the extent to which external facial form was dedicated by skeletal and dental structures on the one hand, and on the other hand by the soft tissues themselves. The differences in amount of correlation between the skeletal and soft-tissue shapes, as expressed by coefficient of determination ($r^2=0.02, 0.5$) for soft-tissue shape estimation (Fig. 4), reflect the mutual anatomical arrangement of hard/soft tissue features. Regarding the regions of nasal root and chin, the soft tissues fit closely to the underlying skeleton, while surface of the nasal bridge and tip is not directly supported by bony structures. Upper lip is supported by the anterior teeth and alveolar part of the maxilla but the superior part of the analyzed curve comprised the nasal base which shape might be difficult to estimate accurately from the skeletal structures. This could lead to low correlation and weak predictive power of the region.

The overall mean predictive power of the whole craniofacial profile curve from the *glabella* to the *menton* (without the forehead) was 23.2%. This means that 23.2% of the variability in soft-tissue shape was related to the shape of hard tissues and that the other 76.8% could be attributed to soft tissue-specific factors.

Halazonetis [1], whose statistical analysis was adopted in this study, reported an overall predictive power of 50%. He did not employ curve-to-curve shape analysis but assessed correlations between a set of 19 skeletal landmarks and 22 soft-tissue landmarks positioned along the facial profile contour (from the *nasion* to the *menton*). This difference in calculated predictive power could be due to the different number and type of landmark sets. Firstly, the greater number of semilandmarks employed in this study in attempt to represent the shape of the face in detail possibly introduces a certain amount of insignificant local shape patterns that could decrease the strength of the association (correlation) between soft tissues and underlying bones. Velemínská et al. [84] examined the effect of the number of semilandmarks/coefficients for curve representation on the success of classification between groups. A greater number of landmarks can result in a reduction of accuracy of sex determination [84]. They concluded that the optimal number was four and nine semilandmarks and coefficients, respectively. On the other hand, they found that methods of curve representation involving only semilandmarks were less dependent on the number that were included. We compared the results of multiple linear regression, PLS analysis and values of the RV coefficient for the nasal root curve using 10 and 20 semilandmarks (the results are not presented here). It turned out that the analysis with 20 semilandmarks provided slightly better results of shape covariation. Secondly, Halazonetis [1] analysed the entire soft-tissue facial profile, whereas in this study the facial curve was divided into parts and assessed separately. It is possible that the way in which the facial curve was divided and boundary landmarks were selected obscured other significant correlations between indirectly corresponding hard- and soft-tissue facial shapes. For example, Inada et al. [47] stated that skeletal *point A* or *acantion* (upper lip curve in this study) were strong predictors of the location of the soft-tissue point *pronasale* (nasal bridge and tip curve in this study). They also reported a significant association between the position of the soft-tissue landmark *subnasale* (upper lip curve in this study) and skeletal x and y-coordinates of *point B* (lower lip and chin curve in this study). It could therefore be beneficial to join together several parts of the analysed curves or to set different starting and ending points, particularly in the midfacial region, in a future study to reveal other relationships between hard and soft tissues of the face.

The results based on PLS analysis and RV coefficients allowed to visualize the association between the shape of hard and soft tissues and to quantify the correlation between principal variation patterns of dentoskeletal facial profile curves and soft-tissue facial curves. Apart from the cranial vault/forehead outline, which was examined only to assess the maximum of covariation (RV = 0.91, correlation for PLS1 = 0.96), the strongest association was found in the region of the frontonasal transition (nasal root curve, RV = 0.42, $r_{PLS1}=0.72$) and the lower lip and chin region (RV = 0.41, $r_{PLS1}=0.65$). RV coefficients were two times lower than for a simple contour of the cranial vault. The upper lip region showed an even smaller amount of covariation (RV = 0.14, $r_{PLS1}=0.43$) and the region of the cartilaginous nose (nasal bridge and tip) showed only a weak and statistically insignificant association between the hard- and soft-tissue contour (RV = 0.05, $r_{PLS1}=0.26$). Kustár et al. [61] conducted a preliminary geometric morphometric analysis (PLS analysis) to assess the strength of the covariation between a set of skeletal and soft-tissue landmarks located mainly in the midfacial region (orbits and the nasal aperture for the shape of bony structures and the nose for the shape of soft tissues) and reported an RV of 0.56. Similarly, Young et al. [64] reported an RV value of 0.56, resulting from overall covariation between face shape, represented by landmarks positioned mostly around the main facial features (the eyes, nose and lips), and the facial skeleton and mandible. They conclude that these results provide quantitative

statistical support for the idea that the shape of the facial skeleton is accurately predictable from external facial morphology [64]. On the other hand, Guyomarc'h et al. [62], who also used PLS analysis, reported an RV of c. 0.3 as their maximum correlation between the skeletal and soft-tissue matrices they studied (groups of landmarks of various anatomical regions, not only of the facial midline). They found strong statistically significant correlations for the nose region (RV = 0.21), moderate correlations for the mouth and ears (RV = 0.25 and 0.20, respectively) and low correlations in the region of the eyes (RV = 0.10) [62]. Based on these correlations, they developed a method for computer-assisted estimation of facial morphology using AFA3D software that worked with an uncertainty (average distances between measured and estimated landmarks) of facial approximations of 3.1 mm for the nasal region and 4.5 mm for the mouth region. They conclude that it is, to a certain extent, possible to infer facial appearance using cranial morphology [62].

Because the data sample used in this study is relatively small and from a single geographic population, our findings may not be fully representative. It is possible that some of the detected shape patterns and the strength of the association might be modified when larger samples and different geographic samples are employed.

The results of this study lead to the realization that soft tissues might not follow the underlying structures as closely as expected. A large part of facial shape variability is inherent in the soft tissues themselves [1]. However, the importance of hard tissues cannot be overlooked, as the amount of association found may be sufficient for the estimation of facial appearance, as shown by Guyomarc'h et al. [62]. The (estimated) soft tissue envelope of an individual will never be completely accurate, because soft tissue drape is extremely variable from one individual to another and there will always be people that will not fit in the 'average value' data range [85]. Further research in this topic involving geometric morphometrics is encouraged.

5. Conclusion

The aim of this study was to quantify the strength of the association between hard and soft tissues in the facial profile and to describe the most significant joint changes of both types of shape contours. We analysed the magnitude of shape covariance and the predictive power of skeletal base shape using three approaches. All of them provided similar results. Apart from the cranial vault/forehead outline, the closest relationship between bony and soft-tissue curves was displayed in the upper and lower face (nasal root and lower lip and chin). The middle part of the face (nasal bridge and tip and upper lip) showed a very small or even insignificant amount of shape covariance. Our findings correspond with the empirical observation that the shape of the nasal profile and the upper lip contour are difficult to reconstruct or predict reliably in facial approximations. It seems that the shape of soft tissues might not follow the underlying structures as closely as expected.

Author contribution statements

Pavla Zedníková Malá: Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing.

Vačlav Krajčiček: Formal analysis; Methodology; Validation; Software; Visualization; Roles/Writing – review & editing.

Jana Velemínská: Conceptualization; Funding acquisition; Resources; Supervision; Writing – review & editing.

Declaration of interest

None.

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Acknowledgments

The authors thank the Stomatology Clinic, Kralovské Vinohrady, Prague, for generating the X-ray images.

References

- [1] D.J. Halazonetis, Morphometric correlation between facial soft-tissue profile shape and skeletal pattern in children and adolescents, *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* 132 (2007) 450–457.
- [2] P. Claes, D. Vandermeulen, S. De Greef, G. Willems, J.G. Clement, P. Suetens, Computerized craniofacial reconstruction: conceptual framework and review, *Forensic Sci. Int.* 201 (2010) 138–145.
- [3] C.M. Wilkinson, Facial Reconstruction – Anatomical Art or Artistic Anatomy? *J. Anat.* 216 (2010) 235–250.
- [4] C.M. Wilkinson, *Forensic Facial Reconstruction*, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [5] K.T. Taylor, *Forensic Art and Illustration*, CRC Press, New York, 2001.
- [6] G.B. Lebedinskaya, *Rekonstrukcia Lica Po Cerepu (metodiceskoje Ruko-vozdstvo)*, Staryj sad, Moskva, 1998.
- [7] J. Prag, R. Neave, *Making Faces: Using Forensic and Archaeological Evidence*, British Museum Press, London, 1997.
- [8] P. Guyomarc'h, B. Dutailly, Ch. Couture, H. Coqueugniot, Anatomical placement of the human eyeball in orbit – validation using CT scans of living adults and prediction for facial approximation, *J. Forensic Sci.* 57 (2012) 1271–1275.
- [9] P. Guyomarc'h, C.N. Stephan, The validity of ear prediction guidelines used in facial approximation, *J. Forensic Sci.* 57 (2012) 1427–1441.
- [10] C. Rynn, C.M. Wilkinson, H.L. Peters, Prediction of nasal morphology from the skull, *Forensic Sci. Med. Pathol.* 6 (2010) 20–34.
- [11] C.M. Wilkinson, S.A. Mautner, Measurement of eyeball protrusion and its application in facial reconstruction, *J. Forensic Sci.* 48 (2003) 1–5.
- [12] C.M. Wilkinson, M. Motwani, E. Chiang, The relationship between the soft tissue and the skeletal detail of the mouth, *J. Forensic Sci.* 48 (2003) 728–732.
- [13] C.N. Stephan, M. Henneberg, Predicting mouth width from inter-canine width – a 75% rule, *J. Forensic Sci.* 48 (2003) 725–727.
- [14] C. Wilkinson, Computerized forensic facial reconstruction: a review of current systems, *Forensic Sci. Med. Pathol.* 1 (2005) 173–177.
- [15] M. Berar, F.M. Tilotta, J.A. Glauens, Y. Rozenholc, Craniofacial reconstruction as a prediction problem using a Latent Root Regression model, *Forensic Sci. Int.* 210 (2011) 228–236.
- [16] F. Duan, D. Huang, Y. Tian, K. Lu, Z. Wu, M. Zhou, 3D face reconstruction from skull by regression modeling in shape parameter spaces, *Neurocomputing* 151 (2015) 674–682.
- [17] Q. Deng, M. Zhou, Z. Wua, W. Shui, Y. Ji, X. Wang, C.Y.J. Liu, Y. Huang, H. Jiang, A regional method for craniofacial reconstruction based on coordinate adjustments and a new fusion strategy, *Forensic Sci. Int.* 259 (2016) 19–31.
- [18] C.N. Stephan, M. Henneberg, Building faces from dry skulls: are they recognized above chance rates? *J. Forensic Sci.* 46 (2001) 432–440.
- [19] V. Suk, *Fallacies of Anthropological Identifications*, 207, Publications de la Facultae des sciences de l'Universitea Masaryk, 1935, pp. 3–18.
- [20] A.M. Brues, Identification of skeletal remains, *J. Crim. Law Criminol.* 48 (1958) 551–556.
- [21] T.A. Rathbun, Personal identification: facial reproductions, in: T. Rathbun, J. Buikstra (Eds.), *Human Identification: Case Studies in Forensic Anthropology*, Charles C. Thomas, Springfield, IL, 1984, pp. 347–356.
- [22] W.D. Haglund, D.T. Reay, Use of facial approximations techniques in identification of Green River serial murder victims, *Am. J. Forensic Med. Pathol.* 12 (1991) 132–142.
- [23] C.N. Stephan, Facial approximation: falsification of globe projection guideline by exophthalmometry literature, *J. Forensic Sci.* 47 (2002) 730–735.
- [24] C.N. Stephan, Anthropological facial 'reconstruction' – recognizing the fallacies 'unembracing' the errors, and realizing method limits, *Sci. Justice* 43 (2003) 193–200.
- [25] C.N. Stephan, M. Henneberg, W. Sampson, Predicting Nose projection and pronasale position in facial approximation: A test of published method and proposal of new guidelines, *Am. J. Phys. Anthropol.* 122 (2003) 240–250.
- [26] C.N. Stephan, Position of superciliare in relation to the lateral iris: testing a suggested facial approximation guideline, *Forensic Sci. Int.* 130 (2002) 29–33.
- [27] P.Z. Mala, Pronasale position: an appraisal of two recently proposed methods for predicting nasal projection in facial reconstruction, *J. Forensic Sci.* 58 (2013) 957–963.
- [28] P. Zedníková Malá, J. Velemínská, Vertical lip position and thickness in facial reconstruction: a validation of commonly used methods for predicting the position and size of lips, *J. Forensic Sci.* 61 (2016) 1046–1054.
- [29] P. Zedníková Malá, J. Velemínská, Eyeball position in facial approximation: accuracy of methods for predicting globe positioning in lateral view, *J. Forensic Sci.* 63 (2018) 221–226.
- [30] C. Rynn, C.M. Wilkinson, Appraisal of traditional and recently proposed relationships between the hard and soft dimensions of the nose in profile, *Am. J. Phys. Anthropol.* 130 (2006) 364–373.

- [31] H. Utsuno, T. Kageyama, K. Uchida, N. Ishii, S. Minegishi, K. Uemura, K. Sakurada, Establishment of a prediction method for the mid-facial region of unknown human Mongoloid skeletal remains, *Forensic Sci. Int.* 288 (2018) 297–303.
- [32] H. Utsuno, T. Kageyama, K. Uchida, K. Kibayashi, K. Sakurada, K. Uemura, Pilot study to establish a nasal tip prediction method from unknown human skeletal remains for facial reconstruction and skull photo superimposition as applied to a Japanese male populations, *J. Forensic Leg. Med.* 38 (2016) 75–80.
- [33] C.N. Stephan, Facial approximation: an evaluation of mouth-width determination, *Am. J. Phys. Anthropol.* 121 (2003) 48–57.
- [34] C.N. Stephan, S.J. Murphy, Mouth width prediction in craniofacial identification: cadaver tests of four recent methods including two techniques for edentulous skulls, *J. Forensic Odontostomatol.* 27 (2008) 2–7.
- [35] C.N. Stephan, A.J.R. Huang, P.L. Davidson, Further evidence on the anatomical placement of the human eyeball for facial approximation and craniofacial superimposition, *J. Forensic Sci.* 54 (2009) 267–269.
- [36] J.D. Subtelny, A longitudinal study of soft tissue facial structures and their profile characteristics, defined in relation to underlying skeletal structures, *Am. J. Orthod.* 45 (1959) 481–507.
- [37] Y.C. Park, C.J. Burstone, Soft-tissue profile—fallacies of hard-tissue standards in treatment planning, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 90 (1986) 52–62.
- [38] R.A. Riedel, Esthetics and its relation to orthodontic therapy, *Angle Orthod.* 20 (1950) 168–178.
- [39] B.M. Oliver, The influence of lip thickness and strain on upper lip response to incisor retraction, *Am. J. Orthod.* 82 (1982) 141–148.
- [40] R.A. Perkins, R.N. Staley, Change in lip vermilion height during orthodontic treatment, *Am. J. Dentofac. Orthop.* 103 (1993) 147–154.
- [41] L. Eidson, L.H. Cevidanes, L.K. de Paula, H.G. Hershey, G. Welch, P.E. Rossouw, Three-dimensional evaluation of changes in lip position from before to after orthodontic appliance removal, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 142 (2012) 410–418.
- [42] F. Bourzgui, S. Alami, M. Sebbar, T. Derkaoui, M. Hamza, Z. Serhier, et al., Effect of orthodontic treatment on lip position, *Int. Orthod.* 11 (2013) 303–313.
- [43] Ch. Jogaki, W. Tome, F. Kuroyanagi, N. Kitai, A three-dimensional method for evaluating changes in lip morphology following correction of functional anterior crossbite, *Orthod. Waves* 76 (2017) 226–231.
- [44] C.M. Chen, M.Y. Chen, K.J. Cheng, Y.C. Tseng, Facial profile and frontal changes after bimaxillary surgery in patients with mandibular prognathism, *J. Formos. Med. Assoc.* 117 (2018) 632–639.
- [45] H. Yasutomi, H. Ioi, S. Nakata, A. Nakasima, A.L. Counts, Effects of retraction of anterior teeth on horizontal and vertical lip positions in Japanese adults with the bimaxillary dentoalveolar protrusion, *Orthod. Waves* 65 (2006) 141–147.
- [46] Y.J. Lee, J.T. Park, J.Y. Cha, Perioral soft tissue evaluation of skeletal Class II division 1: a lateral cephalometric study, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 148 (2015) 405–413.
- [47] E. Inada, I. Saitoh, H. Hayasaki, Y. Iwase, N. Kubota, Y. Tokemoto, C. Yamada, Y. Yamasaki, Relationship of nasal and skeletal landmarks in lateral cephalograms of preschool children, *Forensic Sci. Int.* 191 (2009) 1–3.
- [48] H. Utsuno, T. Kageyama, K. Uchida, T. Deguchi, H. Miyazawa, K. Inoue, Estimation of nasal tip position using lateral cephalometric X-ray images in Japanese male children: applications in facial reconstruction, *Pediatr. Dent. J.* 18 (2008) 43–52.
- [49] E. Allam, P. Mpofu, A. Ghoneima, M. Tuceryan, K. Kula, The relationship between hard tissue and soft tissue dimensions of the nose in children: a 3D Cone beam computed tomography study, *J. Forensic Sci.* (2018), doi:http://dx.doi.org/10.1111/1556-4029.13801.
- [50] S.V. Tedeschi-Oliveira, T.L. Beaini, R.F. Haltenhoff Melani, Forensic facial reconstruction: nasal projection in Brazilian adults, *Forensic Sci. Int.* 266 (2016) 123–129.
- [51] R.M. George, The lateral craniographic method of facial reconstruction, *J. Forensic Sci.* 32 (1987) 1305–1330.
- [52] A.F. Ridet, F. Demeter, J. Liebenberg, E.N. L'Abbé, D. Vandermeulen, A.C. Oettlé, Skeletal dimensions as predictors for the shape of the nose in a South African sample: A cone-beam computed tomography (CBCT) study, *Forensic Sci. Int.* 289 (2018) 18–26.
- [53] K.M. Lee, W.J. Lee, J.H. Cho, H.S. Hwang, Three-dimensional prediction of the nose for facial reconstruction using cone-beam computed tomography, *Forensic Sci. Int.* 236 (2014) 194.e1–194.e5.
- [54] Q. Deng, M. Zhou, Z. Wu, W. Shui, Y. Ji, X. Wang, C.Y.J. Liu, Y. Huang, H. Jiang, A regional method for craniofacial reconstruction based on coordinate adjustments and a new fusion strategy, *Forensic Sci. Int.* 259 (2016) 19–31.
- [55] A. Farrera, M. García-Velasco, M. Villanueva, Quantitative assessment of the facial features of a Mexican population dataset, *Forensic Sci. Int.* 262 (2016) 283.e1–283.e9.
- [56] D.E. Slice, Geometric morphometrics, *Annu. Rev. Anthropol.* 36 (2007) 261–281.
- [57] P. Mitteroecker, P. Gunz, Advances in geometric morphometrics, *Evol. Biol.* 36 (2009) 235–247.
- [58] P. Mitteroecker, P. Gunz, S. Windhager, K. Schaefer, A brief review of shape, form, and allometry in geometric morphometrics with applications to human facial morphology, *Hystrix* 24 (2013) 59–66.
- [59] C.P. Klingenberg, Cranial integration and modularity: insights into evolution and development from morphometric data, *Hystrix* 24 (2013) 43–58.
- [60] D.C. Dirkmaat, L.L. Cabo, S.D. Ousley, S.A. Symes, New perspectives in forensic anthropology, *Yearb. Phys. Anthropol.* 51 (2008) 33–52.
- [61] A. Kustár, L. Forró, I. Kalina, F. Fazekas, S. Honti, M. Friess, FACE-R—a 3D database of 400 living individuals' full head CT- and face scans and preliminary GMM analysis for craniofacial reconstruction, *J. Forensic Sci.* 58 (2013) 1420–1428.
- [62] P. Guyomarc'h, B. Dutailly, J. Charton, F. Santos, P. Desbarats, H. Coqueugniot, Anthropological facial approximation in three dimensions [AFA3D]: computer-assisted estimation of the facial morphology using geometric morphometrics, *J. Forensic Sci.* 59 (2014) 1502–1516.
- [63] A.D. Rose, M.G. Woods, J.G. Clement, C.D.L. Thomas, Lateral facial soft-tissue prediction model: analysis using Fourier shape descriptors and traditional cephalometric methods, *Am. J. Phys. Anthropol.* 121 (2003) 172–180.
- [64] N.M. Young, K. Sherathiya, L. Gutierrez, E. Nguyen, S. Bekmezian, J.C. Huang, B. Hallgrímsson, J.S. Lee, R.S. Marcucio, Facial surface morphology predicts variation in internal skeletal shape, *Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop.* 149 (2016) 501–508.
- [65] G.A. Macho, Descriptive morphological features of the nose—an assessment of their importance for plastic reconstruction, *J. Forensic Sci.* 34 (1989) 902–911.
- [66] Z. Šmahel, M. Brejcha, Differences in craniofacial morphology between complete and incomplete unilateral cleft-lip and palate in adults, *Cleft Palate J.* 20 (1983) 113–127.
- [67] K. Macková, J. Velemínská, Craniometrical norms for recent Czech population intended for evaluation of the cranial size and shape using lateral X-ray films, *Anthropologie* 45 (2007) 261–274.
- [68] F.L. Bookstein, *Morphometric Tools for Landmark Data: Geometry and Biology*, Cambridge University Press, New York, 1991.
- [69] C.N. Stephan, E.K. Simpson, Facial soft tissue depths in craniofacial identification [part I]: an analytical review of the published adult data, *J. Forensic Sci.* 53 (2008) 1257–1271.
- [70] T. Balueva, E. Veselovskaya, E. Kobylansky, Cranio-facial reconstruction by applying the ultrasound method in live human populations, *Int. J. Anthropol.* 24 (2009) 87–111.
- [71] R. Knussmann, R. Martin, *Anthropologie Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen*, zugleich 4. Auflage des Lehrbuchs der Anthropologie, begründet von Rudolf Martin, Fischer Stuttgart, 1988.
- [72] N. Siquyres, V. Burke DeLeon, Clavicular curvature and locomotion in anthropoid primates: A 3D geometric morphometric analysis, *Am. J. Phys. Anthropol.* 158 (2015) 257–268.
- [73] P.R. Peres-Neto, D.A. Jackson, K.M. Somers, How many principal components? Stopping rules for determining the number of non-trivial axes revisited, *Comput. Stat. Data Anal.* 49 (2005) 974–997.
- [74] N. von Cramon-Taubadel, B.C. Frazier, M. Mirazón Lahr, The problem of assessing landmark error in geometric morphometrics: theory, methods, and modifications, *Am. J. Phys. Anthropol.* 134 (2007) 24–35.
- [75] I. De Groot, A Comprehensive Analysis of Long Bone Curvature in Neanderthals and Modern Humans Using 3D morphometrics, Thesis, University College London, 2008.
- [76] F.J. Rohlf, M. Corti, Use of two-block partial least-squares to study covariation in shape, *Syst. Biol.* 49 (2000) 740–753.
- [77] C.P. Klingenberg, Morphometric integration and modularity in configurations of landmarks: tools for evaluating a priori hypotheses, *Evol. Dev.* 11 (2009) 405–421.
- [78] M. Bastir, P.G. Sobral, K. Kuroe, A. Rosas, Human craniofacial sphericity: a simultaneous analysis of frontal and lateral cephalograms of a Japanese population using geometric morphometrics and partial least squares analysis, *Arch. Oral Biol.* 53 (2008) 295–303.
- [79] C.P. Klingenberg, MorphoJ: an integrated software package for geometric morphometrics, *Mol. Ecol. Resour.* 11 (2011) 353–357.
- [80] O. Hammer, D.A.T. Harper, P.D. Ryan, PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis, *Paleontol. Electronica* 4 (2001) 9.
- [81] R.M. George, Anatomical and artistic guidelines for forensic facial reconstruction, in: M.Y. Işcan, R.P. Helmer (Eds.), *Forensic Analysis of the Skull. Craniofacial Analysis, Reconstruction, and Identification*, Wiley-Liss, New York, 1993, pp. 215–228.
- [82] E. Sarilita, C. Rynn, P.A. Mossey, S. Black, F. Oscandar, Nose profile morphology and accuracy of nose profile estimation method in Scottish subadult and Indonesian adult populations, *Int. J. Leg. Med.* 132 (2018) 923–931.
- [83] S. Decker, J. Ford, S. Davy-Jow, P. Faraut, W. Neville, D. Hilbelink, Who is this person? A comparison study of current three-dimensional facial approximation methods, *Forensic Sci. Int.* 229 (2013) 161.e1–161.e8.
- [84] J. Velemínská, V. Kraljček, J. Dupej, J.A. Gómez-Valdés, P. Velemínský, A. Šeřáková, J. Pelikán, G. Sánchez-Mejorada, J. Bružek, Technical note: Geometric morphometrics and sexual dimorphism of the greater sciatic notch in adults from two skeletal collections: The accuracy and reliability of sex classification, *Am. J. Phys. Anthropol.* 152 (2013) 558–565.
- [85] L.J. Short, B. Khambay, A. Ayoub, C. Erolin, C. Rynn, C. Wilkinson, Validation of a computer modelled forensic facial reconstruction technique using CT data from live subjects: A pilot study, *Forensic Sci. Int.* 237 (2014) 147.e1–147.e8.

Forensic Sci Med Pathol
DOI 10.1007/s12024-012-9375-5

TECHNICAL REPORT

“Bochdalek’s” skull: morphology report and reconstruction of face

Ivo Klepáček · Pavla Zedníková Malá

Accepted: 3 August 2012
© Springer Science+Business Media, LLC 2012

Abstract The objective of this study was to create a real model of a face using the well preserved “Bochdalek’s skull” (from an eighteenth Century female aged 18 years) kept in the museum of anatomy (Institute of Anatomy, 1st Medical Faculty, Charles University in Prague). The skull had previously been appraised as a deformed skull with an adhesion present on both sides of the jaw, most likely of post-traumatic origin (bilateral syngnathia). In an attempt to find the best description for it, and to identify the spatial relationships between the surface of the facial bones which had changed in shape, as well as the formation of soft tissue on the face, we decided to perform a 3D reconstruction of the face. Due to the necessity of preserving the unique original undamaged skull, we created an exact digital “casting” of the facial bone structure on a computer first, which we then converted into a three-dimensional model using a 3D RepRap printer. We needed to take into consideration the fact that we had no portrait of the girl, just the skull. For this reason, we opted for a selected combination of anthropologic steps (the modified Manchester technique), which in our view, allows for optimum creation of the topography of the face in keeping with the

deformed skull. The resulting reconstructed face was old in appearance with an overhanging lower lip and flattened surfaces in the areas of the temporalis and masseter muscles.

Keywords Bochdalek’s skull · Syngnathia · Facial reconstruction · Craniofacial approximation · Manchester technique · Facial soft tissue depth data · Facial profile shape

Introduction

This is an extremely rare case highlighting a defect, maxillomandibular adhesions on both sides—syngnathia. In addition the defect had not been treated, meaning that the configuration of the face in the nasal, oral and buccal region had been significantly altered. There are a total of only 26 similar cases reported in the literature [1, 2] between 1936 and 1997.

Posthumous facial reconstruction assists in composing an image of an individual’s appearance, animates the skeletal findings and, as such, is important for both museum purposes [3] and for defining the identity of the person during forensic examination. Traditionally used anthropologic methods primarily allow for facial reconstruction in the case of healthy and normally developed individuals; they come with conspicuous and significant limitations for reconstructing the face of a pathologically altered skull. Facial reconstruction of a skull where bones in the face have been altered in shape or pushed against each other, as is the case, for instance, with long-term dislocated fractures which have been left untreated, may be an important morphological foundation for biologists or plastic surgeons who are subsequently able to estimate the

I. Klepáček (✉)
First Faculty of Medicine, Institute of Anatomy,
Charles University, Prague, Czech Republic
e-mail: Ivo.klepacek@lf1.cuni.cz
URL: <http://anat.lf1.cuni.cz/index.php>

P. Z. Malá
Department of Anthropology and Human Genetics,
Charles University, Prague, Czech Republic
e-mail: mala.mala@email.cz

P. Z. Malá
Department of Anthropology and Biology,
Institute of Criminalistics, Prague, Czech Republic

Published online: 24 August 2012

future appearance of an untreated defect more precisely, in the event that other information is missing.

The objective of this study was to create the best possible approach for the reconstruction of a skull in which the jaw has been immobilised from childhood to puberty, allowing the deformed face to be modelled in a credible way. This procedure involved a combination of various anthropological methods, the necessity of which is re-enforced by the fact that in our case no portrait of the girl is available, nor is there a medical report related to her death, plus the oral descriptions relating to the girl's face are highly fragmentary [4].

The proportions of the face and their design, given by the positioning of the eyes, size of the nose and the approximate size and shape of the mouth may be estimated by comparing this case with sets of average morphological data gathered previously [5, 6]. These data sets, and the derived traditional principles of how to estimate the final shape of the face are constantly being modified and added to [3, 7–12]. According to data from DeGreef et al. [13], who compiled a large database describing soft facial tissue in terms of thickness measured in separate anthropological points on the so-called Caucasian race, it is possible to carry out facial reconstruction with a sufficient degree of precision using a minimum of around 24 of these points. It is highly likely that our skull, rather brachycephalic in appearance [14], may be classed among the so-called Caucasian race. We decided to use and modify the modern reconstruction method of the face known as the Manchester technique [15], which is used relatively frequently, as well as being used in cases where the formed appearance of the individual is unknown and the only information available is the bone structure. Blind studies report that the Manchester technique offers accuracy in face shape of about 44 % and that recognition rateability can be 71 % [3, 16, 17].

Method

The skull was investigated with the assistance of a CT scan in the Mouth and Maxillofacial Surgery laboratory (department for the Stomatological Clinic department, 1st Medical Faculty, Charles University, Prague). The set of digital binary DICOM data, describing the facial skeletal, was modified on a computer for 3D printing. Following this, the facial bone structure was printed on a 3D Solidimension SD 300 printer, which uses PVC as the modelling material (Polyjet matrix PM). Upon hardening with a UV lamp, it was possible to decipher details on the model surface up to 0.016 mm. The original, fragile skull, thus remained unaffected by the reconstruction process.

Modelling approach (the scope of biometric values relating to the thickness of soft tissue selected from the database corresponds to the age of 18 years)

Preliminary phase—creation of a 2D sketch

Selected anthropological points were defined on the lateral, frontal and basal slide of the facial model at a comparable size to the real skull (ratio 1:1) and oriented according to Reid's line. The position of each point was verified three times. Following this, pegs were placed on these points in an upright position, their length corresponding to the estimated thickness of the soft tissue over the given point. The tissue thickness values were calculated in accordance with DeGreef et al. [13] with a view to the girl's age (18–19 years) and the BMI index, which was estimated at <20. By joining the tip of the pegs with lines, a preliminary outline of the face was marked out and its asymmetry emphasized.

3D Morphological face model created by hand (Manchester technique)

Thickness of soft tissue The thickness of the soft tissue was marked out with notches on wooden pegs located on all of the defined points [13], simulating the distance of the skin from the bone surface. The estimated decay of soft tissue as a consequence of longstanding atrophy of the soft tissue due to immobility (atrophy ex inactivitate) was marked out, measured from the skin's surface to the surface of the bone over the marked out notch. The missing part of the cheek bone and projection of the lower jaw were modeled in a way that ensured their shape corresponded to the original appearance.

The shapes of facial muscles The m. temporalis and the m. masseter muscle were modelled first, followed by the m. buccinator, orbicularis oris, mentalis depressor labii inferioris, depressor anguli oris, levator anguli oris, levator labii superioris, orbicularis oculi and the mm. zygomatici; once again taking into account the age of approximately 18 years.

Morphological definition of structure positions on the face qualifying their general features The location of the eyeballs was estimated according to the methods employed by Wilkinson and Mautner, Stephan and Davidson and Stephan et al. [18–20], the canthi according to the methods of Whitnall and Rynn et al. [21, 22], and the outline of the eyelids according to Fedosyutkin and Nainys' technique [10]. The approximate size and shape of the nose was constructed following guidelines defining the vertical position of the point positioned the furthest in front on the nose profile [7], the direction of the tip of the nose [5], anteronasal projection (so-called ogee curves) [8], the nose width [11], and the formation of nasal wings [23]. The

width of the mouth slit (rima oris) was measured according to techniques outlined by Stephan and Murphy [24].

Results

Morphology of the facial bone structure

The maxilla, mandible and palatal bones were firmly joined together by true osseous fusion. Both cheek bones were laterally arched, and the aperture of the temporomandibular joint was preserved [4, 25]. The edge of the aperture piriformis was in a place where the right maxilla fuses with the axis of the nasal dextrum atrophied and smoothed. The maxilla was slightly protruding outwards and downwards, and as a consequence of this phenomenon, the jaw was located in the “cross bite” position.

A left-sided asymmetry on the facial skeleton was detected. Beneath the lower edge of the left eye socket, we found a shallow, drop-like cleft. There were no visible traces of a cleft palate. At the level of oral angles, we discovered numerous minor osteophytic growths in areas where the jaw is knitted together—most likely as a reaction to a chronic bone inflammation, due to poor oral hygiene.

Figures 1, 2, 3, 4, 5 and 6 form a set of images documenting the procedure for facial modeling.

Discussion

Morphology of the appearance

In modern medicine, surgical treatments of congenital defects to the jaw are performed at an early age [26, 27]. For this reason, congenital adhesions to the jaw with cheek bones and palatal bones persisting to a higher age are very rare, and are only described in literature in exceptional cases [28, 29]. A patient with this defect may live to a relatively old age. Naikmasur et al. [28] described single-sided bone syngnathia in a 60-year-old woman, whereby on one side the jaw was firmly knitted together and the other side was only connected by a fibrous tissue bridge. Due to this, it was still possible for the mouth to be partially opened, although only to a range of 8 mm (measured in the central line). If development of the central facial support is delayed as a result of an inter-jaw adhesion, and the lower jaw remains small, the prognosis for successful surgical treatment is not good [30, 31].

Trigg et al. [32] described a non syndromic case of complete bone syngnathia complicated by merging of the

jaw with other facial bones. According to findings, jaw bones regularly grow together with cheek bones.

Salleh [33] submitted a report about the exceptional case of a congenital maxillomandibular fusion on an otherwise healthy individual only detected at the age of 8 years. The fact that the defect was only detected at such a late stage occurred because the patient had a jaw connected in a rather supple way by means of gum bridges, enabling him to take in food on his right side between his remaining teeth. Cases have, however, also been described of an inter-jaw adhesion occurring as part of other syndromes or as specifically congenital defects as a consequence of complications at birth [34, 35].

Two cases of bone syngnathia have been published in contemporary literature. The first was of a boy aged three and the second was of an 8 year old girl [30, 36], both of which were verified by X-ray examinations. In these papers the authors discuss overhanging and puffy lips as being a typical common indication of bone syngnathia.

Laster et al. [1] assume that non-congenital (acquired) syngnathia may be caused by injury, whereby the child's head, especially the lower jaw, is compressed during passage through the narrow pelvis of the mother. The vertical parts of the palatal bone, the rami mandibulae and the maxilla grow together shortly after birth, whereas the enlarging and growing tongue pushes away the rami mandibulae and deforms the soft palate. At the same time, the bone tissue decreases in the dorsal part of the hard palate.

Significant asymmetry of the face in the case of our skull, with non syndromic syngnathia, may be explained as a consequence of trauma after birth or during early childhood causing adhesion of the jaw on both sides [25]. We can presume that asymmetry of the face bone structure deteriorated as a consequence of unequal growth of both jaw lines, the growth and enlargement of both jaw lines basically taking place at different rates, halting mutual adhesion in an independent formation [37–40].

According to Dawson's criteria [41], complex syngnathia (syndrome-associated), co-exists with microglossia or even with aglossia. We did not find a hypoplastic mandible, thus the normally developing tongue could not have been compressed too much inside the oral cavity.

In our view, the phases leading to the emergence of post-traumatic bilateral syngnathia at an early age are as follows:

Initially there has to be a trauma either in early childhood or even inside the womb, subsequently the opposed gums merge and finally the jaw and facial bone join together, which leads to a delay in facial development and to its subsequent flattening (dish face appearance).

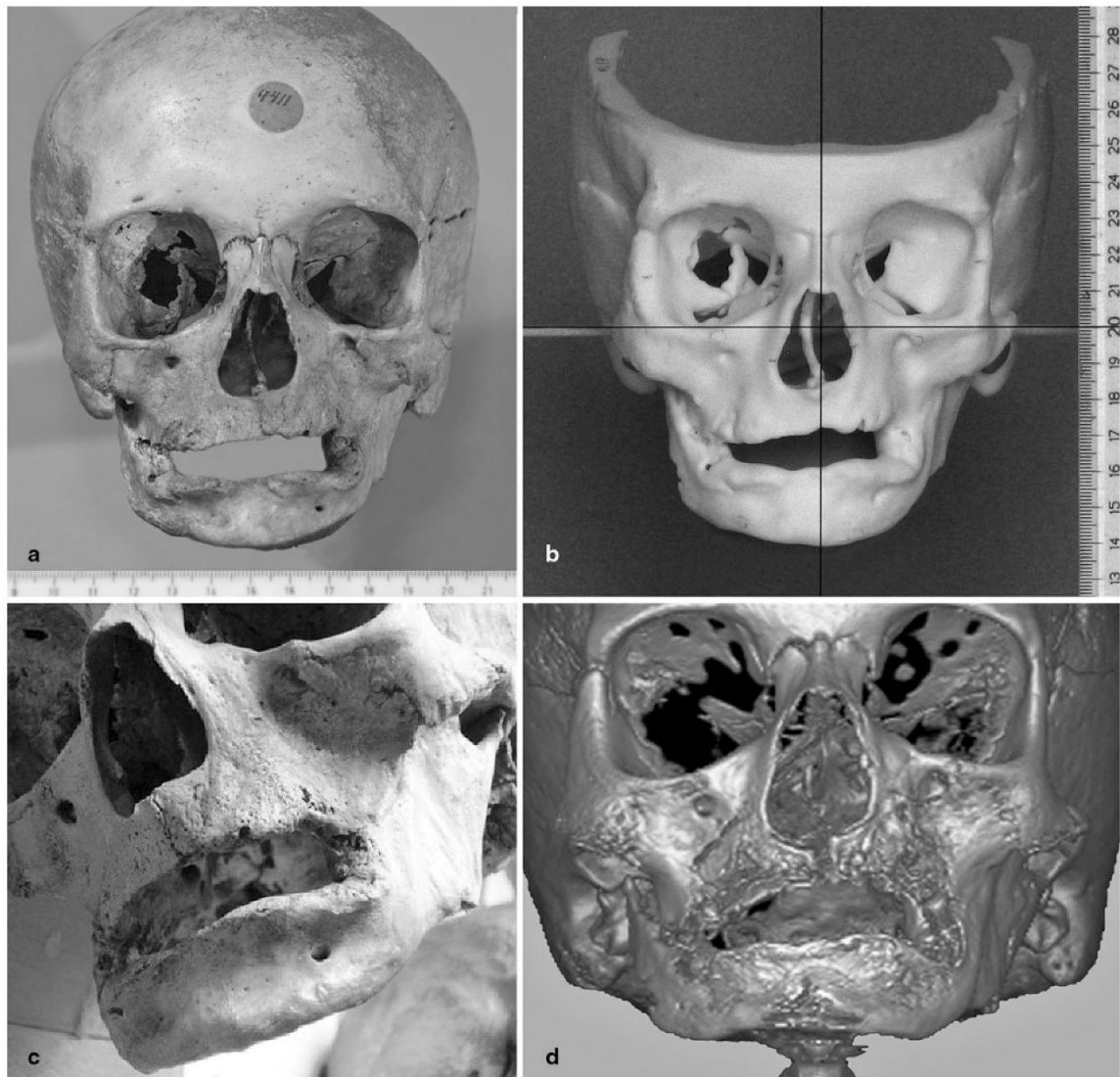


Fig. 1 Skull with post-traumatic syngnathia on both sides. **a** Photograph of the cheek bone structure; frontal view. The asymmetry of the facial skeleton and bone adhesion of the cheek bone with the jaw are evident. **b** A 3D RepRap printed model of the facial skeleton, frontal

view. **c** Deflected alveolar crest; semilateral view. **d** Computed model of the skull face (3D iCAT vision); frontal view. The drop-shaped cleft is located under the edge of the left eye socket

Muscles and soft tissue on the face during two-sided syngnathia

It is recognized that along with the fat pocket, masticatory muscles make up one of the principal structures determining the shape of the face. The average thickness of soft tissue externally from *m. masseter* in women between 18 and 29 years (BMI = 20–25) oscillates according to ultrasound measurements [13] from 17.2 mm (measured at the half-way distance among the root of the zygomatic arch

and the gonion) to 19.4 mm (measured at anterior border of the *m. masseter* on the vertical level of the cheilion) [42]. According to Stephan and Simpson [43], who mapped out the thickness of soft facial tissue (estimated as the distance between the surface of the bone and the skin's surface) in elderly people (around the age of 85), the thickness of soft tissue in the centre of the ramus mandibulae measures around 17.5 mm for both sexes. Other studies determine the thickness of the actual masseter (skin and hypodermic fibrous tissue are not included) at the level of the occlusal

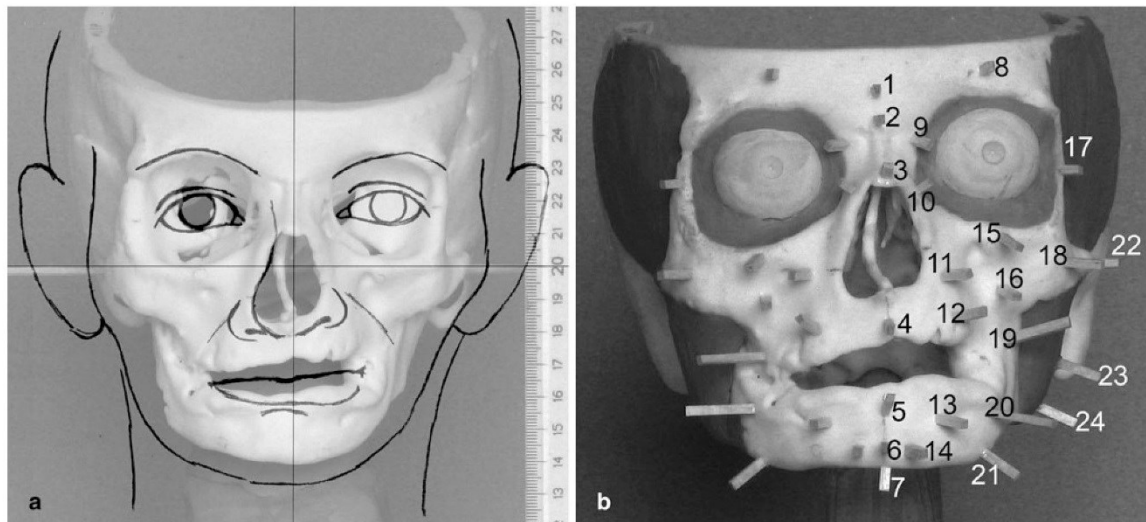


Fig. 2 Proportion of the face and thickness of soft tissue on the face. **a** Schematic reconstruction of the assumed face; the depicted distance between the eyeballs and eyelids, the schematic outline of the outer nose and the width of the mouth; measurement—mm. **b** Wooden pegs are located on the anthropometric points of the face: 1 glabella, 2 nasal, 3 rhinion, 4 central cavity of the upper lip (centre of the line segment connecting the acanthion-prosthion), 5 supramentale (projecting into the sulcus mentolabialis), 6 pogonion, 7 menton, 8 supraorbitale, 9 dacryon, 10 lateral nasal point (on the distal end of the sutura nasomaxillaris), 11 alare curvature point (positioned on the most lateral part of the nasal wing), 12 supracanine (the most frontal

on the alveolus of the upper canine located point), 13 inferior canine (the most frontal on the alveolus of the lower canine located point) 14 left mental tubercle, 15 suborbitale (point just beneath the margo orbitalis inferior), 16 inferior malar (upper edge fossa canina), 17 mid lateral orbit (ectococonchion), 18 lateral orbit (on the zygomaticum axis facial area which is most arched ventrolaterally), 19 supra M2 and 20 infra M2 (points on the edge of the assumed alveolus of the lower molars), 21 point in the centre of the lower edge of the mandible body, 22 zygion, 23 point in the centre ramus mandibulae, 24 gonion. The length of the pegs corresponds to the assumed thickness of the face

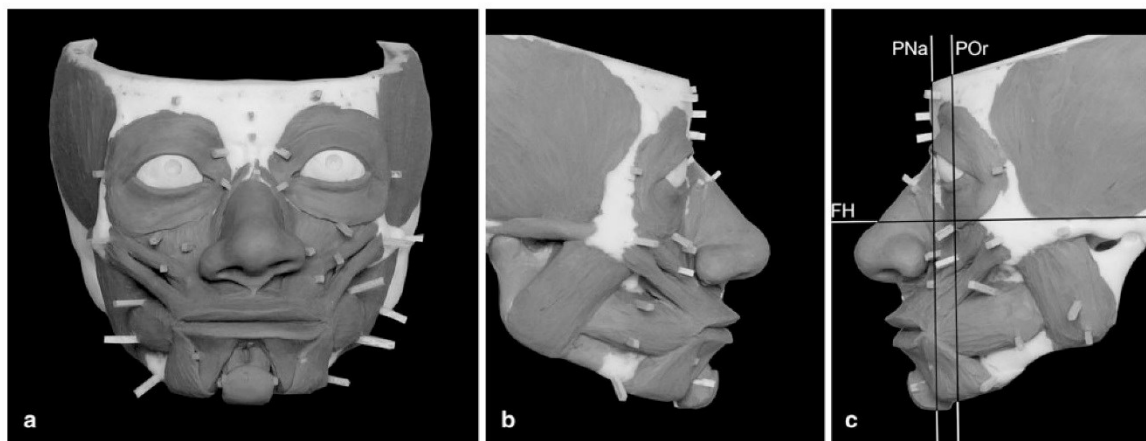


Fig. 3 Masticatory muscles, modelled from plasticine, are located on the three-dimensional model of the face together with the cheek muscles and muscles surrounding the mouth slit according to Wilkinson [15]. The outline of the outer nose hems the edge of the aperture piriformis and the columela directs ventrally and upwards from the spina nasalis anterior. **a** Frontal view. **b** View from the right

side, **c** View from the left side. The length of the wooden peg corresponds to the original thickness of the face in the given area. *FH*—The Reid line (Frankfurter line); *PNa*—Perpendiculare Nasion Lines; *POr*—Perpendiculare Orbitale lines: area between the *PNa* and *POr* marks out the so-called biometric field. The disk-shaped area of the face

surface in women at around 8.7 mm [44] or 12.7 mm [45]. Those values reflect the physiological function of the muscles.

The temporal muscle fills up approximately one half of the depth of the temporal hole; the remainder is accounted for by the fibrous tissue and fat unit [46]. At its deepest

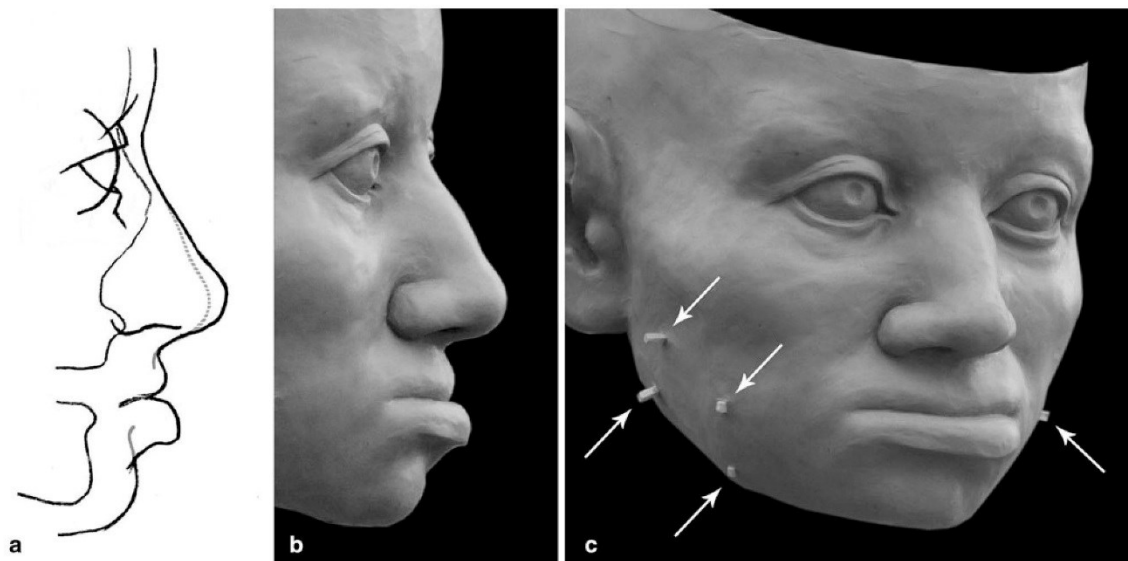


Fig. 4 Reconstruction of the face and outlines of the lips; the thickness of the soft tissue on the cheeks is depleted. View from the side. **a** Sketch: (*dash grey line*) usual outline of the outer nose according to authors Rynn et al. as well as Lebedinskaya [23, 52], the anterior nose projection is underestimated due to changed position of prosthion, (*continuous black line*) outline of the outer nose according to Stephan et al. as well as George [7, 8]. The overlapping lower lip takes into account the lip by the likely positioning of the edge of the

gum prior to losing the teeth (*full grey line*) and in front by a pushed out gum ridge (*full black line*). **b** Plasticine model: takes into account the relationship between the lips and the edge of the orbital mouth muscle; the lower lip is pushed outwards. **c** Parts of wooden pegs jutting out from the shape's surface represent decay to the cheek and masticatory muscle material caused by a longstanding period of immobility by the tips of the wooden pegs (marked with *arrows*), distinguish the likely surface of the face prior to muscle atrophy

part, together with the fibrous tissue and facial fat unit (Bichat's fat pad), it reaches a muscle thickness of approximately 22 mm. The thickness of the actual temporal muscle can reach up to 11 mm.

According to El-Labban [47], long-term immobility of the temporal muscle and masseter leads to their hypoplasia and subsequently to ankylosis of the TMJ joint. The number of muscle fibres diminishes in the muscles, the number of capillaries is reduced and the muscle pad is replaced with fibrous tissue as was detected in the degenerative masseter [48]. As a result of hypoplasia m. masseter and m. temporalis on the side of the face where the jaw grows together completely with bone tissue (true bony fusion) [28], the surface of the face over this is flat and sometimes shrunken and the cheek bones protrude from the face. Since the masticatory muscles are often displaced from their function, their volume decreases and the topography of the face can resemble people who have been under-nourished for a long period of time, where significant muscle mass decay (atrophy) is a dominant phenomenon [49, 50].

Eyes, external nose, and lips in the syngnathic face

It is believed that the positions of the eyeballs is retained through normal life in a relatively constant position

inside the orbits [14]. In our reconstruction the left eyeball was likely to be positioned more forward than the right one. The lower edge of the left eye socket viewed from the lateral aspect was found more anteriorly than the upper one. Further, the bottom of the left orbit is situated significantly above the right one. This resulted in eye asymmetry, which was especially apparent at an altitude of both the orbits. The volume of the left orbit was decreased and the eyeball was probably pushed out of the orbit. In contrast, the right eye socket seems to be almost untouched by post-traumatic development. Pro-lapse of the lower eyelids, more pronounced on the left side, must have occurred given the proposed eyeball positions.

The reconstruction of the external nose profile was also influenced by post-traumatic deformity of the skull in our case. The prosthion point, contrary to the normal position, was found more dorsally and cranially due to resorption of the frontal alveoli. This is why Rynn's method [23], based on X-ray and CT examinations of normal skulls, as well as Gerasimov's method [5], could not be applied. It was decided to follow the procedure of George [8] of predicting anterior nose projection as it provides quite good results according to studies testing its accuracy [7, 51]. The large and conspicuous asymmetry of the nose is caused by the

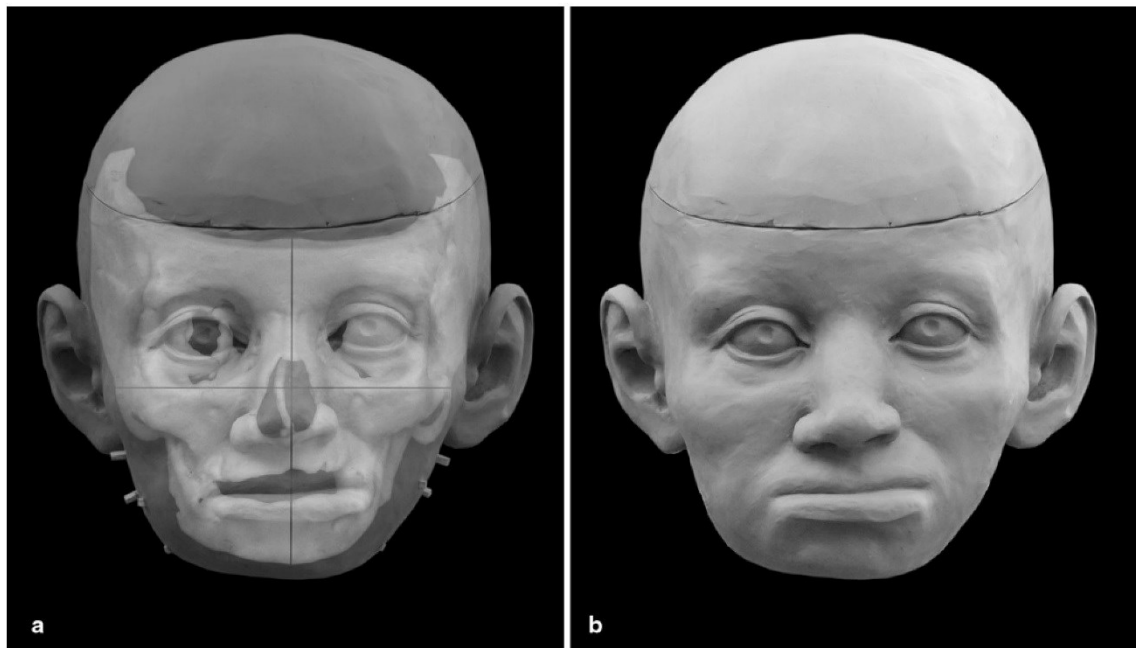


Fig. 5 Resulting facial model, the surface of which respects the face and positioning of its underlying muscles. **a** Superprojection of the reconstructed face on the skull—depicted relationship among sizes,

shape and position of facial structures (eye, nose, lips, grooves in the face) and by the proportions of facial bone structure. **b** Final shape of the face, plasticine, frontal view

higher positioning of the left nasal wing compared to that of the right.

The morphology of the mouth and surrounding area in the face is very reliant on artistic interpretation [3], even if the dental arches are toothed. In Bochdalek's skull all teeth were lost *antemortem* (probably due to pressure of the growing tongue). Remaining alveolar margins, outwardly everted and collapsed (as described above), were pushing the lips ventrally. Swollen lips and narrow rima oris were seen in two referred clinical cases of syngnathia in children [29, 30], where the authors found three ventrally inclined front teeth. In our case no tooth eruption was observed on fixed jaws, because it is highly probable that the accident that resulted in syngnathia occurred during very early childhood. Thus, the role of the teeth in influencing the size of the interlabial gap through normal differentiation cannot be reported, meaning no predicting guideline for lip size [5, 8, 15, 53] could be applied. Lebedinskaya [52] stated that the distance between angles of the mouth roughly correspond to the distance between the second premolars. Wilkinson and Stephan and Henneberg [15, 53] relate the width of the mouth to the canines. Because there are no teeth or recognizable alveoli in our skull, we determined the width of the mouth gap as the distance between the infraorbital foramina [24].

As mentioned above, the dominating masticatory muscles (temporalis and masseter) had lost their function and consequently their original size. On the other hand, even if the mandible is fixed, mimic muscles remain mobile. To some extent, lip supporting muscles could replace the functions of masticatory muscles, so for the patient it is possible to grasp small pieces of food. This is supposedly why the lips can appear massive and can be cambered outside [28]. The ventrally deflected alveolar crest in the lower jaw probably caused the lower lip to protrude more than the upper one. It can be concluded that the left side of the mouth was preferred more for food intake. Thus, the facial muscles and the lips on that side were modeled as more swollen in comparison to the opposite side.

Conclusion

Based on our results it can be stated that non syndromic, post-traumatic and long-term non-treated bilateral syngnathia is an anomaly manifesting in a bilaterally flat face with massive lips and mid face hypoplasia. Due to asymmetric fusion between the jaws, it can be deduced that the growth of condyles and mandibular rami upward and backward helped to “lift” the infraorbital margins of both



Fig. 6 The resulting portrait of the deformed face with a diagnosis of post-traumatic bilateral syngnathia left untreated for a long period of time. Overhanging lower lip, outer nose placed to the right, flattened and partially drooped face with deep wrinkles. It is possible to assume chronic inflammatory changes to the skin in the oral angles as a consequence of poor oral hygiene

the orbits, giving the face an “anti-mongoloid” feature. The handicapped face exhibits an aged expression with shrunken skin. The skin surface in areas covering hypotrophic masticatory muscles is flattened and hollowed.

Key points

1. This study investigates the face model of a unique syngnathic skull to examine the relation between bones and overlapping tissues.
2. A combination of different reconstruction methods is helpful in developing the shape of an unknown malformed face if other sources are missing, such as in this case.
3. The CT examination followed by printed skull cast (RepRap print) helped to preserve the original unique skull.
4. The reconstruction of the face of a skull deformed by non syndromic, and to puberty non-treated, inter jaw

fusion helps to demonstrate hypoplastic changes in the facial soft tissues.

Acknowledgments We would like to thank Jiří Běl, Mgr. (Prodej digitální stomatologické techniky) and J. Průša, for technical assistance during work with the 3D computer digital model, printed using a 3D printer method, and Doc. R. Foltán, for his kind assistance with CT skull examination.

References

1. Laster Z, Temkin D, Zarfin Y, Kushnir A. Complete bony fusion of the mandible to the zygomatic complex and maxillary tuberosity: case report and review. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2001;30:75–9.
2. Daniels JS. Congenital maxillo-mandibular fusion: a case report and review of the literature. *J Craniomaxillofac Surg.* 2004;32:135–9.
3. Wilkinson CM. Facial reconstruction—anatomical art or artistic anatomy. *J Anat.* 2010;216:235–50.
4. Bochdalek VA. Beschreibung einer merkwürdigen Synostose des Unterkiefers mit Oberkiefern (Syngnathia) als Beitrag zur pathologischen Anatomie der Knochen. In: Halla J, Hasner JR, editors. *Vierteljahrsschrift für die Praktische Heilkunde.* Zweiter Band. Prag:Verlag von Carl Reicheneker; 1871. p. 19.
5. Gerasimov MM. *Vosstavlenie lica po cerepu.* Moskva: Izdatelstvo akademii nauk; 1955.
6. Gerasimov MM. *The face finder.* New York: CRC Press; 1971.
7. Stephan CN, Henneberg M, Sampson W. Predicting nose projection and pronasale position in facial approximation: a test of published methods and proposal of new guidelines. *Am J Phys Anthropol.* 2003;122:240–50.
8. George RM. The lateral craniographic method of facial reconstruction. *J Forensic Sci.* 1987;32:1305–30.
9. Gatliff BP. Facial sculpture on the skull for identification. *Am J Forensic Med Pathol.* 1984;5:327–32.
10. Fedosyutkin BA, Nainys JV. The relationship of skull morphology to facial feature. In: İşcan MY, Helmer RP, editors. *Forensic analysis of the skull. Craniofacial analysis, reconstruction and identification.* New York: Wiley-Liss; 1993. p. 199–213.
11. Prag J, Neave RAH. *Making faces. Using forensic and archaeological evidence.* London: British Museum Press; 1997.
12. Taylor KT. *Forensic art and illustration.* New York: CRC Press; 2001.
13. DeGreef S, Claes P, Vandermeulen D, Mollemans W, Suetens P, Willems G. Large-scale in vivo Caucasian facial soft tissue thickness database for craniofacial reconstruction. *Forensic Sci Int.* 2006;159:S126–46.
14. Fetter V, Prokopec M, Suchý J, Titlbach S. *Antropologie.* Praha: Academia; 1967.
15. Wilkinson CM. *Forensic facial reconstruction.* Cambridge: Cambridge University Press; 2004.
16. Wilkinson CM, Whittaker, DK. Juvenile forensic facial reconstruction—a detailed accuracy study. In: *Proceedings of the 10th meeting of the international association of craniofacial identification.* Bari, Italy, 2002; p. 98–110.
17. Wilkinson CM, Rynn C, Peters H, Taister M, How Kau Ch, Richmond S. A blind accuracy assessment of computer-modeled forensic facial reconstruction using computer tomography data from live subjects. *Forensic Sci Med Pathol.* 2006;2:179–87.
18. Wilkinson CM, Mautner SA. Measurement of eyeball protrusion and its application in facial reconstruction. *J Forensic Sci.* 2003;48:12–6.

19. Stephan CN, Davidson PL. The placement of the human eyeball and canthi in craniofacial identification. *J Forensic Sci.* 2008;53:612–9.
20. Stephan CN, Huang AJR, Davidson PL. Further evidence on the anatomical placement of the human eyeball for facial approximation and craniofacial superimposition. *J Forensic Sci.* 2009;54:267–9.
21. Whitnall SE. The anatomy of the human orbit and accessory organs of vision. London: Oxford Medical Publications, Henry Frowde; 1921.
22. Whitnall SE. The anatomy of the human orbit and accessory organs of vision. London: Oxford University Press; 1932.
23. Rynn C, Wilkinson CM, Peters HL. Prediction of nasal morphology from the skull. *Forensic Sci Med Pathol.* 2010;6:20–34.
24. Stephan CN, Murphy SJ. Mouth width prediction in craniofacial identification: cadaver tests of four recent methods, including two techniques for edentulous skulls. *J Forensic Odontostomatol.* 2008;27:2–7.
25. Klepáček I, Naňka O. “Bochdalek” skull (syngnathia). CT examination. *Bratisl Lek Listy.* 2009;110:796–801.
26. Agrawal K, Chandra SS, Sreekumar NS. Congenital bilateral intermaxillary bony fusion. *Ann Plast Surg.* 1993;30:163–6.
27. Bali R, Sharma P, Jain S, Thapar D. Congenital fibrous maxillo-mandibular fusion. *Maxillofac Oral Surg.* 2010;9:277–9.
28. Naikmasur VG, Sattur AP, Joshi SK, Rai A. Congenital Syngnathia: case report and review of literature. *Cleft Palate Craniofac J.* 2010;47:654–60.
29. Fallahi HR, Nacini M, Mahmoudi M, Javaherforoosh F. Congenital zygomatico-maxillo-mandibular fusion: a brief case report and review of literature. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2010;39:930–3.
30. Rogers GF, Greene AK, Oh AK, Robson C, Mulliken JB. Zygomaticotemporal synostosis. A rare cause of progressive facial asymmetry. *Cleft Palate Craniofac J.* 2007;44:106–11.
31. El-Hakim E, Al-Sebaei MO, Abuzennada S, AlYamani AO. Congenital fusion of the maxilla and mandible (congenital bony syngnathia). *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2010;39:933–6.
32. Trigg DJ, Ifan TM, Rosbe KW. Complete bony syngnathia. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg.* 2007;133:187–90.
33. Salleh NM. Congenital part fusion of the mandible and maxilla—report of case. *Oral Surg Oral Medicine Oral Pathol.* 1965;20:74–6.
34. Verloes A, Raoul M, Genevieve D, Sznajer Y, Demarche M, Lombet J, Rigo V, Misson JP, Collignon L, Vanwijck F, Vanwijck R. Bony syngnathia, vertebral segmentation defect, coloboma, microcephaly and mental retardation: confirmation of Dobrow syndrome and review of syndromal syngnathias. *Clin Dysmorphol.* 2004;13:205–11.
35. Parkins GE, Boamah MO. Congenital maxillofacial syngnathia: case report. *J Craniomaxillofac Surg.* 2009;37:276–8.
36. Halli R, Kharkar V, Kini Y, Rudagi BM. Congenital unilateral maxillo-mandibulo-zygomatic fusion (syngnathia). A case report in a 8-year-old boy. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2010;39:500–2.
37. Enlow DH. Morphogenetic analysis of facial growth. *Am J Orthod.* 1966;52:283–99.
38. Enlow DH, Williams K, Williams P. An instrument for the analysis of facial growth. *Angle Orthod.* 1969;39:316–9.
39. Enlow DH. Facial growth. Philadelphia: WB Saunders; 1990.
40. Enlow DH, Hans MG. Essentials of facial growth. Philadelphia: WB Saunders; 1996.
41. Dawson KH, Gruss JS, Myall RW. Congenital bony syngnathia. A proposed classification. *Cleft Palate Craniofac J.* 1997;34:141–6.
42. Stephan CN. The human masseter muscle and its biological correlates: a review of published data pertinent to face prediction. *Forensic Sci Int.* 2010;201:153–9.
43. Stephan CN, Simpson EK. Facial soft tissue depths in craniofacial identification (part I): an analytical review of the published adult data. *J Forensic Sci.* 2008;53:1257–72.
44. Kiliaridis S, Kålebo P. Masseter muscle thickness measured by ultrasonography and its relation to facial morphology. *J Dent Res.* 1991;70:1262–5.
45. Şatiroğlu F, Arun T, Isik F. Comparative data on facial morphology and muscle thickness using ultrasonography. *Eur J Orthod.* 2005;27:562–7.
46. Stephan CN, Devine M. The superficial temporal fat pad and its ramification for temporalis muscle construction in facial approximation. *Forensic Sci Int.* 2009;191:70–9.
47. El-Labban NG, Harris M, Hopper C, Barber P. Degenerative changes in masseter and temporalis muscles in limited mouth opening and TMJ ankylosis. *J Oral Pathol Med.* 1990;19:423–5.
48. Ravosa MJ, Kunwar R, Stock SR, Stack MS. Pushing the limit. Masticatory stress and adaptive plasticity in mammalian cranio-mandibular joints. *J Exp Biol.* 2007;210:628–41.
49. Moore MH, Wong KS, Proudman TW, David DJ. Progressive hemifacial atrophy (Romberg’s disease): skeletal involvement and treatment. *Br J Plast Surg.* 1993;46(1):39–44.
50. Gomez-Diéz SG, López LG, Escobar ML, Gutiérrez LJ, Oliva NP. Progressive facial hemiatrophy with associated osseous lesions. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* 2007;12:E602–4.
51. Rynn C, Wilkinson CM. Appraisal of traditional and recently proposed relationships between the hard and soft dimensions of the nose in profile. *Am J Phys Anthropol.* 2006;130:364–73.
52. Lebedinskaya GB. Rekonstrukcia lica po cerepu (metodiceskoje rukovodstvo). Moskva: Staryj sad; 1998.
53. Stephan CN, Henneberg M. Predicting mouth width from inter-canine width—a 75 % rule. *J Forensic Sci.* 2003;48:725–7.



Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave – Case Report

Daniel Vane^{1,11*}, Hana Brzobohata^{2,3}, Marcela Silerova¹¹, Zdenek Horak⁴, Miriam Nyvltova Fisakova⁵, Michaela Vasinova Gali^{6,7}, Pavla Zednikova Mala^{2,8}, Vladislava Urbanova¹¹, Miluse Dobisikova⁹, Michal Beran¹ and Petr Brestovansky¹⁰

¹Charles University in Prague, 2nd Faculty of Medicine, Prague, Czech Republic

²Department of Anthropology and Human Genetics, Faculty of Science, Charles University, Prague, Czech Republic

³Institute of Archaeology of the Academy of Sciences, Prague, Czech Republic

⁴Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Laboratory of Biomechanics, Prague, Czech Republic

⁵Institute of Archaeology of Academy of Sciences Brno, vvi, Brno, Czech Republic

⁶Department of Chemistry, Faculty of Science, Masaryk University, Brno, Czech Republic

⁷Central European Institute of Technology (CEITEC), Masaryk University, Brno, Czech Republic

⁸Institute of Criminalistics Prague, Czech Republic

⁹National Museum, Department of Anthropology, Prague, Czech Republic

¹⁰North Bohemian Museum Liberec, Czech Republic

¹¹Forensic DNA Service, Budinova 2, 180 81 Prague 8, Czech Republic

Abstract

Aim: The present study was designed to analyze the 700-year-old human remains from an unusual grave using a combined approach that consisted of anthropological, archaeogenetic, genealogical, mass spectrometry, 3-dimensional (3D) modeling and facial reconstruction methods to confirm or reject several hypotheses about the skeletal remains.

Methods: DNA was extracted from the skeleton and amplified using autosomal and Y-chromosome human identification short tandem repeat (STR) kits that were designed for forensic use, and sequence data were obtained from hyper variable region I (HVRI) mtDNA sequencing. Elemental mapping and quantification of investigated elements were performed using laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS). The Computed Tomography (CT) images of the skull were created in a transversal plane, and the scans were used to create 3D geometric models of the skull. A plastic physical model (a cast) of the skull was produced by rapid prototyping technology, and the model was used for sculptural facial approximation of the studied individual.

Results: The Y-chromosome haplogroup of the sample was determined to be E1b1b, and the assigned mtDNA haplogroup was H. LA-ICP-MS and geochemical analysis revealed that the individual consumed plants and meats, except pork. Anthropological examination estimated the age of the individual to be between 45-55 years, and we did not find any traces of disablement or physical anomalies. Interestingly, we were able to produce a facial reconstruction according to the skull.

Conclusion: Applying a multidisciplinary approach to the examination of the 14th century material enabled us to retrieve new types of information that helped us to interpret the excavated skeletal remains.

Keywords: Mass spectrometry; Genealogical; Physical anomalies; Anthropological

Introduction

During a rescue excavation in March 2010, archaeologists discovered an unusual grave near the main square of Hradek nad Nisou, Northern Bohemia, that was dated to the first half of the 14th century. The male skeleton was found in a shallow (20 cm deep) pit under a layer of 14th century ceramics that were deposited in a manner that was typical for outcasts. The grave-pit was situated outside the area of the cemetery (approximately 0.5 m from the original graveyard wall) and was parallel to the graveyard wall. The body was in a stretched ventral decubitus position with the left arm along the body and the right arm slightly abducted at the shoulder joint, bent at the elbow and the hand clenched in a fist (Figure 1). The head was slightly turned to the left and faced west. The anatomical contexts were not dislocated, and the skeleton was mostly complete, but some hand and foot bones were missing, and the ribs and vertebrae were poorly preserved. Severe fragmentation of some bones and the skull was likely caused by the relatively shallow depth of the grave and heavy construction machinery crossing over top of the grave. Four silver coins were unearthed next to the left arm (*Grossi Pragenses* from the period of reign of John the Blind [1310–1346, the Luxembourg Dynasty]) (Figure 2).

According to available written sources, the excommunicated, the unbaptized, Jews, Protestants, offenders, individuals suspected of witchery, those who committed suicide, killed and murdered persons, still-born children, executioners, knackers, strangers, disabled or mentally handicapped persons and unknown cadavers were excluded from burial in a Christian necropolis [1].

Burial in a nonritual position disallowed the participation of the deceased in the Last Judgment and resurrection. In addition, burial in a nonritual position could also be evidence of anti-vampiric remedies, which were performed to keep potential vampires (often including

*Corresponding author: Daniel Vane, Forensic DNA Service, Janovskeho 18, 170 00 Prague 7, Czech Republic, Tel: +420 603 979 915; E-mail: daniel.vane@DNA.com.cz

Received: August 04, 2014; Accepted January 27, 2015; Published February 05, 2015

Citation: Vane D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Gali M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](http://dx.doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

Copyright: © 2015 Vane D, et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)



Figure 1: The grave pit with the body in a stretched ventral decubitus position.



Figure 2: Excavated *Grossi Pragenses* from the period of reign of John the Blind (1310-1346, the Luxembourg Dynasty).

the condemned) from returning to the world of the living and causing harm. The face-down position can also symbolize a penance, which was the case for King Pepin the Short who died in 768 and was buried in the Abbey of Saint Denis north of Paris [2].

The first DNA study of aged material was performed on the 140-year-old museum specimen of quagga skin by sequencing 229 bps of mitochondrial DNA [3]. The results of the first ancient DNA (aDNA) analysis of human remains appeared in 1985 when S. Paabo described his successful attempt to retrieve and analyze the nuclear *Alu* repetitive sequence family DNA from a 2,400-year-old Egyptian mummy of a child [4]. The development of PCR [5,6] boosted aDNA studies, but most studies have examined sequences of the mitochondrial genome [7-9] rather than focusing on the more difficult nuclear DNA. Improvements in molecular biological technologies in the last decade have helped overcome some of the limitations that restricted DNA analysis to mitochondrial DNA, which is abundant in mammalian cells. In addition, improvements in forensic genetics (e.g., inhibitor-free DNA extraction, multiplex PCR, short STR amplicons and qPCR) have enabled archaeologists to test nuclear DNA, including Y-chromosome STR typing [10,11].

Currently available techniques for DNA analysis using “forensic” procedures [11] can be combined with the classical anthropological examination, advanced imaging and CT scanning techniques [12]

and isotope analysis [13] to improve the quality of information that is retrieved from ancient artifacts. A multidisciplinary approach to examining ancient human remains can help verify the DNA analysis results and interpret the findings more precisely.

All of the available techniques for bone sample DNA analysis [14] consume some portion of the artifact and must therefore be considered destructive. There is an understandable need to perform a near-perfect documentation (i.e., a CT scan) of the bone prior to performing a DNA analysis to preserve information that might be important for the anthropological examination.

Anthropological facial reconstruction/approximation is a method that is used to rebuild lost or unknown features of a person’s face over the skull. Facial reconstruction is based on a particular relationship between the morphology of a face and the skull beneath it. Facial reconstruction uses average values of soft tissue depths that are measured at defined points of the face and applies various prediction guidelines to determine the size and shape of the facial features (e.g., eyes, nose and mouth).

The present study describes the interdisciplinary approach that was used to identify 700-year-old skeletal remains and resolve the unusual burial pattern of the individual.

Materials and Methods

Burial place and specimen

The burial site of the male skeleton from the first half of the 14th century was discovered during a rescue excavation in March 2010 in Hradek nad Nisou, Czech Republic. The skeletal remains are exhibited in museum Brana Trojzemi, Hradek nad Nisou, Czech Republic since 2012. The skeletal remains are in the inventory of the North Bohemian Museum Liberec under the code Pr.c.: 5/2011, Inv.c.:P20316. No permits were required for the described study.

Laboratory setup, anti-contamination procedures and bone sample preparation

DNA extraction from a femur sample was performed in a specialized laboratory that was specifically dedicated to the analysis of the ancient samples. Vanek et al. have previously described the laboratory setup, the anti-contamination strategies and the preparation of the bone sample [11].

Silica-based DNA extraction and DNA quantitation

The DNA extraction procedure was modified [11] from a protocol reported by Davoren et al. [14]. The isolated DNA was quantified with real-time PCR using the 4N6 Quant ALU kit (Biologicals, Ricany, Czech Republic) on a MasterCycler[®] ep realplex S instrument (Eppendorf, Hamburg, Germany).

PCR amplification and fragment analysis

The extracted DNA was PCR-amplified using the AmpF ℓ STR[®] NGM[™] PCR Amplification Kit (NGM) and the AmpF ℓ STR[®] Yfiler[®] PCR Amplification Kit (Y-filer) (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA) and the laboratory-developed Y-miniplex I and II, which consisted of the DYS388, DYS426, DYS444, DYS446, DYS447, DYS449, DYS459, DYS481 loci plus Y-filer[™] overlapping loci – DYS392 and DYS438 [11]. PCR conditions for the NGM[™] and Y-filer[™] kits (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA) were in accordance with the manufacturer’s recommendations. The only change was that the cycle number was increased by one for both kits. All of the amplifications were performed

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

Page 3 of 12

on a MasterCycler[®] *ep* gradient S thermocycler (Eppendorf, Hamburg, Germany).

Capillary electrophoresis

All of the amplified samples were purified using a MinElute PCR Purification Kit (Qiagen, Hilden, Germany). The STR fragments were separated on an ABI PRISM[®] 310 Genetic Analyzer (Applied Biosystems) under standard conditions, and the raw data were analyzed using GeneMapper[™] ID software, version 3.2 (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA).

Mt DNA analysis

Amplification of the hypervariable region I of the mtDNA was performed in a reaction volume of 50 µl that contained approximately 50 ng of DNA, 2 mM MgCl₂, 200 µM dNTPs, 0.2 nM of each primer (sense 5'-CTCCACCATTAGCACCCAAA-3' and antisense 5'-AGAGCTCCCGTGAGTGGTTA-3') and 1 unit of AmpliTaq Gold polymerase (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA). The PCR cycling parameters were 2 min at 94°C, 40 cycles of 30 s at 94°C, 40 s at 56°C and 120 s at 72°C and a final extension for 10 min at 72°C. The resulting PCR product was ligated in a pCR2.1-TOPO cloning vector (Invitrogen, Carlsbad, CA, USA) and sequenced with the ABI PRISM BigDye Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA). The chain termination reaction [15] was performed with a cycle sequencing technique [16] according to the manufacturer's protocol. The sequences were determined using an ABI PRISM 310 DNA sequencer (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA), and the resulting mitochondrial sequence was compared with the revised Cambridge Reference Sequence. The mtDNA haplogroup was predicted by comparing the results with the haplogroup-specific mutation motifs.

Interpretation of the results

Two independent extractions per sample were performed, and the resulting extract was used for DNA quantitation and a PCR set. The method of replicated analyses [17,18] was used to interpret the resulting STR profiles.

Y-haplogroup prediction and database searches

Y-chromosome haplogroups were predicted using a method described by Athey [19]. The resulting Y-chromosome haplotypes were compared with the Y-chromosome haplotypes that were accessible in public databases (www.ysearch.org and www.yhrd.org).

3D modeling

CT images of the skull were created in a transversal plane using a Philips Brilliance 16 scanner (Philips Healthcare, Amsterdam, The Netherlands). The images were recorded with a resolution of 512x512 pixels (the pixel size was 0.488 mm, and the distance between the individual slices was 0.5 mm). The machine settings corresponded to a general algorithm that would be used to examine the skull of a living patient. The mandible scans were made in the frontal plane using the same scanning parameters that were used for the skull. The bone segmentation was performed from a series of CT scans in the Mimics[®] 13 program (Materialise, Leuven, Belgium) [20]. 3D geometric models of the skull and the mandible were created in the electronic STL format, which created a 3D mesh of triangles on the solid geometric surface [21].

Facial reconstruction

The facial reconstruction method consists of several slightly

different techniques, and the selection of a particular technique depends on the “input data” (e.g., the photography of the skull, the virtual 3D model and the dry skull), the preservation state of the facial skeleton, the biological profile of the studied individual and the preferences of the practitioner or technical facility. In the present study, the manual British combination technique [22] (Figure 3) was used for the facial reconstruction. A rather eclectic approach and guidelines from several authors [22-28] were used for the present facial reconstruction.

As the first step, a detailed morphological examination of the skull/cast/virtual model was performed using the relevant facial reconstruction measurements. The next step was to complete the missing splanchnocranium areas (e.g., the right-side nasal bone, the anterior wall of the right-side maxilla, the right-side zygomatic arch and the left-side mandible caput), and we made the missing areas symmetrical to the preserved bones from the opposite side. The mandible was fixed to the base of the skull with a 2-3-mm space between the preserved teeth, which corresponded to the relaxed position of the lower jaw, and plaster eyeballs were positioned into the orbits [25,27]. Wooden pegs, which were used to simulate the average soft tissue depths (based on data for Europeans [29]), were attached to the skull model at defined anthropometric landmarks. The facial muscles were then modeled onto the skull in plasticine. This “anatomical” phase was followed by a morphology determination of the facial features. The nose was reconstructed according to guidelines published by Rynn et al. [23]. Predicting the mouth morphology is generally difficult and primarily relies on artistic interpretation, even if some information could be obtained from the configuration of the teeth and the alveolar process. In the present case, the position of the mouth line was estimated according to George [28,29], but the lip height could not be calculated [22] due to the strong abrasion of the teeth crowns; thus, the lip height was approximated in accordance with the whole face morphology and age. The lip width was determined following the rule of Stephan and Henneberg [24]. We also modeled the parotid gland, and the muscle structure was covered by a layer of skin and subcutaneous fat. After the surface was smoothed, we added the ears and the brows. Because we had no information about the hair style, the reconstructed face/head was left without hair (Figures 4-6).

Age estimation

To estimate the age of the preserved material, we used a method for evaluating the internal structure of the femur according to Szilvássy and Kritscher [30] and a method for evaluating the tooth on its cross-section in the medial plane according to Kilián et al. [31] and Piliñ



Figure 3: An unfinished facial reconstruction in the phase before the application of the skin layer.

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvitova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

Page 4 of 12



Figure 4: Completed facial reconstruction (half-profile, plasticine).



Figure 5: Completed facial reconstruction (en face, plasticine).

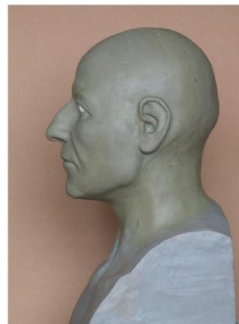


Figure 6: Completed facial reconstruction (profile, plasticine).

and Šturmankin [32]. The upper section of the left femur and the right canine of the mandible were used for the evaluation.

Tooth cross-section in the medial plane

The evaluation process that was used for the teeth in the present study was based on several methods: Gustafson's Method and scoring of attrition, secondary dentin deposition, root dentin transparency, periodontal disease progression, cementum apposition and resorption of the root apex on the medial plane of thin ground sections of a single-

rooted tooth. The total points allotted were used in formulas from studies by Kilián et al. [31] and Pilin and Šturmankin [32].

The height of the tooth embedment in the periodontium was marked at the root of the canine. The tooth was then extracted from its bed, cast into the two-component Dentakryl resin (SpofaDental, Jicin, Czech Republic) and cut in the medial plane using an Isomet 1000 saw (Buehler LTD, Lake Bluff, IL, USA). The points allotted for traits according to the Kilián et al. [31] scale were assessed on the cross-section.

Biological anthropology

The unearthed skeletal remains were analyzed using a wide range of consequential analyses. The bones were cleaned and arranged into higher morphological units, and all of the recent mechanical damages were consolidated. The next step was to apply the standard biological anthropology methods. The long limb bones yielded an estimated living stature [33-35], and the age at death was estimated based on the pubic symphysis morphology, the dental attrition, the degree of thyroid cartilage ossification and the metamorphosis of the auricular and retroauricular surfaces of the ilium [34-36].

The gender was determined by the presence of well-defined, characteristic masculine cranial and pelvic features, and the sexual diagnosis was confirmed using a range of morphometric methods (probabilistic sexual diagnosis) [37,38] and DNA analysis.

Season of death

A dental cement microstructure analysis can be used to determine the season during which a person died. Although dental cement accrues over a person's lifetime, the rate at which the cement accrues is not the same throughout the year. Indeed, the rate is more intensive during the vegetation period (April to October) when plenty of food is available, whereas the growth rate is slow during the dormancy period (November to March) when food is not abundant (the dental cement accumulation is similar to the annual growth rings on trees). The formation of winter accretion begins in November and ends in April, and summer accretion begins to form in May. Annual accretion consists of light summer and dark winter accretions, and accretion results from the diverse actions of cementoblasts, which are affected by the relative mineral and organic composition percentage [39-41]. The dental cement microstructure analysis also requires a determination of the thickness of the individual winter and summer increments, and the thicknesses are used to derive the amount of time that passed since the accretion began to form (from May or November) on the mammal in question [39-41].

Nitrogen ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) and carbon ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) isotopes

The ratio of $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ nitrogen isotopes can determine whether an animal or person was food deprived. Meat contains the most isotopes, whereas cereals contain the least amount of isotopes. The plants with the most ^{15}N nitrogen are pulses.

Carbon isotopes provide information about dietary composition. During photosynthesis, C4 and C3 plants convert the carbon isotopes ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) into complex sugars at varying rates. In C3 plants, the ^{13}C carbon isotope makes up -22 to -30% , whereas the value is between -9% to -16% in C4 plants. In Czech Republic, C3 plants consist of trees, fruit trees and rice, whereas the C4 plants are all cereal plants and grasses. Determining the ratio of carbon isotopes can define a person or an animal's diet [42-44]. The method of assessing $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratio is the same as used for radiocarbon dating [45].

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvtova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

Page 5 of 12

Multielemental analysis and mapping by means of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS)

Multielemental analysis and mapping of the elements of interest were performed using a UP 213 laser ablation system (New Wave Research, Inc., Fremont, CA, USA) connected to a quadrupole-based ICP-MS Agilent 7500 CE spectrometer (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA). The commercial Q-switched Nd:YAG laser ablation device worked at the 5th harmonic frequency (213 nm). Programmable XY-stages were used to move the sample during the laser ablation. A sample was placed in the SuperCell (New Wave, Fremont, CA, USA) and ablated by the laser beam, which focused on the sample surface through a quartz window. The ablated material was transported by helium (carrier gas) to the inductively coupled plasma, and the helium carrier gas was mixed with argon after the laser ablation cell. The total gas flow was 1.6 l/min. Optimization of the LA-ICP-MS conditions (e.g., the gas flow rates, the sampling depth, the electrostatic lenses and the voltages of the MS) was performed with the glass reference material NIST SRM 612, and we took into account the maximum S/N ratio and the minimum oxide formation (the ThO⁺/Th⁺ counts ratio was 0.2%, and the U⁺/Th⁺ counts ratio was 1.1%).

LA-ICP-MS analysis was performed on the root section of a human tooth from the remains (Figure 7). The hole drilling mode was used to record the elements' signals. During laser ablation, the sample was fixed in the same position for 7 s. After the laser ablation, the decrease of the recorded signal between the individual spots was set to 8 s. The LA-ICP-MS ablation pattern contains ablation craters of approximately 40 µm in diameter that are placed at distances of approximately 80 µm. The maximum signals were chosen to prepare the 2D maps, and the background was subtracted for each spot. Trends for calculating the intensities were visualized by the software Grams (ThermoFisher Scientific, USA). Laser ablation was performed with a laser fluency of 5 J/cm² and a frequency of 10 Hz. The isotopes ²³Na, ²⁴Mg, ⁵⁵Mn, ⁵⁶Fe, ⁵⁷Fe, ⁶³Cu, ⁶⁶Zn, ⁸⁶Sr, ⁸⁸Sr, ¹³⁵Ba, ²³²Th and ²³⁸U were measured using an integration time of 0.1 s/isotope, whereas for ⁴³Ca, ⁴⁴Ca and ³¹P, an integration time of 0.01 s/isotope was used. Elemental mapping was realized on the sample surface with a size of 2.9×1.3 mm². The present analysis resulted in an ablation pattern with 612 ablation spots, and we obtained a photograph of the sample (Figure 7) with a Nikon SMZ 1500 (Nikon, Tokyo, Japan). The Sr, Zn and Ba contents were calculated using bone meal (NIST 1486) pressed into the pellet.

Results

DNA analysis

The extraction protocol that was used for the bone sample yielded measurable DNA quantities, and the DNA from the independent extracts was amplified using the NGM™ kit (Applied Biosystems, Foster

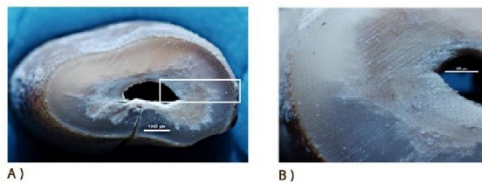


Figure 7: Photograph of the root of a human tooth from the remains investigated by LA-ICP-MS.

City, CA, USA). The resulting electropherograms (EPGs) were free of contamination and artificial peaks, and the peak heights were sufficient for reliable data analysis. None of the tested extracts provided results in all of the possible STR loci (15+AME). The worst performances were detected for the D16S539, D2S1338, D18S51, FGA and D1S1656 loci.

When we combined the data from the Y-filer™ (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA) and the Y-miniplex I and II, we obtained Y-chromosome haplotypes with 14 STRs (Table 1). None of the extracts provided results in all of the possible STR loci (17+8). The Y-chromosome haplogroup E1b1b [46] was successfully predicted [19] for the tested sample.

All of the STR amplicons were purified prior to capillary electrophoresis using the MinElute PCR Purification Kit (Qiagen, Hilden, Germany) (Figure 8).

shows an example of a positive post-PCR cleaning effect and indicates the missing peaks in larger amplicons.

A comparison of the resulting haplotype to the YHRD database [47] did not reveal any matches; however, a comparison with the YSEARCH database (www.ysearch.org) resulted in several matches to living individuals (Table 1). The Y-chromosome haplotype was stored in the www.ysearch.org database under the sample identifier DE8WN.

The mtDNA HVR1 sequence analysis only revealed one difference (i.e., position 16362C) from the revised Cambridge reference sequence [48,49]; thus, we can predict that the individual belongs to mtDNA haplogroup H [50].

The results of the skeleton mtDNA and Y-chromosome typing were compared with 12 male individuals from the Hradek nad Nisou region who were self-identified as denizens. None of the individuals matched the skeleton's mtDNA haplotype. One person matched the skeleton's Y-chromosome haplogroup, but numerous differences in his haplotype exclude any closer paternal relationship. Table 2 summarizes the results of the Y-chromosome and mtDNA typing of the denizens.

3D modeling

The 3D modeling was used to perform the segmentation of the bone tissue of the skull and the mandible from a series of CT scans, design a 3D geometric model of the skeleton and place the individual skull bone fragments into the correct anatomical position.

During the image data segmentation, the individual models of most of the skull bones were designed. Because the shape of the skull was partially deformed and several bone fragments were separated, it was necessary to reposition the individual fragments into their original anatomical positions. The following bone fragments were repositioned: *os zygomaticum* (right side), *os temporale* (both sides; both were assembled from a number of fragments), *os parietale* (both sides; the left side was assembled from a number of fragments), *os frontale*, *os occipitale*, and the mandible (Figures 9 and 10).

shows the shape of the skull after repositioning the fragments. The plastic physical model was designed using rapid prototyping (RP) technology for fused deposition modeling (FDM). The physical model was made from white plastic acrylonitrile butadiene styrene (ABS) on a 3D Prodigy Plus printer (Stratasys, Eden Prairie, MN USA). Figure 11 shows the resulting physical model of the reconstructed skull.

Age and sex estimation

Although the tested human bones were damaged by decomposition

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave–Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

Sample ID	Sample/individual name	393	19	391	385a	388	389-1	392	389-2	458	H4	456	635	446	481
DE8WN	Skeleton HnN	13	14	10	16	12	12	11	31	15	11	15	23	11	22
3NWQC	Casales	13	14	10	16	12	<i>13</i>	11	31	15	11	<i>16</i>	X	12	22
4AK2U	Smith	13	<i>13</i>	10	16	12	12	11	30	15	11	<i>16</i>	X	12	22
9JM9U	Donovan	13	<i>13</i>	10	17	12	<i>13</i>	11	31	15	11	15	X	11	22
A2URP	Thugut (Toviah)	13	14	10	16	12	<i>13</i>	11	30	15	11	15	X	12	22
EUAH6	Urasin	13	<i>13</i>	10	16	12	<i>13</i>	11	32	15	<i>10</i>	15	X	12	22
KFKGM	Gwozdz	13	<i>13</i>	10	16	12	<i>13</i>	11	32	15	11	15	X	13	22
KRHRX	Bell	13	14	10	17	12	12	11	29	15	11	15	22	12	x
U5QF4	Modal Ht V13 C	13	<i>13</i>	10	17	12	<i>13</i>	11	32	15	11	15	X	12	22

Nonmatching alleles are in *italics*.

Table 1: Results from the Ysearch database search.

	Y-chromosome haplogroup	mtDNA haplogroup
Person 1	R1a	T2
Person 2	R1a	I
Person 3	R1b	U5
Person 4	<i>E1b1b</i>	<i>H</i>
Person 5	R1b	<i>H</i>
Person 6	R1b	<i>H</i>
Person 7	J2b	J
Person 8	R1a	U3
Person 9	R1b	<i>H</i>
Person 10	R1b	U5
Person 11	R1b	U4
Person 12	G2c	<i>H</i>

Haplogroups matching those obtained from the skeletal sample are in *italics*.

Table 2: The results of the Y-chromosome and mtDNA typing of Hradek nad Nisou denizens.

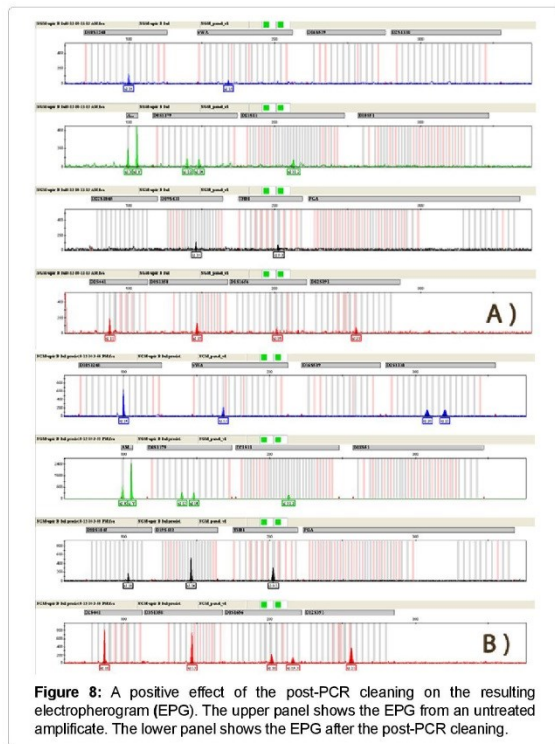


Figure 8: A positive effect of the post-PCR cleaning on the resulting electropherogram (EPG). The upper panel shows the EPG from an untreated amplicate. The lower panel shows the EPG after the post-PCR cleaning.

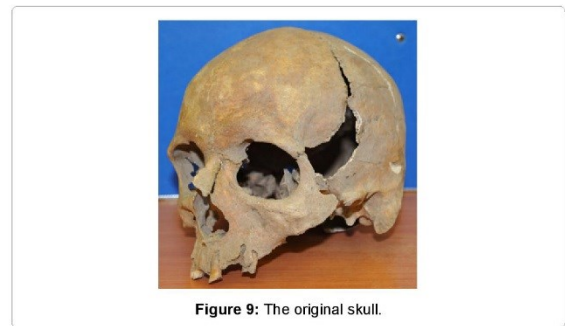


Figure 9: The original skull.

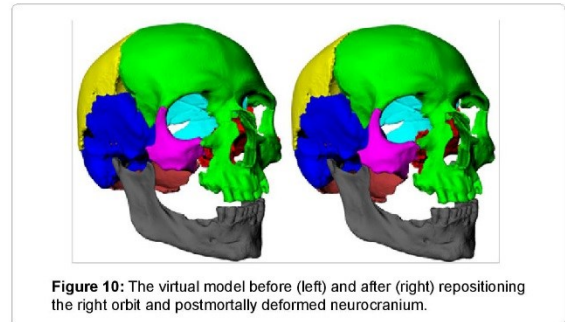


Figure 10: The virtual model before (left) and after (right) repositioning the right orbit and postmortally deformed neurocranium.

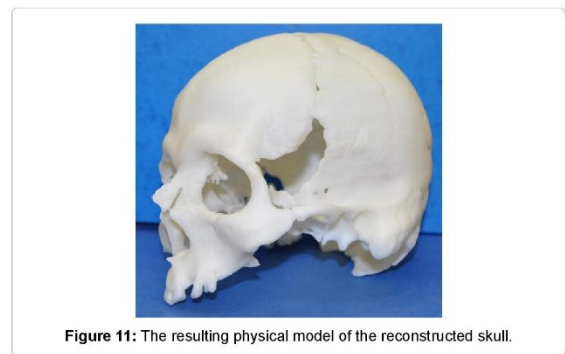


Figure 11: The resulting physical model of the reconstructed skull.

processes and some parts were completely missing, they contained evidence about the body construction, height, gender, age at death and

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave–Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: 10.4172/2332-0915.1000138

health status of the buried individual. The present remains belonged to a robust, well-muscled man whose maximum lengths of the long limb bones yielded an estimated living stature of approximately 170 cm [33-35]. The age at death was estimated to be between 40 and 60 years based on the pubic symphysis morphology, the dental attrition, the degree of thyroid cartilage ossification and the metamorphosis of the auricular and retroauricular surface of the ilium [34-36].

The sex was determined by the presence of well-defined, characteristic masculine cranial and pelvic features, and the sexual diagnosis was confirmed using a range of morphometric methods (probabilistic sexual diagnosis) [37,38] and DNA analysis. Skeletal pathologies included traces of numerous intravital tooth losses on both the upper and lower dental arches, a dental fistula of the mandible corpus perforating the front wall (associated with the inflammatory process), pronounced alveolar resorption around the roots (periodontal disease) and slight marginal lipping of the right femoral head (Figure 12).

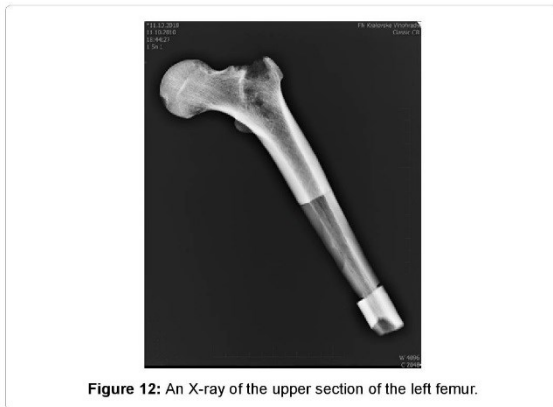


Figure 12: An X-ray of the upper section of the left femur.

Changes of dental tissue	Score
Attrition	2.00
Periodontitis	1.50
Secondary dentin	1.75
Calculus	1.75
Root resorption	1.50
Transparency	2.25

Table 3: Points according of Kilian's scale.

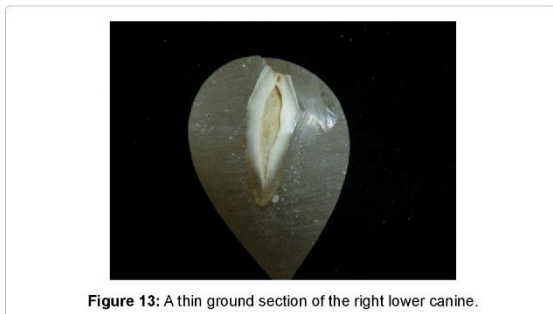


Figure 13: A thin ground section of the right lower canine.

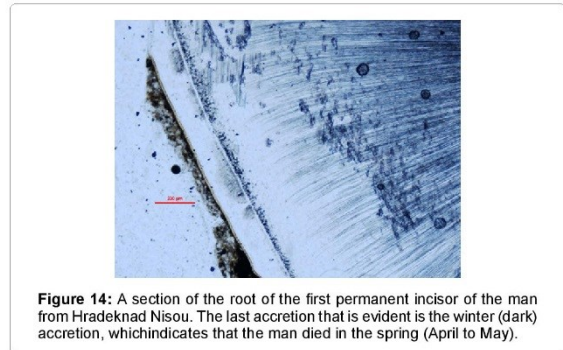


Figure 14: A section of the root of the first permanent incisor of the man from Hradek nad Nisou. The last accretion that is evident is the winter (dark) accretion, which indicates that the man died in the spring (April to May).

Laboratory code UGAMS #	I.D. code	Anatomy	δ ¹³ C	δ ¹⁵ N
7352	Hrad-1	Molar	n/a	n/a
7353	Hrad-2	Femur	-20.33	9.89

Table 4: Results of the analyses of carbon and nitrogen isotopes from a man from Hradek nad Nisou. n/a – no collagen suitable for analysis was present.

Element	Content (mg/kg)	SD
Sr	251	16
Zn	116	19
Ba	50	14

Table 5: Sr, Zn and Ba contents were obtained using LA-ICP-MS in the dentin of a root of a tooth from the remains.

Neither vertebrae nor the bones in the right arm, including the carpals, metacarpals and phalanges, showed any degenerative changes.

Although sophisticated methods are available to determine important demographic data (namely age at death), some limitations exist. For example, the degree of senescence transformation varies and is influenced by many factors, such as inherited dispositions, nutrition and mechanical loading. We could only conclude that the man buried behind the graveyard wall probably died during his fifth or sixth decade. Age categories used by biological anthropologists are relatively wide, and histological methods must be used if there is a need to specify the age more accurately.

An X-ray of the femur (Figure 12) suggested that the compact bone had an intermediate thickness, the medullary cavity slightly exceeded the upper margin of the lesser trochanter and the spongiosa trabeculae in the neck were loosened with visible small cavities. We could not evaluate the spongiosa in the greater trochanter due to material damage, although it appears that loosening also occurred at this site. According to Szilvássy and Kritscher [30], these structures correspond to the maturus I category (i.e., 40-50 years).

The age that was calculated according to methods described by Kilián et al. [31] was 48 years, whereas the age that was calculated according to the methods described by Pilin and Šturmankin [32] was 52 years (53 years after accounting for trait significance) (Table 3). The mean of these three determinations is 51 ± 3.5 years.

Based on the X-ray and tooth thin section evaluation (Figure 13), we concluded that the age of the man was most likely 45-55 years.

Analysis of the dental cement microstructure

Two sections of roots from the first permanent incisor (incisivus-I¹) were studied.

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvitova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

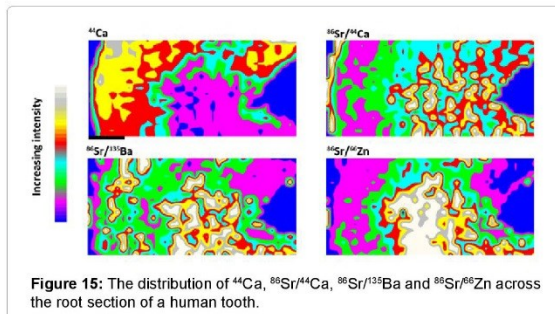


Figure 15: The distribution of ^{44}Ca , $^{86}\text{Sr}/^{44}\text{Ca}$, $^{86}\text{Sr}/^{138}\text{Ba}$ and $^{86}\text{Sr}/^{66}\text{Zn}$ across the root section of a human tooth.

The last accretion on the first upper incisor of this man was the winter accretion. The summer accretion, which begins to form at the beginning of May, had not begun to form on the first upper incisor [39-41]. Therefore, the man died at the turn of April to May (Figure 14).

Multielemental analysis and mapping

The isotope analyses were performed at the Center for Applied Isotope Studies, University of Georgia. Table 4 shows the results of the analyses of the ratio of carbon and nitrogen isotopes.

Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS)

The Sr, Zn, and Ba contents were calculated using bone meal (NIST 1486) that was pressed into a pellet. Table 5 summarizes the amounts of these elements in the nonaffected dentin.

The distribution maps of the Sr/Ca, Sr/Ba and Sr/Zn ratios (Figure 15) were normalized to the calcium signal to minimize the laser beam energy fluctuation.

Discussion

The main goal of the present study was to apply different scientific techniques to confirm or reject theories about the unusual burial pattern of the excavated male skeleton, and we primarily investigated the “Vampire” and “Jewish” theories.

Throughout history, death has often been a surprisingly extended process. During this process, the central entity was the soul rather than the body. At the same time, the soul itself could often behave like a body, and vampires inhabited a curious space between the living and the dead [51-61].

The practice of burying the dead face down has occurred across time and societies, and the earliest known case of such a burial (26,000 years ago) was found in the Czech Republic [52]. Frequent and repeated discoveries of skeletal remains with evidence of anti-vampiric remedies indicate that the belief in vampires was widespread throughout the medieval Czech territory. In excavated cemeteries, some burials exhibit traces of anti-vampiric measures (including burial in a face down position) to keep vampires from returning to the world of the living [53]. In 1966, an unusual concentration of such graves, where fourteen adult corpses were buried, was discovered in the city of Čelákovice, which is located a few kilometers from Prague [54]. Further re-assessment of this unique burial place in-ferred both the dating (late 10th and early 11th centuries) and the suspected vampirism due to the hypothetical existence of a local execution site [55] and similarities to other European sites, such as the Swiss Emmenbrücke

[56]. Abnormal burials and irregularities have been observed in a small number of archaeological sites in early medieval cemeteries in Lahovice [57], Prague-Motol [58], Brandýsek [59] and Radomyšl [60]. An increasing number of both testimonies and precautions against potential revenants have been documented (even in modern history), and ethnographic materials bear evidence of abnormal burials up to the first half of the 20th century. Mjartan [61] pointed out the collective character of this folk belief regarding burial practices and different preventive measures in particular regions. Preventive measures may have been performed for individuals who differed either physically or mentally from their contemporaries. There are no traces of disablement or anomalies in the skeletal remains of the man from Hradek nad Nisou, and it is unclear whether he was a stranger, a condemned man or someone professing a religion other than Christianity.

DNA analysis

The success rate of DNA extraction from bone samples is strongly influenced by the chemical composition of the soil, the humidity, the pH, the temperature, the presence of microorganisms and the age of the specimen, and choosing the appropriate DNA extraction technique is crucial for most ancient skeletal samples [11]. According to our previous experience with ancient samples, only the middle part of the femur was used for DNA extraction, and the extraction procedure followed a previously described extraction protocol [11] using the newly designed HaR and DeX buffers (Biologicals, Ricany, Czech Republic). The silica-based extraction procedure provided sufficient amounts of both nuclear and mitochondrial DNA, which was mildly contaminated with co-extracted PCR inhibitors. We used Qiagen columns for the post-PCR cleaning procedure, which significantly improved the resulting EPGs. The AmpFESTR[®] NGM[™] PCR Amplification Kit (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA) has been proven to be suitable for highly degraded and inhibited samples in different studies [11]. The AmpFESTR[®] NGM[™] PCR Amplification Kit (NGM[™]) (Applied Biosystems, Foster City, CA, USA) for ancient DNA typing was used in the present study to verify the suitability of this new-generation forensic kit for problematic samples, including those with degraded DNA or PCR inhibitors. Validation studies performed with the NGM suggested that it had a superior performance for challenging forensic samples [62]. We used autosomal STR typing to monitor the possible contamination of the extracted ancient DNA with contemporary DNA. The resulting DNA profiles of the amplified ancient extract did not show any signs of contamination. The NGM[™] kit performed well, even in the presence of soil-borne inhibitors detected by the quantitative RT-PCR approach. Amplification problems for the ancient extracts were encountered at the D2S1338, D18S51, FGA and D1S1656 loci. The most probable explanation might be the relatively long amplicons, but D12S391 typing was successful for all of the tested extracts, and the locus outperformed the D1S1656, which had shorter amplicons. The resulting EPG quality can be greatly improved by the post-PCR cleaning, which not only increases RFUs but also removes some dye-blobs that can mask real peaks. We concluded that the NGM[™] kit may be a suitable tool not only for authenticating ancient samples and detecting contamination by modern DNA but also for studying familial relationships between excavated skeletons [11].

Currently available forensic kits for degraded DNA (miniSTRs) do not cover the Y-chromosome STR loci; thus, we used two laboratory-developed Y-chromosome mini-STR systems [11] that allow DNA typing on highly degraded DNA samples [63]. Although none of the samples were successfully typed in all 26 loci, we obtained a Y-chromosome haplotype with 14 STR markers. The obtained

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

haplotype was suitable for both the haplogroup determination and the database searches. A direct comparison of the results obtained from the skeletal remains to the denizens of Hradek nad Nisou did not reveal any matches that indicated a relationship to the same parental or maternal lineage. The city of Hradek nad Nisou has approximately 7,500 citizens, and the number of tested denizens comprised approximately 1/1,000 of the city population.

The Y-chromosome haplogroup was estimated using a predictor software tool [19]. Because the haplogroup data that were analyzed in the manuscript were translated from the Y-STR haplotype information, there is a possibility that the prediction software resulted in an incorrect haplogroup assignment [64].

Analysis of the dental cement microstructure and the ratio of carbon and nitrogen isotopes

Based on the analysis of the tooth cement accretion, we may assume that the man died in the spring (April to May). Indeed, the last accretion was dark, and the (light) summer accretion had not begun to form. As indicated in the table, this man ate all forms of cereal except millet. In addition, he ate fruit (e.g., apples and pears) [39-41] and animals that lived on C3 foods (i.e., a greater extent of the man's meat and milk intake came from sheep and goats compared with cattle) [65] (Figure 15). Based on the isotopic ratios of C to N, the man was not nourished by meat or products of omnivores, such as the domestic pig, which has different isotopic ratios of the above-mentioned elements. Because the man had a variety of foods in his diet, we hypothesized that he had a reasonably higher social status. We also hypothesized that the man lived in a typically agricultural landscape (fields with meadows and woodland islands) [66].

Multielemental analysis and mapping

LA-ICP-MS utilizes a laser beam for sampling, and material is

disengaged during the laser pulse-sample surface interaction. An ablation crater is created on the sample's surface, and the size of the crater depends, for instance, on the matrix, the energy and the wavelength of the laser beam (The ablated mass containing atoms and ions and is led to the next ionization source, such as inductively coupled plasma). Ions are then separated in an analyzer according to their m/z ratios. The advantage of the LA-ICP-MS technique is that it requires little or no sample preparation. In addition, LA-ICP-MS analysis allows both qualitative and quantitative analysis [69]. Importantly, elemental mapping is performed with solid samples. LA-ICP-MS is used in several fields, including geology [68], archaeology [69,70] and biology [71].

The main component of teeth is hydroxyapatite $\text{Ca}_{10}(\text{OH})_2(\text{PO}_4)_6$, and calcium and phosphorus are matrix elements. The distribution of these elements is homogeneous. In the tooth excavated at Hradek nad Nisou, the calcium content rapidly decrease in the surrounding area of the root channel (Figure 15); however, the original calcium content probably differed from the current value because diagenesis likely affected the root. Similar results were observed in the cementum.

Based on the Sr and Zn contents, we hypothesized that the man consumed both plants and meat. The results of LA-ICP-MS confirmed the outcomes of the geochemical data. The Sr/Ca, Sr/Ba and Sr/Zn ratios were used to estimate the mobility and the diet (Figure 15), and the distribution maps of the ratios were normalized to the calcium signal to minimize the laser beam energy fluctuation. The damaged part of the sample surface was not usable for reconstruction. Near the root channel, variation in Sr/Ca ratio can be caused by changes in the diet. In addition, fluctuations in the ratios showed small intensity changes that corresponded to the unaffected part of the tooth.

Figure 16 explains the Comparison data (Great Britain, Denmark and Vedrovice compared with Danish Mesolithic hunters and historical Eskimos) were obtained from several previous studies [42-44,78,79].

Age estimation

Evaluating the age at which a person died is one of the basic tasks of examining skeletal material. In the remains of unknown persons, it is not possible to determine the time elapsed from birth or the chronological age; however, the so-called biological age may be estimated. We determined the biological age of the present remains by comparing the sample with remains of a known age, which represents a generalization of the variability of an organism's wear at a certain stage of life (age).

Generally, the biological age at the time of death is estimated using methods based on degenerative changes. The most commonly used method includes changes in the vertebral column, changes in the wear of articular surfaces and structural changes (e.g., changes in the spongiosa structure in the heads of long bones, which has been described by Szilvássy and Kritscher [30-32]). The method of changes in the spongiosa structure in the heads of long bones is quite applicable, although Gehring et al. [72] claimed that an age estimation by the method of Szilvássy and Kritscher [30] should only serve as a rough estimation because lower age estimates occur for individuals over 50 years of age. Forensic cases in which we could re-verify the age following the positive identification of unknown skeletal remains show that the method by Szilvássy and Kritscher [30] is applicable.

Age estimates based on indicators acquired from an examination of the teeth (e.g., counting the layers in the cement [73] or evaluating the prominences on the thin sections) are considered to be the best

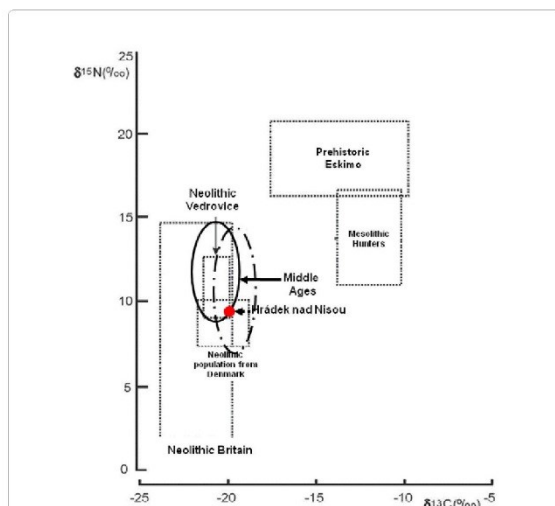


Figure 16: The ratios of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopes in various Neolithic populations. Comparison data (Great Britain, Denmark and Vedrovice compared with Danish Mesolithic hunters and historical Eskimos) were obtained from several previous studies [42-44,51,52].

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

Analysis	Results	Vampire hypothesis	Jewish hypothesis
Burial pattern	Face down position	Moderate support	No support
Burial pattern	4 silver coins in right fist	Moderate support	Moderate support
Sex	Male	No support	No support
Normal amplification of STR loci	Yes	No support	No support
Predicted Y-chromosome haplogroup	E1b1b	No support	Moderate support
Predicted mtDNA haplogroup	H	No support	No support
Predicted age	45-55 years	No support	No support
Direct YHRD database match	No	No support	No support
Direct YSEARCH database match	No	No support	No support
Similarity to V13 modal Y-chromosome haplotype	YES	No support	Moderate support
Match of the Y-chromosome/mtDNA results with denizens	NO	No support	No support
Isotope analysis	No pork meat diet	No support	Moderate support

Table 6: Summary of the results.

methods for age determination. The method of tooth thin sections was first published in 1947 (internationally in 1950) by Gustafson [74,75], and this work later became the basis for other authors. Kilián et al. [31] further developed this method in the Czech Republic. In addition, Pilin and Štumankin [32] included trait significance, which Kilián did not consider. Although evaluation of tooth thin sections has a slightly subjective component, it is simple, well described and relatively quick. Although age can be estimated using multi-rooted teeth [76,77], single-rooted teeth are usually preferred because it is much easier to produce thin sections from single-rooted teeth.

3D modeling

The calvarium and the mandible were scanned using a spiral CT scanner to generate a three-dimensional model of the skull before the destruction of three teeth and the inner surface of the mandibula for chemical and histological analysis. The model can be archived (if the original is destroyed) and/or transferred to physical reality using either the stereolithographic or FDM copies produced with a 3D printer.

Facial reconstruction

The facial reconstruction was based on a physical “cast” of a virtual model of the skull after replacing the separated and deformed bone fragments. This approach protected the fragile original skull from damage under the weight of plasticine and allowed the original skull (as well as virtual model) to be used as a reference when most of the facial parts of the plastic model were covered with modeling clay. Another advantage of using a plastic skull “replica” for modeling the facial reconstruction is that the original skull can provide information about the features that may have been lost during the CT scans, the design of the 3D geometric model and the prototyping (e.g., the delicate surface structure of muscle insertion points).

The created facial reconstruction can be scanned with a 3D laser or optical scanner to produce a virtual model of the face. Surface details, including fat content age-related changes, skin color, eye color, hairstyle and facial hair, can be added and modified using 3D graphic software. Researchers can also make a cast of the finished facial reconstruction

in plaster, plastic or wax and use it as an exhibit that can be touched.

Because of contemporaneous limitations, the facial reconstruction method can never produce a precise portrait of a person. Even if an approximated face bears a particular amount of individuality (there is a uniquely shaped skull under it), it generally only represents a type of face that the person might have had. Nevertheless, facial reconstruction is a useful aid that allows us to look at the face of a man who lived 700 years ago.

Conclusion

Table 6 summarizes the results of the multidisciplinary analysis of the skeletal remains.

The use of a multidisciplinary approach allowed us to perform the Y-chromosome and mtDNA analysis of the 14th century skeletal remains, estimate the age of the individual, reconstruct the skull and prepare a 3D model to perform the quantitative and qualitative mass spectrometry element analyses. Based on the analysis of the tooth cement accretion, the man died in the spring (April to May). The man’s diet was mixed and consisted of a large proportion of C3 plants (e.g., fruits and vegetables) and animals that fed on C3 plants (the man consumed more meat and milk from sheep and goats compared with cattle). The ratio of carbon and nitrogen isotopes also showed that this man lived in a typically agricultural landscape with fields, meadows and woodland islands.

The present study concluded that the “vampire” hypothesis can be rejected because we did not find any significant data (nonhuman mtDNA, Y-chromosome haplotype or STR profile) that would strongly support this hypothesis. The “Jewish” hypothesis is moderately supported by both the Y-chromosome and the element analyses. The procedure that was described for examining skeletal remains of unknown individuals can serve as an example of the available scientific approaches that can be applied to other archaeological, anthropological, or forensic studies.

Acknowledgment

We would like to acknowledge the technical help of Dr. Jana Velemínska from the 3D laboratory, Department of Anthropology and Human Genetics, Faculty of Science, Charles University, Prague, Czech Republic. In addition, we would like to acknowledge MUDr. Ladislav Endrych from the CT scan, Department of Radiodiagnostics, Liberec hospital, Czech Republic. We would also like to acknowledge the help of the excavation team, which consisted of Vaclav Kropacek, Mgr. Michaela Bradacova Mgr. Jiri Unger, and Anna Kellerova.

Funding

The research was primarily financed by the City of Hradec nad Nisou, Liberec Region, Brana Trojmezi, and the North Bohemian Museum Liberec.

The research was also partly supported by the projects “VZPMMK” (0002327201), Czech Science Foundation grant No. 14-36938G, Ministry of Culture of the Czech Republic grant (DKRVO 2014/18, National Museum, 00023272), and by the European Regional Development Fund project “CEITEC” (CZ.1.05/1.1.00/02.0068).

References

1. Vauchez A, Dobson RB, Lapidge M (2000) *Encyclopedia of the Middle Ages*. James Clarke and Co.
2. Edward J (1982) *The origins of France: From Clovis to the Capetians 500–1000*. London: Macmillan. p. 253.
3. Higuchi R, Bowman B, Freiburger M, Ryder OA, Wilson AC (1984) DNA-sequences from the quagga, an extinct member of the horse family. *Nature* 312: 282-284.

Citation: Vanek D, Brzobohata H, Silerova M, Horak Z, Nyvltova Fisakova, Vasinova Galiova M, et al. (2015) Complex Analysis of 700-Year-Old Skeletal Remains found in an Unusual Grave—Case Report. *Anthropol* 2: 138. doi: [10.4172/2332-0915.1000138](https://doi.org/10.4172/2332-0915.1000138)

4. Pääbo S (1985) Molecular cloning of ancient Egyptian mummy DNA. *Nature* 314: 644-645.
5. Saiki RK, Scharf S, Faloona F, Mullis KB, Horn GT, et al. (1985) Enzymatic amplification of beta-globin genomic sequences and restriction site analysis for diagnosis of sickle-cell anemia. *Science* 230: 1350-1354.
6. Mullis KB, Faloona FA (1987) Specific synthesis of DNA in-vitro via a polymerase-catalyzed chain reaction. *Methods Enzymol* 155: 335-350.
7. Just RS, Loreille OM, Molto E, Merriwether DA, Woodward SR, et al. (2011) Titanic's unknown child: The critical role of the mitochondrial DNA coding region in a re-identification effort. *Forensic Sci Int Genet* 5: 231-235.
8. Gill P, Ivanov PL, Kimpton C, Piercy R, Benson N, et al. (1994) Identification of the remains of the Romanov family by DNA analysis. *Nat Genet* 6: 130-136.
9. Ivanov PL, Wadhams MJ, Roby RK, Holland MM, Weedn VW, et al. (1996) Mitochondrial DNA sequence heteroplasmy in the Grand Duke of Russia Georgij Romanov establishes the authenticity of the remains of Tsar Nicholas II. *Nat Genet* 12: 417-420.
10. Coble MD, Loreille OM, Wadhams MJ, Edson SM, Maynard K, et al. (2009) Mystery solved: The identification of the two missing Romanov children using DNA analysis. *PLoS One* 4: e4838.
11. Vanek D, Saskova L, Koch H (2009) Kinship and Y-chromosome analysis of the 7th century human remains. Novel DNA extraction and typing procedure for ancient material. *Croat Med J* 50: 286-295.
12. Galantucci LM, Percoco G, Angelelli G, Lopez C, Introna F, et al. (2006) Reverse engineering techniques applied to a human skull, for CAD 3D reconstruction and physical replication by rapid prototyping. *J Med Eng Technol* 30: 102-111.
13. Vika E (2011) Diachronic dietary reconstructions in ancient Thebes, Greece: Results from stable isotope analyses. *J Archaeol Sci* 38: 1157-1163.
14. Davoren J, Vanek D, Konjodzic R, Crews J, Huffine E, et al. (2007) Highly effective DNA extraction method for nuclear short tandem repeat testing of skeletal remains from mass graves. *Croat Med J* 48: 478-485.
15. Sanger F, Nicklen S, Coulson AR (1977) DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proc Natl Acad Sci USA* 74: 5463-5467.
16. Murray V (1989) Improved double-stranded DNA sequencing using the linear polymerase chain reaction. *Nucleic Acids Res* 17: 8889.
17. Taberlet P, Griffin S, Goossens B, Questiau S, Manceau V, et al. (1996) Reliable genotyping of samples with very low DNA quantities using PCR. *Nucleic Acids Res* 24: 3189-3194.
18. Gill P (2001) Application of low copy number DNA profiling. *Croat Med J* 42: 229-232.
19. Athey TW (2005) Haplogroup prediction from Y-STR values using an allele-frequency approach. *J Genet Geneal* 1: 1-7.
20. Biomedical Software and Services for Engineering on Anatomy (2011), Belgium.
21. Jiman R, Vavrik P, Horak Z (2009) Custom-designed 3D tibial augmentation for knee replacement. *Acta Chir Orthop Traumatol Cech* 76: 60-64.
22. Wilkinson CM (2004) *Forensic facial reconstruction*. Cambridge: University Press.
23. Rynn C, Wilkinson CM, Peters HL (2010) Prediction of nasal morphology from the skull. *Forensic Sci Med Pathol* 6: 20-34.
24. Stephan CN, Henneberg M (2003) Predicting mouth width from inter-canine width—a 75% rule. *J Forensic Sci* 48: 725-727.
25. Taylor KT (2001) *Forensic art and illustration*. CRC Press, New York
26. Neave RAH, Prag J (1997) *Making faces. Using forensic and archaeological evidence* British Museum Press, London.
27. Wilkinson CM, Mautner SA (2003) Measurement of eyeball protrusion and its application in facial reconstruction. *J Forensic Sci* 48: 12-16.
28. George RM (1987) The lateral craniographic method of facial reconstruction. *J Forensic Sci* 32: 1305-1330.
29. De Greef S, Claes P, Vandermeulen D, Mollemans W, Suetens P, et al. (2006) Large-scale in-vivo Caucasian facial soft tissue thickness database for craniofacial reconstruction. *Forensic Sci Int* 159: S126-S146.
30. Szilvassy, J, Kritscher H (1990) Bestimmung der individuellen Lebensalters beim Menschen mit Hilfe der Spongiosastruktur der Langknochen. *Ann Naturhist Mus Wien* 91: 145-154.
31. Kilián, J, Šídlo R, Merglová V (1981) K problematice určování stáří jedince podle chrupu. *Soudní lékařství* 26: 33-42.
32. Pilin A, Šturmankin J (1987) K odhadu věku neznámých mrtvol a kosterních náleží podle výbrusu zubů. *Československá kriminalistika* 20: 225-233.
33. Kuželka V (1999) *Osteometrie Anthropology. Handbook for the Study of the skeleton*. Prague: National Museum.
34. Ferembach D, Schwidetzky I, Stloukal M (1980) Recommendations for age and sex diagnosis of skeletons. *J Hum E* 9: 517-549.
35. Lovejoy CO (1985) Dental wear in the Libben population. Its functional pattern and role in the determination of adult skeletal age at death. *Am J Phys Anthropol* 68: 47-56.
36. Schmitt A (2005) Une nouvelle méthode pour estimer l'âge au décès des adultes à partir de la surface sacro-pelvienne iliaque. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 17: 1-13.
37. Bruzek J (2002) A method for visual determination of sex, using the human hip bone. *Am J Phys Anthropol* 117: 157-168.
38. Murail P, Bruzek J, Houët F, Cunha E (2005) DSP: A tool for probabilistic sex diagnosis using worldwide variability in hip bone measurements. *Bull Mém Soc Anthropol Paris* 17:167-76.
39. Abelova M. (2005) Analysis of microstructure of teeth cementum of bears (Ursidae) from cave, Za Hájovnou. *Geological Research in Moravia and Silesia*.
40. Debeljak I (1997) Ontogenic development of dentition in the cave bear. *Geologija* 39: 13-77.
41. Nyvltova Fisakova M (2007) Seasonality of Gravettian sites based on study of mammal's dental cement microstructures *Přehledy výzkumů* 48: 13-23.
42. Smrcka V (1995) *Trace elements in bone tissue*. Prague: Karolinum.
43. Richards MP, Fuller BT, Molleson TI (2006) Stable isotopes paleodietary study of humans and fauna from multi-period (Iron Age, Viking and Late Medieval) site of Newark Bay, Orkney. *J Archaeol Sci* 33: 122-131.
44. Richards MP, Montgomery J, Nehlich O, Grimes V (2008) Isotopic analysis of humans and animals from Vedrovice. *Anthropologie* 46: 185-194.
45. Stafford T, Brendel K, Duhamel RC (1988) Radiocarbon, ¹³C a ¹⁵N analysis of fossil bone: Removal of humates with XAD -2 resin. *Geochim Cosmochim Acta* 52: 2257-2267.
46. Cruciani F, La Fratta R, Santolamazza P, Sellitto D, Pascone R, et al. (2004) Phylogeographic analysis of haplogroup E3b (E-M215) Y chromosomes reveals multiple migratory events within and out of Africa. *Am J Hum Genet* 74: 1014-1022.
47. Willuweit S, Roewer L (2007) Y chromosome haplotype reference database (YHRD): Update. *Forensic Sci Int Genet* 1: 83-87.
48. Anderson S, Bankier AT, Barrell BG, de Bruijn MH, Coulson AR, et al. (1981) Sequence and organization of the human mitochondrial genome. *Nature* 290: 457-465.
49. Andrews RM, Kubacka I, Chinnery PF, Lightowlers RN, Turnbull DM, et al. (1999) Reanalysis and revision of the Cambridge reference sequence for human mitochondrial DNA. *Nat Genet* 23: 147.
50. Achilli A, Rengo Ch, Magri Ch, Battaglia V, Olivieri A, et al. (2004) The molecular dissection of mtDNA haplogroup H confirms that the Franco-Cantabrian glacial refuge was a major source for the European gene pool. *Am J Hum Genet* 75: 910-918.
51. Sugg R (2011) Prescientific death rites, vampires, and the human soul. *Lancet* 377: 712-713.
52. Fomicola V, Pontrandolfi A, Svoboda J (2001) The Upper Paleolithic triple burial of Dolni Vestonice: Pathology and funerary behavior. *Am J Phys Anthropol* 115: 372-379.