

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Antropologie a genetika člověka



**Bc. Martin Štětka**

Odhad hmotnosti těla z kostry: vliv složení těla  
Estimating body mass from the skeleton: influence of body composition

Diplomová práce

Vedoucí práce: Mgr. Martin Hora, Ph.D.

Praha, 2025

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval mému vedoucímu, panu doktorovi Martinovi Horovi, za veškerou pomoc, rady, komentáře, ochotu, vstřícnost, ale i trpělivost při sepisování této diplomové práce.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovával samostatně a že jsem uvedl veškeré použité zdroje informací a literaturu.

V Praze dne:

.....

Bc. Martin Štětka

## **Abstrakt:**

Metody mechanické i morfometrické poskytují relativně spolehlivé odhady hmotnosti těla z kostry, přičemž se obvykle chyba odhadu pohybuje do několika procent skutečné hodnoty hmotnosti. Chyba odhadu hmotnosti těla z kostry však narůstá u jedinců s podváhou či naopak nadváhou nebo obezitou. Zdá se tedy, že je spolehlivost odhadu ovlivněna složením těla, především pak podílem tuku v těle. Vzhledem k tomu, že se tělesné složení mění i v průběhu života, mohla by být spolehlivost odhadu ovlivněna také věkem a představovat tak problém pro odhad hmotnosti těla z kostry jak pro populace minulé, tak i současné. Cílem této práce je tedy otestovat dříve publikované rovnice odhadu hmotnosti těla z kostry a porovnat, jak jsou jednotlivé rovnice ovlivněny složením těla a věkem. Náš testovaný soubor ( $n = 1276$ ) byl tvořen účastníky projektu 4HAIE z České republiky, který zahrnoval dospělé aktivní běžce a neaktivní kontroly ve věku od 18 do 65 let, s indexem tělesné hmotnosti (BMI) v rozmezí od  $15,97 \text{ kg/m}^2$  do  $49,23 \text{ kg/m}^2$ . Údaje o tělesném složení byly získány pomocí duální rentgenové absorpciometrie (DEXA). Z DEXA snímků byly naměřeny jednotlivé kosterní rozměry (průměr hlavice stehenní kosti a bi-cristální šíře) použité v rovnicích pro odhad hmotnosti těla z kostry. Soubor byl rozdělen na aktivní a neaktivní skupinu a dle pohlaví. Výsledky naznačují, že množství tukové tkáně skutečně ovlivňuje chybu odhadu hmotnosti těla z kostry. Chyba odhadu hmotnosti těla z kostry negativně koreluje s procentuálním zastoupením tuku v těle, což vede k nadhodnocování tělesné hmotnosti u jedinců s podváhou, a naopak podhodnocování jedinců s nadváhou či obezitou. Tělesná hmotnost byla nejspolehlivěji odhadována u jedinců mladých a s přibývajícím věkem se chyba odhadu zvyšovala až do padesáti let. U aktivní skupiny mužů i žen byl zaznamenán spolehlivější odhad hmotnosti těla z kostry než u jedinců ze skupin neaktivních. Nejspolehlivější odhady hmotnosti těla z kostry byly zaznamenány u jedinců v normálním rozmezí BMI ( $18,5\text{--}25 \text{ kg/m}^2$ ). Morfometrické rovnice odhadovaly hmotnost těla spolehlivěji než rovnice mechanické.

**Klíčová slova:** tělesná hmotnost, tuk, mechanické metody, morfometrické metody, duální rentgenová absorpciometrie (DEXA)

**Abstract:**

Mechanical and morphometric methods provide relatively reliable estimates of body mass from the skeleton with an estimation error usually within a few percent of the true body mass. However, the error in estimating body mass from the skeleton increases in individuals who are underweight or, conversely, overweight or obese. Thus, the reliability of the estimation appears to be influenced by body composition, particularly the fat mass. Given that body composition also changes over the life course, the reliability of the estimate could be also affected by age, posing a problem for estimating body mass from the skeleton for both past and present populations. The aim of this thesis is therefore to test various previously published equations for estimating body mass from skeleton and compare how each equation is affected by body composition and age. Our sample ( $n = 1276$ ) consisted of 4HAIE participants from Czech Republic, comprising adult active runners and inactive controls aged between 18 and 65 years, with body mass index (BMI) ranging from  $15.97 \text{ kg/m}^2$  to  $49.53 \text{ kg/m}^2$ . Body composition data were obtained using dual energy X-ray absorptiometry (DEXA). Skeletal dimensions (femoral head diameter and bi-crystal breadth) used in the equations to estimate body mass from the skeleton were measured from the DEXA images. The sample was divided into active and inactive groups and by sex. The results suggest that the amount of adipose tissue does indeed influence the error in estimating body mass from the skeleton. The error of body mass estimation from the skeleton is negatively correlated with the percentage of body fat, leading to overestimation of body mass in underweight individuals, and conversely underestimation in overweight or obese individuals. Body mass was most reliably estimated in young individuals and the estimation error increased with increasing age up to 50 years. The active group of men and women had more reliable estimates of body mass from the skeleton than the inactive group. The most reliable estimates of body mass from the skeleton were recorded for individuals in the normal BMI range ( $18.5\text{-}25 \text{ kg/m}^2$ ). Morphometric equations estimated body mass more reliably than mechanical equations.

**Keywords:** body mass, fat mass, mechanical methods, morphometric methods, dual X-ray absorptiometry (DEXA)

# Obsah

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| 1. Úvod.....                                       | 1  |
| 1.1. Metody odhadu hmotnosti těla z kostry .....   | 2  |
| 1.2. Referenční soubor .....                       | 14 |
| 1.3. Složení těla .....                            | 15 |
| 1.4. Duální rentgenová absorpciometrie (DEXA)..... | 25 |
| 1.5. Změny ve složení těla v průběhu života.....   | 27 |
| 1.6. Analýza a omezení dosavadních poznatků.....   | 30 |
| 2. Cíl práce .....                                 | 34 |
| 3. Materiál a metody .....                         | 35 |
| 3.1. Soubor .....                                  | 35 |
| 3.2. Antropometrie a složení těla .....            | 37 |
| 3.3. Měření kosterních rozměrů .....               | 37 |
| 3.4. Odhad hmotnosti těla z kostry.....            | 39 |
| 3.5. Provedené analýzy.....                        | 40 |
| 4. Výsledky .....                                  | 43 |
| 5. Diskuse.....                                    | 60 |
| 6. Závěr .....                                     | 71 |
| 7. Zdroje .....                                    | 72 |
| 7.1. Zdroje literatury.....                        | 72 |
| 7.2. Internetové zdroje.....                       | 90 |

## 1. Úvod

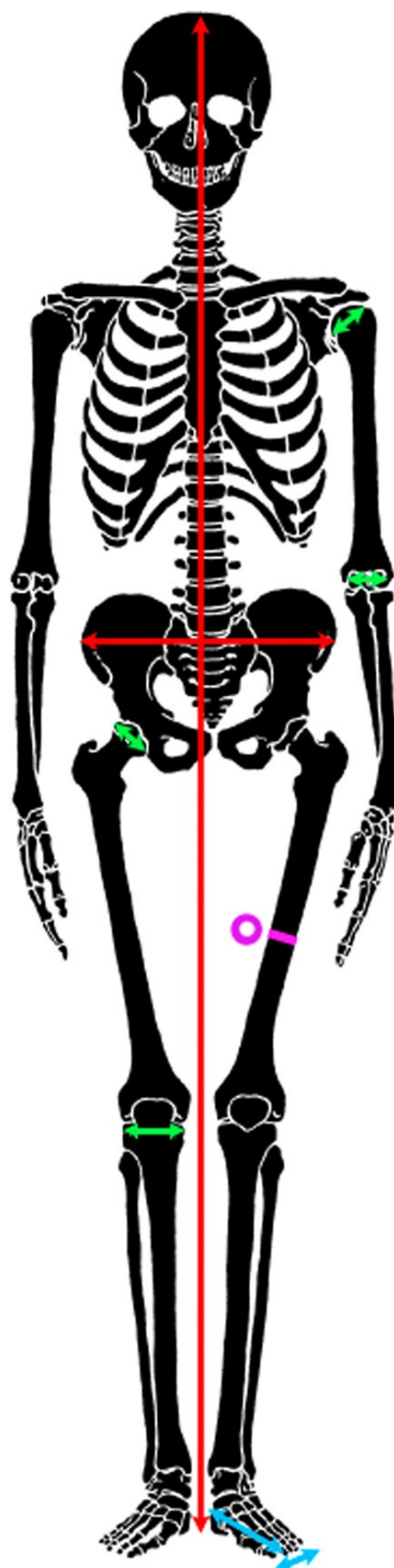
Spolehlivý odhad velikosti těla je důležitým cílem v mnohých paleoantropologických, forenzních i bioarcheologických studiích (Grabowski et al., 2015, 2018; Jungers, 1985; McHenry, 1976, 1992; Rosenberg et al., 2006; Ruff, 1998; Will et al., 2017, 2021; Will & Stock, 2015). Velikost těla (reprezentovaná často tělesnou hmotností) přímo ovlivňuje, jak jedinec interaguje se svým okolím (Calder, 1984; Grabowski et al., 2015). Hmotnost těla odráží mnohé, možná na první pohled i méně zřejmé aspekty jako je například termoregulace (Holliday & Ruff, 1997; Ruff et al., 1997; Steudel-Numbers, 2006; Wheeler, 1993). V rámci termoregulace lze hovořit o optimalizaci poměru tělesného povrchu či objemu ke klimatickým podmínkám, což napomáhá regulovat tepelnou výměnu mezi jedincem a prostředím (Ruff, 1994). Velikost těla je také úzce spjata s množstvím pohybu (Calder, 1984). Pohyb lze vyjádřit například jako denně překonanou vzdálenost či čas strávený pohybem, případně velikostí domovského okrsku (*home range*) (Antón & Swisher, 2004; Brown & Orians, 1970; Tucker et al., 2014). Kromě pohybu se však velikost těla používá i pro adjustaci relativní velikosti mozku (nebo encefalizace) (McHenry, 1994; Ruff et al., 1997; Ruff & Wood, 2023). Souvislost velikosti těla nacházíme také s energetickými požadavky jedince, množstvím a typem konzumované potravy či strategiemi obstarávání potravy (Grabowski et al., 2015; Tucker et al., 2014; White et al., 2022). V neposlední řadě odráží velikost těla taktéž životní cyklus (*life history*) (Robson & Wood, 2008; Sibly & Brown, 2007), sociální interakce mezi jednotlivci stejného druhu a na úrovni populací taktéž délku života či rychlost reprodukce (Calder, 1984; Damuth & MacFadden, 2005; Grabowski et al., 2015; Jungers, 1985; Ruff & Wood, 2023; White et al., 2022). Hmotnost jedince má tedy implikace pro fyziologii i ekologii (Calder, 1984; Damuth & MacFadden, 2005; Grabowski et al., 2015; Squyres & Ruff, 2015). Změny související s velikostí těla (hmotnost i výška postavy) v lidském vývoji nám proto poskytují důležité informace o změně životních podmínek a důsledcích těchto změn na náš vývoj (Pomeroy et al., 2019; Ruff, 2002; Will et al., 2017). Z těchto výše zmíněných důvodů je obecně nezbytné k pochopení biologie druhů, a to včetně ostatních homininů, provádět co nejspolehlivější odhady hmotnosti těla.

Mimo paleoantropologických studií, zabývajících se primárně populacemi minulými, jsou publikovány taktéž práce, které si kladou za cíl využít odhad hmotnosti těla z kostry pro forenzní účely na populacích současných (Duyar et al., 2006; Chevalier et al., 2016, 2018; İşcan, 2005; Lacoste Jeanson et al., 2017; Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013; Moore & Schaefer, 2011; Rani et al., 2021; Ruff et al., 2024; Schaffer, 2016; Schaffer & Dunn, 2018).

Někteří autoři však uvádí, že aplikace těchto metod pro forenzní účely je však v současné době velmi omezená či v mnohých případech zcela nemožná a to především z důvodu nízké spolehlivosti při aplikaci na některé jedince s podváhou nebo naopak nadváhou či obezitou (Byard, 2012; Chevalier et al., 2016; Lacoste Jeanson et al., 2017; Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013). Naznačují tak, že by roli v odhadu hmotnosti těla z kostry mohlo hrát složení těla jedince. Jelikož však špatná interpretace odhadu hmotnosti může pro forenzní účely přinášet mnohé právní důsledky, je v současné době četnost využití těchto metod pro odhad hmotnosti v praxi prakticky mizivá (Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013). Protože nelze hmotnost těla na kosterních pozůstatcích měřit přímo, je nutné provádět její odhad. Jakými způsoby lze tedy hmotnost na kostře odhadovat?

### 1.1. Metody odhadu hmotnosti těla z kostry

Metody pro odhad tělesné hmotnosti z kostry lze rozdělit do dvou hlavních skupin na metody morfometrické a mechanické (Aiello & Wood, 1994; Auerbach & Ruff, 2004, 2004; Grine et al., 1995; McHenry, 1992; Ruff et al., 1991, 1997, 2005). První zmíněnou skupinou jsou metody morfometrické, ve kterých je tělesná hmotnost rekonstruována z dostupného materiálu vícero skeletálních struktur a hmotnost těla je odhadována na základě přímé rekonstrukce velikosti a tvaru těla (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff, 2002; Ruff et al., 2012, 2024; Ruff & Wood, 2023). Druhou skupinou jsou metody mechanické, které, jak již název napovídá, souvisejí s mechanickými vlastnostmi jednotlivých kostí. Při využití mechanických metod je využito morfologických změn jednotlivých skeletálních struktur v reakci na zatížení a tedy jednotlivých kosterních rozměrů funkční spjatých s podporou tělesné hmotnosti (Auerbach & Ruff, 2004; Grabowski et al., 2015; Grine et al., 1995; Ruff et al., 1991, 2018; Ruff & Wood, 2023). Rozměry využívané k odhadu hmotnosti těla z kostry v jednotlivých skupinách metod jsou zobrazeny na Obrázku 1.



**Obrázek 1.** Moderní lidská kostra zobrazující rozměry pro odhad tělesné hmotnosti. Červené šipky: výška postavy a bi-cristální šíře. Zelené šipky: kloubní šířky dlouhých kostí včetně superioinferiorního průměru hlavice stehenní kosti, proximální mediolaterální šíře tibie, superioinferiorní šířky hlavice humeru a distální mediolaterální artikulární šíře humeru. Fialová: průřez tělem kosti stehenní (CSG). Modrá: maximální délka chodidla a šíře přední části chodidla. Převzato z Ruff & Wood (2023).

První skupinou jsou morfometrické metody, které jsou založeny na rekonstrukci velikosti jednotlivých struktur a tvaru těla jedince (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff, 1994; Ruff et al., 1997, 2005). Velikost těla je rekonstruována přímo ze zachovalých částí skeletu (Ruff et al., 2012).

Při odhadu tělesné hmotnosti pomocí morfometrických metod jsou využívány matematické rovnice, které jsou často pohlavně specifické (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 1997). Morfometrická metoda odhadu tělesné hmotnosti je tvořena hodnotami šíře pánve, měřenou jako bi-cristální šíře (*bi-iliac breadth*), (Ruff, 1994; Ruff & Wood, 2023) a výšky postavy (*stature*) (Fully, 1956; Raxter et al., 2006; Ruff, 1994). Společně pak tyto hodnoty tvoří *stature/biiliac breadth method*, *STBIB* (Obrázek 1) (Ruff et al., 1997, 2012, 2024; Ruff & Wood, 2023). Morfometrická metoda STBIB se osvědčila právě z důvodu absence závislosti na mechanickém vztahu zátěže mezi kostí a hmotou s ní spojenou (Ruff et al., 1997, 2012). Nespornou výhodou je i její velmi jednoduchá reprodukovatelnost (použitelnost) u živých jedinců a kosterních pozůstatků (s korekcí na měkké tkáně) (Ruff, 2000; Ruff et al., 2024). Metoda má však i svá úskalí, přičemž tím nejkritičtějším je při rekonstrukci na kosterních pozůstatcích nutnost zachování vícero skeletálních struktur, především pak kompletní pánve (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 2012).

Morfometrická metoda poměru šíře pánve a výšky postavy (STBIB) se sestává ze dvou částí. Jako první je třeba odhadnout výšku postavy. Odhadnout výšku postavy lze pomocí anatomické či matematické metody (Fully, 1956; Lundy, 1985; Raxter et al., 2006; Ruff et al., 2012). Pokud bychom využili k výpočtu výšky postavy metodu anatomickou, využili bychom sčítací rovnici Fullyho (1956) pro skeletální výšku, která zní takto:

$$\begin{aligned} \text{Skeletální výška postavy} = & \text{délka } basionbregma + \\ & \text{výška páteře (obratle C2 až S1) +} \\ & \text{délka dolní končetiny (kost stehenní, holenní, hlezenní a patní)} \end{aligned} \quad (1)$$

Skeletální výšku je však nutné převést na výšku za života (*living height*) pomocí korekce na měkké tkáně (Fully, 1956). Jelikož však korekční faktory, které byly v práci použity, byly příliš malé, byla Fullyho metoda v roce 2006 upravena a detailněji popsána v publikaci Raxter et al. (2006). Zde byly vytvořeny nové predikční rovnice s odlišnými korekcemi, které by detailněji odpovídaly převodu z kosterních rozměrů (kosterní výšky) za pomoci korekcí měkkých tkání na živé jedince (Lundy, 1985; Raxter et al., 2006). Po úpravě a vytvoření rovnic lze dle publikace Raxter et al. (2006) výšku za života vypočítat pomocí rovnice:

$$\text{Výška za života} = 1,009 \times \text{skeletální výška (cm)} - 0,0426 \times \text{věk (roky)} + 12,1 \quad (2)$$

Rovnice pro odhad výšky postavy za života dosahovala 95 % spolehlivosti s odchylkou 4,5 centimetrů od skutečné výšky postavy (Raxter et al., 2006). Výhodou anatomické metody je, že na rozdíl od matematické metody zohledňuje rozdíly mezi jedinci v rozměrech různých částí těla jako je například výška jednotlivých obratlů či částí dolních končetin (Lundy, 1985). Úskalím celé anatomické metody je však její komplexnost, protože je pro rekonstrukci výšky postavy vyžadováno velké množství kosterních struktur, celkem pak 28 rozměrů (Ruff et al., 2012). Zachování všech 28 rozměrů je vzácný jev (Ruff et al., 2012), z tohoto důvodu je nutné dopočítat chybějící části do celkového součtu pro výpočet výšky postavy (Auerbach, 2011). Právě to je největší limitací anatomické metody, kdy se se zvyšujícím počtem chybějících částí zvyšuje nutnost dopočítávat chybějících elementy, přičemž některé elementy není možné dopočítat vůbec (Auerbach, 2011). Dopčítat lze pouze páteř, a to za předpokladu, že jsou dostupné bederní obratle a dále pak výšku kosti patní a hlezenní (Auerbach, 2011). Ostatní části v anatomické metodě dopočítat nelze (Auerbach, 2011).

Anatomická metoda odhadu výšky postavy je tedy v mnoha případech nahrazována matematickými regresními rovnicemi dlouhých kostí, právě kvůli své absenci závislosti na vícero skeletálních strukturách (Lundy, 1985; Pearson, 1899; Ruff et al., 2012) či při nutnosti rychlejšího vyšetřování trestných činů (Duyar et al., 2006). Matematické metody jsou založené na aplikaci regresních rovnic, které využívají korelace jednotlivých kostí s výškou postavy (Lundy, 1985; Pearson, 1899; Raxter et al., 2006). Nevýhodou je ale závislost na dostupném referenčním souboru, respektive jak blízký je konkrétní soubor cílovému jedinci (Holliday & Ruff, 1997; Ruff et al., 2012). Proto je nevhodné využívat tyto populačně specifické rovnice na populacích odlišných než na kterých byly postaveny, a to z důvodu odlišných proporcí těla v různých populacích, což poznamenal již Pearson (1899). Výběr konkrétní regresní rovnice musí být tedy co nejbližší biologickému profilu zkoumaného jedince, aby odpovídala charakteristikám dané populace (De Mendonça, 2000).

Mezi jednu z nejvyužívanějších a nejspolehlivějších matematických metod patří metoda odhadu výšky postavy z dlouhých kostí dolních končetin, kdy je vytvořena rovnice specifická pro danou populaci, a to i v časovém horizontu (Auerbach, 2011; Duyar et al., 2006; Formicola, 1993; Ruff et al., 2012; Sjøvold, 1990; Trotter & Gleser, 1952, 1958; Vercellotti et al., 2009). Nejčastěji jde o kost stehenní nebo kost holenní, u kterých byla prokázána nejvyšší korelace s výškou postavy (Lundy, 1985). V minulosti bylo publikováno několik odlišných

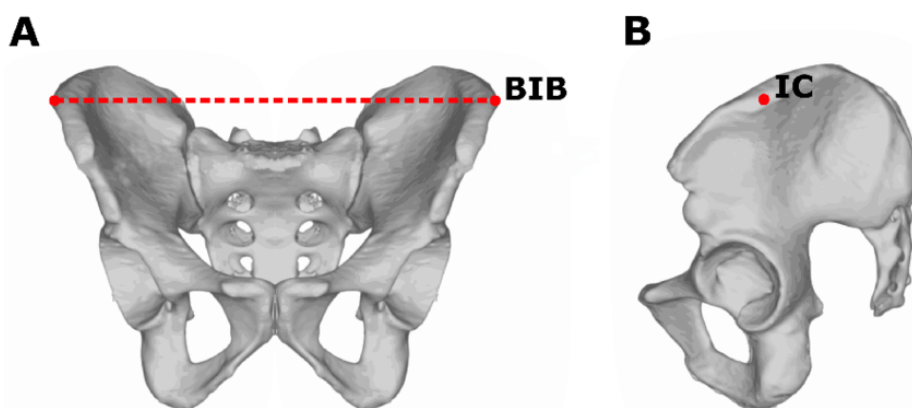
matematických regresních rovnic pro odhad výšky postavy. Mezi jednu z nejznámějších rovnic pro odhad výšky postavy z délky stehenní kosti patří rovnice z publikací Trotter & Glesser (1952), která zní takto:

$$\text{Výška postavy} = 2,38 \times \text{délka stehenní kosti (cm)} + 61,41, \quad (3)$$

kde je nutné odečíst 0,06 cm za každý rok života po třicátém roku života. Při výpočtu je také třeba brát v potaz rozdíl mezi kadaverózní a živou výškou. V případě odhadu výšky postavy matematickou metodou je třeba odečíst od výsledku této rovnice ještě 2,5 cm kvůli korekci na měkké tkáně, abychom zjistili výšku za života (Trotter & Gleser, 1952).

Další rovnice pro odhad výšky postavy byly publikovány pro odlišné populace (Auerbach & Ruff, 2010), v to závislosti na využití v paleoantropologickém (Feldesman et al., 1990; Formicola, 1993; Vercellotti et al., 2009) či forenzním kontextu (De Mendonça, 2000; Duyar et al., 2006). U všech výsledků odhadu výšky postavy je nutné provést korekturu na živé jedince (provést korekci na měkké tkáně) a vzít v potaz také věk jedince (Auerbach, 2011; Fully, 1956; Raxter et al., 2006; Ruff et al., 2012). Při srovnání anatomické a matematické metody bylo ale konstatováno, že anatomická metoda poskytuje spolehlivější odhady výšky postavy i při dopočítávání několika částí těla oproti metodám matematickým, a je tedy preferovanou variantou, pokud ji lze použít (Auerbach, 2011; Raxter et al., 2006).

Jako druhou součást morfometrické metody je třeba změřit šíři pánve (bi-cristální šíři) (Ruff et al., 1997; Ruff & Wood, 2023) (Obrázek 2.A), která se měří jako přímá vzdálenost obou bodů vnějších okrajů *crista iliaca* (Obrázek 2.B) (Novak et al., 2020; Stloukal, 1999).



**Obrázek 2.** Bi-cristální rozměr pánve. (A): Anteriorní pohled na pánev. Červeně: BIB – *Bi-iliac breadth*. Bi-cristální šíře. Navzájem nejvzdálenější body na *crista iliaca* (IC). (B): Laterální pohled (zleva) na pánev. Převzato a upraveno z Novak et al. 2020.

Společně pak z obou rozměrů výšky postavy a bi-cristální šíře pánve dostáváme po dosazení do predikčních rovnic morfometrických metod (STBIB) výsledné hodnoty odhadu hmotnosti těla z kostry (Ruff, 1994; Ruff et al., 1997, 2005, 2024).

Morfometrické metody poskytují velmi slibné výsledky pro odhad hmotnosti těla z kostry, jelikož se velikost a tvar těla odhaduje přímo ze zachovaných částí skeletu, a nikoliv z funkčních vztahů, jak je tomu u metod mechanických (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 2024; Ruff & Wood, 2023). Skeletální struktury však často nejsou zachovalé, a proto je uplatnění morfometrických metod limitované. Ačkoliv tedy poskytují relativně spolehlivé výsledky, je často využíván přístup mechanických metod, které poskytují v praxi mnohem širší uplatnění při odhadu hmotnosti těla z kostry (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 2012).

Metody mechanické jsou založeny na mechanické opoře zátěže, tj. pozorování rozměrů pohybového aparátu v reakci na změnu tělesné hmotnosti (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 1991, 2012; Ruff & Wood, 2023). Kost reaguje na zátěž změnami dle Wolffova zákona (Ruff et al., 2006; Wolff, 1986), mimo jiné i zvětšením svého objemu (mohutněním) (Beck, 2003; Maïmoun & Sultan, 2011; Tan et al., 2014). Je tedy vhodné využít nejlépe ty kosti, které nejvěrněji odráží změnu rozměrů a mají tak největší dopad na finální změnu tělesné hmotnosti (Auerbach & Ruff, 2004). Nabízí se proto zaměřit se primárně na kosti, které jsou nuceny nést hmotnost co největší část těla. Jedná se především o kosti dolní končetiny – stehenní kost a kosti bérce (Grine et al., 1995; Churchill et al., 2012; McHenry, 1992). Výzkum se však rozvíjí nejen na dolních končetinách, nýbrž jsou zde i snahy o odhady tělesné hmotnosti z horních končetin (Obrázek 1), i když s nižší spolehlivostí odhadu (Ruff et al., 2020).

Mechanické metody lze dále rozdělit na dva subtypy. Prvním subtypem jsou metody, které využívají rozměry kloubů (kloubních ploch) (Auerbach & Ruff, 2004; Grine et al., 1995; McHenry, 1992; Ruff et al., 1991). Druhým subtypem jsou pak ty metody, které se zaměřují na velikosti průřezů těl jednotlivých dlouhých kostí (*diaphyseal (shaft) cross-sectional dimensions*) a jejich geometrii (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 1991, 2022).

Do prvního subtypu mechanických metod, využívajícího velikostí kloubních ploch, řadíme průměr hlavice stehenní kosti (*femoral head diameter*, FHD) (Grine et al., 1995; McHenry, 1992; Ruff et al., 1997), mediolaterální šíři distální části humeru (Ruff et al., 2020) či mediolaterální šíři proximální části kosti holenní (Grabowski et al., 2015; McHenry, 1992; Ruff et al., 2018; Squyres & Ruff, 2015). Při využití metody FHD bereme v potaz superioinferiorní průměr hlavice kosti stehenní kolmý na osu krčku (Ruff et al., 1991; Ruff & Wood, 2023;

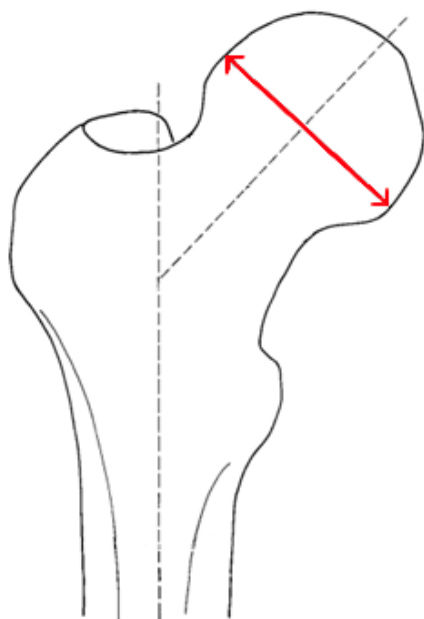
Stloukal, 1999). Výhodou mechanické metody zahrnující průměr hlavice stehenní kosti je především dostupnost kosterního materiálu, protože je hlavice často a velmi dobře zachována (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 1991). Zároveň je snadné se stehenními kostmi pracovat a reprodukovat daná měření (Auerbach & Ruff, 2004). Velmi pozitivní je také, že je u mechanických rovnic obecně nutná zachovalost pouze právě jediné skeletální struktury a nikoliv vícero kostí najednou (Ruff et al., 2012).

Druhým subtypem mechanických metod je pak měření průřezů dlouhých kostí, u kterých jsou nejčastěji využívány rozměry průřezů těl kostí dlouhých končetin (Obrázek 1) (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 1991, 2022). Tělo kosti reaguje na změnu zátěže v průběhu života mnohem více a snadněji než kloubní povrchy, které jsou mnohdy co do velikosti fixovány po dovršení dospělosti (Lieberman et al., 2001; Ruff et al., 1991; Ruff & Wood, 2023). Vývojová plasticita dlouhých kostí a její snadnější reakce na změnu zátěže u průřezů oproti kloubním povrchům však nemusí být nutně pozitivním aspektem a může naopak být komplikací odhadu z důvodu odlišností rozměrů mezi moderními lidmi a předky člověka, což může zkreslit následné odhady hmotnosti těla z kostry, pokud bude využit soubor tvořený moderními lidmi (Ruff et al., 1991; Ruff & Wood, 2023).

Odhad tělesné hmotnosti u obou subtypů je následně vypočítáván pomocí regresních rovnic postavených na konkrétním referenčním souboru.

Právě hypotéza o odlišnosti plasticity průměru hlavice stehenní kosti (Obrázek 3) a změny tloušťky průřezu těla stehenní kosti (Obrázek 1) byla podpořena v práci (Ruff et al., 1991). U současné populace na souboru 80 jedinců bylo zjištěno, že velikost kloubní hlavice je statická, reaguje primárně změnou subenchondrální trabekulární architektury, a nikoliv externím zvětšením kloubu (Ruff et al., 1991). Jedna práce například uvedla, že muži ztrácejí v průběhu života trabekulární kost řidnutím tloušťky trabekul, kdežto u žen dochází k úbytku jednotlivých trabekul (Farr & Khosla, 2015). Věk 18 let byl stanoven jako počátek „dospělosti“, kdy obvykle dojde k srůstu epifýzy stehenní hlavice a diafýzy (Krogman, 1978). Velikost kloubní hlavice stehenní kosti je méně variabilní v průběhu života (méně koreluje s aktuální hmotností) po dovršení dospělosti narozdíl od tloušťky těla stehenní kosti, která odráží aktuální hmotnost spolehlivěji (Lieberman et al., 2001; Ruff et al., 1991). Zaznamenána byla vyšší korelace aktuální hmotnosti a průměru hlavice stehenní kosti u mladých dospělých jedinců než u lidí v pokročilém věku (Ruff et al., 1991). Z paleoantropologického hlediska ale nemusí být neměnnost velikosti kloubní hlavice v moderní populaci nutně na škodu ve vztahu k odhadu hmotnosti, především pak z důvodu nárůstu prevalence obezity (Ng et al., 2014) a s ním

spojených změn na kostře (Evans et al., 2015). V práci Ruffa a kolektivu (1991) bylo taktéž zjištěno, že při využití referenčního souboru moderních lidí dochází nejspíše ke zkreslení vůči minulým populacím z důvodu vyššího množství tukové tkáně u moderní populace (Ruff et al., 1991). Autor Ruff tedy doporučuje při využití v paleoantropologii odečítat od výsledné hodnoty odhadu hmotnosti 10 %, pokud jsou použity rovnice z jeho publikace z roku 1991. Ruff a kolektiv (1991) v práci dále poznamenali, že je zde však několik matoucích faktorů. Jedním z nich je míra fyzické aktivity jedince, protože tělesná hmotnost je pouze jednou složkou z mechanického zatížení, což potvrzují i práce jiné (Bolam et al., 2013; Maïmoun & Sultan, 2011; Shibata et al., 2003; Tan et al., 2014), ale zároveň pak i relativní svalnatost jedince, což potvrzuje i práce jiná (Ferretti et al., 2000). Z tohoto důvodu není jisté, do jaké míry se jedná o zvětšující efekt hmotnosti a do jaké míry již jde o vliv ostatních faktorů a složení těla. Z výsledků autoři studie ale usuzují platnost hypotézy o odlišné plastičnosti diafýzy kosti a kloubní hlavice po dovršení dospělosti (Ruff et al., 1991).



**Obrázek 3.** Proximální část stehenní kosti. Červeně vyznačen průměr hlavice stehenní kosti kolmý na osu krčku. Přerušovanou čarou jsou naznačeny cervikální a diafyzární osa. Převzato a upraveno z Ruff et al. (1991)

V návaznosti na publikované mechanické rovnice v práci (Ruff et al., 1991) byla o rok později publikována práce druhá, která taktéž využila mechanickou metodu založenou na průměru hlavice stehenní kosti (McHenry, 1992). Práce McHenryho (1992) navíc oproti práci Ruff et al. (1991) zkoumala vztah mezi tělesnou hmotností a kosterními rozměry při aplikaci na odlišné druhy rodu *Homo* a porovnávala výsledky se současně žijícími lidoopi. Odhady hmotností pro všechny skupiny (ať už s nebo bez vzorků *Homo sapiens*) se pohybují mezi 10 a

160 kilogramy a nejvyšší korelace byla zaznamenána mezi skutečnou hmotností a zadními (dolními) končetinami (McHenry, 1992).

Práce Grinea a kolektivu z roku 1995 zkoumala nalezenou pravou stehenní kost z Berg Aukas, která měla velmi neobvykle velkou hlavici stehenní kosti. Průměr hlavice činil 58 mm. Kost byla následně porovnána s recentní populací afrického původu a souborem Afroameričanů. V této práci Grinea a kolektivu (1995) byla vyvinuta nová rovnice pro odhad hmotnosti, a to opět pro mechanickou metodu průměru hlavice stehenní kosti (FHD). Ze stehenní kosti byla odhadnuta tělesná hmotnost nálezu na 93 kilogramů (Grine et al., 1995).

Všechny tři rovnice, ať se jedná o rovnice z práce Ruff et al. (1991), McHenry, (1992) či Grine et al. (1995) byly taktéž otestovány později v práci Ruff et al. (2012). Výsledkem bylo zjištění, že rovnice z práce Ruffa a kolektivu a Grinea a kolektivu systematicky nadhodnocují odhad hmotnosti na holocénní populaci a fungují obecně hůře na menších jedincích minulých populací (Ruff et al., 2012). Naopak rovnice McHenryho na tom byla lépe u menších jedinců a hůře predikovala jedince větší (Ruff et al., 2012).

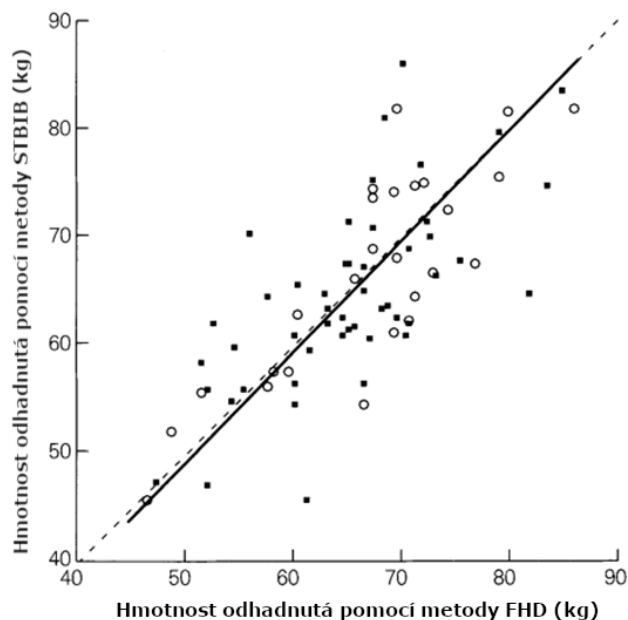
Jaké zkresení však skýtá aplikace rovnic na minulé populace? To se snažil zjistit Ruff ve své práci z roku 2000, kdy testoval morfometrickou metodu na olympijských sportovcích, protože předpokládal, že by sportovci mohli mít obdobnou stavbu a míru fyzické aktivity jako populace minulé. Zjistil, že dochází k podceňování odhadu hmotnosti u silových sportů (u zápasníků), a naopak nadhodnocení u běžců na střední a dlouhé tratě a také disciplínách zaměřených na chůzi a skok do dálky. Autor tedy usuzuje, že metoda podhodnocuje u silových disciplín a nadhodnocuje u vytrvalostních disciplín, což naznačuje, že by složení těla mohlo hrát roli v odhadu hmotnosti. Metoda podhodnocovala muže kvůli většímu svalovému objemu a nadhodnocovala ženy, nejspíše kvůli nižšímu věku a menšímu množství tělesného tuku vůči ženám z běžné populace, na kterých je rovnice postavena (Ruff, 2000). Z výsledků autor usuzuje, že rovnice postavené na neatletické části populace jsou schopny relativně efektivně predikovat tělesnou hmotnost u sportovců a běžné populace, přičemž průměrná predikční chyba se u sportovců pohybovala okolo 3 % jak u mužů, tak u žen. Autor taktéž konstatuje, že pokud bude metoda odhadu hmotnosti těla z kostry použita u homininů, s největší pravděpodobností by bylo vhodné použít model postavený na sportovcích, kteří závodí v disciplínách zaměřených na sílu. Stavba těla je ale adaptivní vůči ekologickým podmínkám (Ruff, 1994, 2000). Proto by se hodilo využít jedince, kteří dělají desetiboj a jsou tak nejvíce všestranní (Ruff, 2000). U nich činila průměrná chyba odhadu nanejvýš 5 %. V neposlední řadě může hrát roli ve hmotnosti a

následném odhadu hmotnosti také neomezená dostupnost výživy u současných vrcholových sportovců (Ruff, 2000). Pokud bylo tedy konstatováno, že morfometrické metody velmi dobře predikují hmotnost jedinců sportovně založených, jaký je obecně rozdíl v odhadu hmotnosti mezi mechanickými a morfometrickými rovnicemi?

Ve srovnání morfometrických a mechanických metod z roku 2004 bylo konstatováno, že rovnice nejlépe odráží odhad hmotnosti těla z kostry na jedincích, na kterých je rovnice postavena (Auerbach & Ruff, 2004). Jinými slovy, že výběr metody závisí na zkoumaném jedinci. Pokud je jedinec například výrazně nižšího vzrůstu, než je průměr skupiny, je nejlepší využít rovnice McHenryho (1992). Pokud naopak výrazně vyšší, než je průměr dané skupiny, je vhodné využít rovnice Grinea a kolektivu (1995). Pokud nepatří jedinec ani do jednoho z extrémů a je blízko průměru, je nejlepší využít rovnice z publikace Ruffa a kolektivu (1991) či zprůměrovat všechny tři rovnice pro odhad hmotnosti za pomoci hlavice stehenní kosti (Auerbach & Ruff, 2004). V přehledu metod Auerbacha a Ruffa z roku 2004 byly využity mechanické i morfometrické metody pro 1173 holocenních jedinců. Celkové zhodnocení metod prokázalo, že rovnice z publikace Grine et al. (1995) vykazuje mírné nadhodnocení tělesné hmotnosti. Oproti tomu u rovnice McHenryho (1992) bylo prokázáno systematické podhodnocení tělesné hmotnosti. U rovnic z publikace Ruff et al. (1991) bylo konstatováno, že metoda měření hlavice stehenní kosti nadhodnocuje jedince menšího (a častěji ženy) a naopak podhodnocuje tělesnou hmotnost větších jedinců (častěji muže) ve srovnání s morfometrickými odhady hmotnosti (Auerbach & Ruff, 2004). Auerbach a Ruff taktéž uvedli, že morfometrické rovnice pro výpočet tělesné hmotnosti z bi-cristální šíře a výšky postavy byly odvozeny ze souboru lidí z různých částí světa, které reprezentují širokou škálu variací lidských těl. Naopak rovnice pro výpočet tělesné hmotnosti pomocí průměru hlavice stehenní kosti byly vytvořeny na omezeném množství jedinců z určitých skupin. Průměrováním výsledků všech tří rovnic z publikací Ruff et al. (1991), McHenry, (1992) a Grine et al. (1995) k dosažení odhadu tělesné hmotnosti má výhody za předpokladu, že jsou hodnoty hmotnosti blízko průměrů dané skupiny, a nikoliv v krajních oblastech rozdělení (při podhodnocování a nadhodnocování) (Auerbach & Ruff, 2004; Pomeroy & Stock, 2012). Najdou se ale i práce, které nepotvrdily výrazné zlepšení odhadu při průměrování zmíněných rovnic u jedinců se známou celkovou hmotností (Chevalier et al., 2016). Pokud není známo pohlaví jedince, lze využít všechny rovnice pro výpočet tělesné hmotnosti z průměru hlavice stehenní kosti, ačkoliv by se v takových případech měla používat STBIB metoda (Auerbach & Ruff, 2004). Neexistuje však žádná extrémní odlišnost těchto dvou metod, která by zamezovala jejich použití pro určitou skupinu lidí (Auerbach & Ruff, 2004).

Pokud je známá výška a máme k dispozici bi-cristální šíři, STBIB je, dle autorů, nejspolehlivější ze všech hodnocených metod odhadu tělesné hmotnosti (Auerbach & Ruff, 2004).

Ať se tedy jedná o morfometrickou či mechanickou metodu, vykazují oba typy užitých proměnných s měřenou hmotností silnou korelaci bez směrového zkreslení u holocenní populace (Auerbach & Ruff, 2004). Výhodou odlišných přístupů morfometrických a mechanických rovnic odhadu tělesné hmotnosti je, že jsou oba typy metod založeny na zcela jiných principech, což umožňuje porovnat metody proti sobě (Auerbach & Ruff, 2004). Spojení obou přístupů pak slouží k odvození nových rovnic, kdy se pomocí morfometrické metody na dostatečně kompletních jedincích vytvoří nové rovnice mechanické, které jsou následně aplikovány na méně kompletní jedince ze souboru (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 1997, 2012; Ruff & Wood, 2023). Takovýto postup nazýváme jako hybridní (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 2012; Sládek et al., 2018). To je výhodné právě proto, že relativně málo jedinců je kompletních natolik, aby mohla být využita metoda morfometrická (Ruff et al., 1997, 2012; Ruff & Wood, 2023). Ačkoliv je každá z metod založena na odlišných kosterních rozměrech a principech, jsou po vynesení odhadů hmotnosti do grafů jednotlivé hodnoty odhadů podobné (Obrázek 4) (Ruff et al., 1997).



**Obrázek 4.** Srovnání mezi hmotností těla odhadnutou z výšky postavy a bi-cristální šíře a hmotnost těla odhadovaná z tloušťky hlavičky stehenní kosti u 75 Pleistocenních *Homo* jedinců. Prázdné symboly, změřená bi-cristální šíře; plné symboly, odhadovaná bi-cristální šíře. Plná čára, zredukovaná hlavní regresní osa (RMA) ( $y = 1.04 \times x - 3.4$ ;  $r = 0.738$ ). Přerušovaná čára indikuje ekvivalenci  $y$  a  $x$ . Převzato a upraveno z Ruff et al. (1997)

Hybridní metodou je tak možné vytvořit odhad hmotnosti pomocí morfometrické metody STBIB u dostupných jedinců, který je následně využit jako základ pro vyvinutí rovnice pro odhad tělesné hmotnosti pomocí průměru hlavice stehenní kosti u nekompletních jedinců ze souboru (Ruff et al., 2012). Takováto rovnice je však specifická pro daný soubor jedinců či populaci. Práce Ruff a kolektivu z roku 2012 vytváří predikční rovnice pro odhad hmotnosti těla z kostry právě touto hybridní metodou. Práce je populačně specifická pro evropské holocenní populace (Ruff et al., 2012). Stejná hybridní metoda byla využita i v novější práci Sládek et al. (2018). Hybridní metody vylepšují obecnou spolehlivost odhadu, ale snižují pohlavní rozdíly u pohlavně specifických rovnic (Sládek et al., 2018).

Zcela odlišným přístupem je pak také odhad hmotnosti těla z velikosti stop podle velikosti chodidel (Obrázek 1) (Masao et al., 2016; Ruff et al., 2021; Ruff & Wood, 2023). Tento přístup se však neřadí ani do morfometrického ani do mechanického přístupu. Studie se 143 současně žijících účastníků, kteří nevyužívali obuv (nebo ji používali minimálně) vykázala vysokou korelaci mezi maximální délkou chodidla, šířkou chodidla a tělesnou hmotností (Ruff et al., 2021). Mnohem více prací však bude třeba k hlubšímu pochopení této problematiky, jak uvádí sám autor (Ruff et al., 2021).

Recentní práce autorů Ruffa a Wooda (2023) poskytuje nový pohled na nedávno vytvořené rovnice postavené na širokém spektru současných lidí. U více zachovalých jedinců autoři doporučují využít morfometrickou metodu STBIB (Ruff & Wood, 2023). U méně kompletních jedinců je vhodnější využít metody mechanické, přesněji průměr hlavice stehenní kosti či šíři proximální části holenní kosti. Důležité je u mechanických metod brát v potaz, zda se jedná o zkoumaného jedince současného či jiné homininy, protože panují rozdíly mezi *Homo sapiens*, jinými druhy rodu *Homo* a australopitéky. Výběr referenčního souboru by měl být časově co nejblíže zkoumanému jedinci (Ruff & Wood, 2023). Například při využití odhadu hmotnosti v současné západní populaci by se k forenzním účelům by se tedy měly využívat referenční soubory, které nejblíže charakterizují danou populaci (Ruff & Wood, 2023; Schaffer, 2016). V případě západní, industrializované společnosti by to tedy měl být nespíše soubor obsahující více jedinců s vyšším zastoupením tělesného tuku. Oproti tomu při odhadu tělesné hmotnosti u neindustrializovaných společností a ostatních druhů *Homo* by měly být použity referenční data spíše štíhlých, atletických jedinců, jelikož nadváha či obezita je jev pro předchozí populace mnohem více atypický než v současné době (Ruff & Wood, 2023; Xi et al., 2012). Literatura tedy naznačuje, že je složení těla pro následné využití odhadů hmotností těla z kostry zásadní a

vytvoření správného referenčního souboru je pak klíčovým aspektem odhadů hmotnosti těla z kostry. Jaké způsoby sestavení referenčního souboru jsou dostupné?

## 1.2. Referenční soubor

Při tvorbě predikční rovnice pro jednu či druhou skupinu metod odhadu hmotnosti těla z kostry je nutné vybrat co nejoptimálnější referenční soubor, který bude co nejbližší charakterizovat odhadovaného jedince v populaci a čase (McHenry, 1992; Ruff, 2000; Ruff et al., 1991; Ruff & Wood, 2023). Referenční soubor lze vytvořit třemi způsoby. Sestavit soubor z těl kadaverů, u kterých byla tělesná hmotnost známa před vysušením (McHenry, 1992), získat rozměry na živých lidech pomocí antropometrického měření (hmotnost, výška postavy, bi-cristální šíře) (Grine et al., 1995) či využít moderních technologií a rozměry a hmotnost získat s pomocí radiodiagnostických zobrazovacích metod (Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013; Pomeroy et al., 2019; Squyres & Ruff, 2015). Každý typ má však svá omezení. U kadaverů často dochází k podceňování tělesné hmotnosti vůči hmotnosti skutečné, což je způsobeno odlišným zacházením před a po smrti jedince, doby uplynulé od vážení či celkovému chřadnutí a stavu jedince (Ruff et al., 2018; Ruff & Wood, 2023). U kadaverů dochází ke ztrátě vody a celkově měkkých tkání, což vede ke zkreslení a následnému podhodnocování tělesné hmotnosti u živých jedinců (Ruff & Wood, 2023). U antropometrického měření a měření pomocí radiodiagnostických zobrazovacích metod naopak dochází často k nadhodnocení výsledného odhadu hmotnosti, zejména pokud jsou referenční soubory postaveny na industrializovaných společnostech s vyšším výskytem nadváhy či obezity ve společnosti (Ng et al., 2014; Ogden et al., 2014; Pomeroy et al., 2019; Ruff et al., 2018; Schaffer, 2016). Záleží pak nejvíce, na koho rovnice aplikujeme. Právě tuková tkáň by mohla hrát klíčovou roli při sestavování referenčního souboru pro rovnice odhadu hmotnosti těla z kostry a následný odhad hmotnosti jedince.

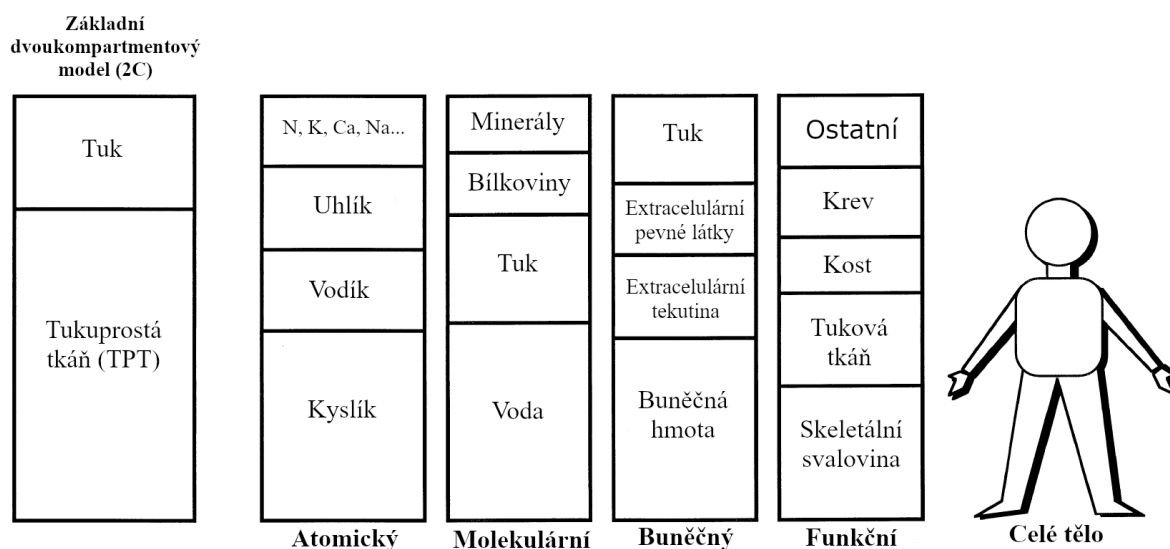
Společným problémem všech tří typů souborů je pak omezenost rozsahu (variací) velikosti a tvarů těl, často jsou totiž referenční soubory postaveny na omezeném rozpětí tělesných rozměrů (velikostí a tvarů těla jedinců), často z velmi podobných socioekonomických poměrů či populací (Ruff & Wood, 2023).

Mnohdy je však nesoulad referenčních a cílových souborů příčinou špatných výsledků a chybných odhadů jednotlivých rovnic při aplikaci na odlišné soubory, ať již paleoantropologického, bioarcheologického či forenzního hlediska (Ruff et al., 2024).

Jakou roli tedy hraje složení těla v odhadu hmotnosti těla z kostry? Bude mít podíl tělesného tuku vliv na chybu odhadu hmotnosti?

### 1.3. Složení těla

Nejdříve však obecně charakterizujme, z čeho je lidské tělo složeno. Lidské tělo je tvořeno přibližně 37 biliony buněk (Bianconi et al., 2013), které se spojují do tkání a vytvářejí společně orgánové soustavy. Dnes je nejčastěji rozšířeným pojetím rozdělení těla pomocí multikompartmentových (někdy udávaných jako multikomponentových) modelů s různými složkami, kde lze tělo charakterizovat na úrovni atomů, molekul, buněk, tkáňových systémů a celého těla (Ellis, 2000; Gallagher et al., 2013; Heymsfield et al., 2015; Kuriyan, 2018; Silva et al., 2004; Wang et al., 1992, 1995; Withers et al., 1998).



#### Multikompartmentové modely

**Obrázek 5.** Odlišné modely pro rozdělení lidského těla do jednotlivých multikompartmentových modelů. Převzato a přeloženo z (Ellis, 2000).

Celkové složení těla je ovlivněno mnohými faktory včetně genů, prostředí, věku, pohlaví, stravovacích návyků, či prodělaných nemocí během života (Brener et al., 2021; Siri, 1956). Složení těla se také mění v průběhu života v závislosti na pohybové aktivitě (Behnke et al., 1942; Kyle et al., 2004). Z tohoto důvodu budou dva lidé stejného pohlaví, věku, hmotnosti těla i výšky postavy mít odlišné složení těla (Kuriyan, 2018; Siri, 1956). Složení těla je důležitým indikátorem pro výskyt chorob jako jsou sarkopenie, osteopenie, osteoporóza, podvýživa či naopak obezita (Gallagher et al., 2013). Obezita je definovatelná jako nadměrné, patologické zmnožení tukové tkáně (Zdroj 1). Právě množství tukové tkáně je v populaci nejvíce variabilní složkou těla (Kyle et al., 2001; Nguyen et al., 1998) a rostoucí prevalence nadváhy a obezity v západním světě (Ng et al., 2014; OECD & European Union, 2022) nám naznačuje, že se jedná o složku těla, která je schopna měnit nejvíce svůj objem. Proto bude cíleno primárně na tento kompartment.

Možnosti, jak zjišťovat složení těla, lze rozdělit na dva základní přístupy. Mezi první typ přístupu patří metody, které nevyžadují náročné přístroje ani prostředí laboratoře. Prvním typem jsou tedy „polní metody“ mezi které řadíme antropometrická měření jako jsou obvod pasu, poměr obvodu pasu a boků (*waist to hip ratio, WHR*), měření tloušťek kožních řas či index tělesné hmotnosti (*Body Mass Index, BMI*), (Kuriyan, 2018). Druhou skupinu tvoří matematicko-fyzikální výpočty, primárně založené na odhadech či měření dané struktury díky svým chemicko-fyzikálním vlastnostem, které již poskytují spolehlivější informace o složení těla. Do této skupiny řadíme již hydrodensitometrii (někdy též nazývanou jako podvodní vážení, *underwater weighing (UWW)*), bioimpedanční analýzu (*BIA*), metodu izotopového ředění (*tracer dilution*), počítání celého těla (*whole-body counting*), bodypletyzmografii, a také skenování pomocí radiometrických metod založených na vlastnostech jednotlivých molekul jako například duální rentgenová absorpciometrie (*DEXA*), počítačová tomografie či magnetická rezonance, které umožňují odhadnout složení těla s velmi vysokou spolehlivostí (Gallagher et al., 2013; Kuriyan, 2018). V praxi pak mnohdy dochází ke kombinaci několika metod najednou z důvodu zlepšení spolehlivosti složení těla (Ellis, 2000; Withers et al., 1998).

Jak ale tedy tělo rozdělit, tak abychom byli schopni odlišit jednotlivé složky? Logickým krokem je rozdělit tělo na konkrétní části, které budou společně tvořit celek. Jedněmi z prvních autorů, kteří se zabírali složením těla, byli v roce 1942 Behnke a kolektiv a publikovali práci, kde se zaměřovali na hustotu tuku a tukuprosté tkáně. Již v roce 1942 použili metodu podvodního vážení, díky které byli schopni odlišit od sebe tukovou a tukuprostou tkáň a konstatovat, že tuk je lehčí než voda a tukuprostá tkáň naopak těžší než voda (Behnke et al., 1942). Výsledkem práce bylo zjištění, že existuje ustálený rozdíl v hustotě mezi tukem a tukuprostou tkání, což má zásadní dopad na hustotu těla (Behnke et al., 1942). Tyto poznatky posloužily jako hrubý základ pro pozdější práce, které se hlouběji zaměřují na složení těla, především pak na množství tukové tkáně v těle (Brožek et al., 1963; Siri, 1956, 1961). O pár let později byla již publikována rovnice hrubého složení těla (Siri, 1956), která zní takto:

$$1 = w + f + p + m, \quad (3)$$

kde  $w$  = voda (*water*),  $f$  = tuk (*fat*),  $p$  = bílkoviny (*protein*),  $m$  = minerály (*minerals*).

Z předchozí rovnice lze odvodit vztah pro výpočet dílů (Rovnice 4) jednotlivých složek těla v závislosti na jejich hustotě (Tabulka 1). Rovnice hustot publikovaná Siri (1956) je založena na předpokladu, že směs je tvořena více než jednou látkou s odlišnou hustotou, přičemž díl lze dopočítat v případě, že je hustota každé látky známá. Jednotlivé součty podílů se musí rovnat

jednotlivý částem hmotnosti a konkrétnímu objemu. Je nezbytné, aby každý součet hmotnostních a objemových podílů rovnal složce jednotkové hmotnosti a objemu (Siri, 1956). Proto byla publikována rovnice Siri (1956) zaměřená na hustoty jednotlivých složek těla, která zní takto:

$$\frac{1}{Bd} = \frac{w}{d_w} + \frac{f}{d_f} + \frac{p}{d_p} + \frac{m}{d_m}, \quad (4)$$

kde  $Bd$  = hustota těla,  $w$  = voda (*water*),  $f$  = tuk (*fat*),  $p$  = bílkoviny (*proteins*),  $m$  = minerály (*minerals*),  $d_w$  = hustota vody,  $d_f$  = hustota tuku,  $d_p$  = hustota bílkovin,  $d_m$  = hustota minerálů

Rovnice pro výpočet složení těla jsou založeny na předpokladu, že lze tělo chemicky rozdělit na minimálně dvě části, které od sebe lze odlišit (Brožek et al., 1963; Ellis, 2000; Siri, 1956). Hustoty jednotlivých kompartmentů se mezi sebou liší a číselně jsou vyobrazeny v tabulce níže (Tabulka 1) (Heymsfield et al., 2015; Siri, 1956; Withers et al., 1998).

Tabulka 1. Hustoty jednotlivých složek těla

| Složka                                                    | Hustota<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Zdroj                  |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Voda                                                      | 0,9933                          | Heymsfield et al. 2015 |
| Bílkoviny                                                 | 1,3400                          | Heymsfield et al. 2015 |
| Minerály                                                  | 3,0420                          | Heymsfield et al. 2015 |
| Tuk/ová tkáň                                              | 0,9007                          | Siri, 1961             |
| Tukuprostá tkáň                                           | 1,1000                          | Siri, 1961             |
| Celkový objem vody ( <i>total body water</i> , TBW)       | 0,9937                          | Siri, 1961             |
| Tukuprostá sušina ( <i>fat free dry mass</i> , FFDM)      | 1,5690                          | Withers et al. 1998    |
| Hmota kostních minerálů ( <i>bone mineral mass</i> , BMM) | 2,9820                          | Withers et al. 1998    |
| Zbytková hmota ( <i>residual mass</i> , RM)               | 1,4040                          | Withers et al. 1998    |

Jak bylo zmíněno v úplném začátku kapitoly, lze tedy využít model založený na jednotlivých chemických prvcích (dle atomů), či jednotlivých molekul, jednotlivých buněk, tkání (dle funkcí) či při součtu celého těla (Ellis, 2000; Heymsfield et al., 2015; Wang et al.,

1992, 1995). Způsoby, jakými lze složení těla rozdělit lze charakterizovat dle úrovně, jak na tělo nahlížíme. Jak ale využít tyto poznatky v praxi?

Dnes již tradičním pojetím složení těla jsou multikompartmentové modely, které lze dělit postupně od jednokompartmentového (1C) přes dvoukompartmentový (2C), tříkompartmentový (3C), čtyřkompartmentový model (4C) a tak dále (Kuriyan, 2018; Wang et al., 1995; Withers et al., 1998). Každý z modelů odděluje různé typy složek a tkání a mnoho autorů využívá k rozdělení těla odlišné složky či započítává jednotlivé části těla do stejné kompartmenty (Obrázek 6). Platí ale, že s každou další přidanou kompartmentou se snižuje počet automaticky předpokládaných konstantních hodnot složek těla a jednotlivé měření složení těla je tak spolehlivější (Wang et al., 2002). Jak ale jednotlivé kompartmenty konkrétně odhadujeme a jaké metody pro odhad složení těla se v jednotlivých modelech využívají?

Dvoukompartmentový model rozděluje nejčastěji tělo na tukovou a tukuprostou hmotu (či tkáň) (Brožek et al., 1963; Kuriyan, 2018; Siri, 1956; Withers et al., 1998). Tuková hmota (*fat-mass*, FM) je definována jako chemicky extrahovatelný tuk s pevnou hodnotou hustoty uvedenou v tabulce (Tabulka 1) (Kuriyan, 2018; Siri, 1956; Withers et al., 1998). Množství tukové hmoty je vypočítáváno jako rozdíl mezi celkovou hmotností a množstvím tukuprosté hmoty (Ellis, 2000; Siri, 1956, 1961). Protipólem hmoty tukové je pak zmíněná tukuprostá hmota (či tkáň) (*fat-free mass*, FFM), taktéž s definovanou hustotou (Tabulka 1) (Kuriyan, 2018; Siri, 1961; Withers et al., 1998). Dvoukompartmentový model využívá především hydrodensitometrie (podvodní vážení), dále pak bodyplety smografie a bioimpedanční analýza (Ellis, 2000; Kuriyan, 2018). Problémem dvoukompartmentového modelu však zůstává absence variability ve složení těla, jelikož je brána konstantní hodnota procentuálního zastoupení vody v těle (73,72%), množství kostních minerálů (*bone mineral content*, BMC) a hustoty tukuprosté hmoty (Brožek et al., 1963; Ellis, 2000; Kuriyan, 2018). Procentuální hodnota zastoupení vody v těle však platí pouze pro zdravé dospělé jedince, na kterých bylo měření provedeno (Kuriyan, 2018). V případě velmi mladých či naopak starších lidí, nemocných, či různých etnik odlišných od původního měření, je hodnota pouze orientační a rozhodně není konstantní (Ellis, 2000). Model nebere v potaz ani věkové skupiny, těhotenství či některé nemoci (Zdroj 2).

Pro výpočet množství tuku v těle je v případě kompartmentových modelů využito rovnic založených na především podvodním vážení (Brožek et al., 1963; Siri, 1956, 1961). Tělo je ponořeno pod vodu a je vypočítán objem vody, který je vytlačen (princip Archimédova zákona)

(Gallagher et al., 2013). Hmotnost těla a hodnota vytlačeného objemu vody následně udává hustotu celého těla (Gallagher et al., 2013; Kuriyan, 2018). Objem (*volume*) jednotlivých kompartmentů obecně vypočítáme pomocí rovnice pro výpočet hustoty, která zní takto:

$$\text{Objem kompartmentu (cm}^3\text{)} = \frac{\text{hmotnost kompartmentu (g)}}{\text{hustota kompartmentu (\frac{g}{cm}^3\text{)}}} \quad (5)$$

Z čehož lze následně odvodit rovnici pro výpočet hustoty těla dle (Withers et al., 1998), který zní takto:

$$\frac{1}{Bd} = \frac{FM}{FMd} + \frac{FFM}{FFMd}, \quad (6)$$

kde Bd = hustota těla (*body density*), FM = tuková hmota (*fat mass*), FMd = hustota tukové hmoty (*fat mass density*), FFM = tukuprostá hmota (*fat free mass*), FFMd = hustota tukuprosté hmoty (*fat free mass density*)

Celková hustota se vypočítá z tělesné hmotnosti a tělesného objemu, za předpokladu, že bereme ustálenou hustotu dané složky v celém těle (Siri, 1956). Bylo publikováno vícero odlišných rovnic pro výpočet tukové tkáně, respektive procentuálního zastoupení tuku v těle. První využívanou rovnicí je rovnice Siri (1961), která nám po vynásobení stem udává procentuální zastoupení tuku v těle a zní takto:

$$f (\%) = A = \left( \frac{4,950}{Bd} - 4,500 \right) \times 100, \quad (7)$$

kde f = tuk (*fat*), A = tuková hmota/tkáň (*adipose tissue*), Bd = hustota těla (*body density*), jednotky v (g/cm<sup>3</sup>)

O dva roky později publikoval Brožek et al. (1963) druhou odlišnou rovnici pro výpočet procentuálního množství tuku v těle, která zní takto:

$$f (\%) = A = \left( \frac{4,971}{Bd} - 4,519 \right) \times 100, \quad (8)$$

kde f = tuk (*fat*), A = tuková hmota/tkáň (*adipose tissue*), Bd = hustota těla (*body density*), jednotky v (g/cm<sup>3</sup>)

Brožek a kolektiv v roce 1963 ve stejné práci vytvořili ještě jednu specifickou rovnici pro jedince, u kterých v minulosti nebyly zaznamenány rapidní změny hmotnosti (Brožek et al., 1963) a zní takto:

$$f (\%) = A = \left( \frac{4,570}{Bd} - 4,142 \right) \times 100, \quad (9)$$

kde  $f$  = tuk (*fat*),  $A$  = tuková tkáň (*adipose tissue*),  $Bd$  = hustota těla (*body density*), jednotky v ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

Pokud tedy zjistíme hustotu celého těla, například pomocí podvodního vážení či bodyplethysmografie, lze dosadit do rovnice danou hodnotu, čímž zjistíme procentuální zastoupení tuku v těle. Pro příklad, kdy hustota celého těla bude  $1,05 \text{ g}/\text{cm}^3$ , vyjde nám, že má jedinec 21,04 % tuku v těle.

Nevýhodou dvoukompartmentového modelu ale je, že počítá s konstantní hustotou složek a zastoupením vody v těle, které bylo vypočteno ze tří těl mužských kadaverů a nepokrývá dostatečně interindividuální variabilitu (Ellis, 2000; Withers et al., 1998). Toho si byl Siri ve své práci vědom a navrhl proto v roce 1961 tříkompartmentový model, kde se již počítá s nekonstantním zastoupením vody v těle mezi jedinci a dělí tak tělo o další variabilní složku.

Tří kompartmentový model nejčastěji stále rozděluje tělo na tukovou tkáň, avšak tukuprostou tkáň dělí dále na vodu (*total body water*, TBW) a sušinu, kterou tvoří primárně bílkoviny a minerály (*fat-free dry mass*, FFDM) (Obrázek 5) (Ellis, 2000; Kuriyan, 2018; Siri, 1961; Withers et al., 1998). Celkový objem vody v těle zahrnuje součet intracelulární a extracelulární vody (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009). V tří kompartmentovém modelu již tedy počítáme s nekonstantním množstvím celkové vody v těle (Rovnice 10), ale počítá se stabilním poměrem proteinů a minerálů, který činí 0,35 (Ellis, 2000; Kuriyan, 2018; Withers et al., 1998), přičemž z výsledku Rovnice 10 lze následně odvodit množství tukové tkáně (Rovnice 11) (Siri, 1961). Odlišným typem dělení je pak rozdělit tukuprostou tkáň na hmotu netukové tkáně (*lean mass tissue*, LMT) a minerální obsah kostí (*bone mineral content*, BMC) (Kuriyan, 2018). Právě tento typ dělení je využíván také v případě duální rentgenové absorpciometrie (Kuriyan, 2018). Tento model vyžaduje údaje o tělesné hmotnosti, informace o tělesném objemu z podvodního vážení či bodyplethysmografii a celkovém množství vody v těle (Zdroj 2). Z Rovnice 11 dostáváme výsledek procentuálního zastoupení tuku v těle. Obecně pak rovnice pro tříkompartmentový model vypadá dle (Withers et al., 1998) takto:

$$\frac{1}{Bd} = \frac{FM}{FMd} + \frac{FFDM}{FFDMd} + \frac{TBW}{H_2Od} \quad (10)$$

kde  $Bd$  = hustota těla (*body density*),  $FM$  = tuková tkáň (*fat mass*),  $FMd$  = hustota tukové tkáně (*fat mass density*),  $FFDM$  = tukuprostá tkáň bez vody (*fat free dry mass*),  $FFMd$  = hustota tukuprosté tkáně bez vody (*fat free dry mass density*),  $TBW$  = celkový objem vody (*total body water*),  $H_2Od$  = hustota vody

Rovnice pro výpočet tukové tkáně v tří kompartmentovém modelu podle (Siri, 1961), pak zní takto:

$$f (\%) = A = \left( \frac{2,118}{Bd} - 0,786 \left( \frac{TBW}{BM} \right) - 1,354 \right) \times 100, \quad (11)$$

kde  $Bd$  = hustota těla (*body density*) v  $g/cm^3$ ,  $TBW$  = celkový objem vody (*total body water*) v litrech,  $BM$  = hmotnost těla (*body mass*)

Lze využít také druhou rovnici z publikace Siri (1961), která byla ale v roce 2004 upravena Silvou a kolektivem, kvůli změně výpočtu hustoty jednotlivých složek, kdy se snížila teplota při výpočtu z 37 stupňů Celsia na 36 stupňů Celsia. Upravená rovnice dle (Silva et al., 2004) zní takto:

$$f (\%) = A = \left( \frac{2,122}{Bd} - 0,779 \left( \frac{TBW}{BM} \right) - 1,356 \right) \times 100, \quad (12)$$

kde  $Bd$  = hustota těla (*body density*),  $TBW$  = celkový objem vody (*total body water*),  $BM$  = hmotnost těla (*body mass*)

Pro příklad opět využijeme jedince s hustotou těla opět  $1,05 g/cm^3$ , který má 70 kilogramů a jeho tělo tvoří 42 litrů vody. Vyjde nám, že dle publikace Silva et al. (2004) má 19,76 % tuku v těle.

Čtyřkompartmentový model rozděluje tělo na tukovou tkáň, tukuprostou tkáň, vodu a kostní hmotu (Obrázek 5) (Withers et al., 1998). Odlišně lze ale dle čtyřkompartmentového modelu rozdělit tělo také na tuk, vodu, bílkoviny a minerály (Ellis, 2000). Obecná rovnice pro čtyř kompartmentový model dle (Withers et al., 1998) zní takto:

$$\frac{1}{Bd} = \frac{FM}{FMd} + \frac{BMM}{BMD} + \frac{TBW}{H_2Od} + \frac{RM}{RMD} \quad (13)$$

kde  $Bd$  = hustota těla (*body density*),  $FM$  = tuková tkáň (*fat mass*),  $FMD$  = hustota tukové tkáně (*fat mass density*),  $BMM$  = hmotnost kostních minerálů (*bone mineral mass*),  $BMD$  = hustota kostních minerálů (*bone mineral density*),  $TBW$  = celkový objem vody (*total body water*),  $H_2O_d$  = hustota vody,  $RM$  = reziduální hmota (*residual mass*), která je tvořena hlavně bílkovinami,  $RMd$  = hustota reziduální hmoty (*residual mass density*).

Procentuální zastoupení tuku v těle pak lze ve čtyř kompartmentovém modelu vypočítat pomocí Rovnice 14 či Rovnice 15, dle různých autorů. Podle Witherse a kolektivu (1998) zní výpočet pro množství tukové tkáně v čtyřkompartmentovém modelu takto:

$$f (\%) = A = \left( \frac{2,513}{Bd} - 0,739 \left( \frac{TBW}{BM} \right) + 0,947 \left( \frac{BMM}{BM} \right) - 1,79 \right) \times 100, \quad (14)$$

kde  $Bd$  = hustota těla (*body density*),  $TBW$  = celkový objem vody (*total body water*),  $BM$  = hmotnost těla (*body mass*),  $BMM$  = hmotnost kostních minerálů (*bone mineral mass*)

Odlišnou rovnici publikoval v přehledu Heymsfield a kolektiv (2015), která zní takto:

$$f (\%) = A = \left( \frac{2,720}{Bd} - 0,715 \left( \frac{TBW}{BM} \right) + 1,108 \left( \frac{BMM}{BM} \right) - 2,020 \right) \times 100, \quad (15)$$

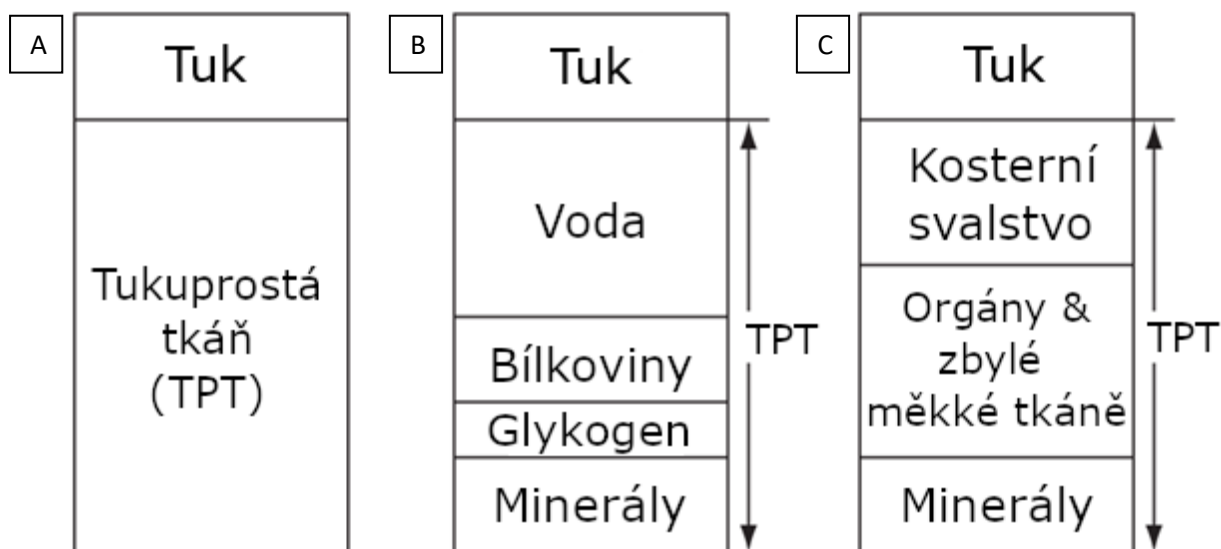
kde  $Bd$  = hustota těla (*body density*),  $TBW$  = celkový objem vody (*total body water*),  $BM$  = hmotnost těla (*body mass*),  $BMM$  = hmotnost kostních minerálů (*bone mineral mass*)

Pro příklad zjištění procentuálního zastoupení tuku v těle využijeme rovnici z publikace Heymsfielda a kolektivu z roku 2015 a opět jedince vážícího 70 kilogramů, celkové hustoty těla  $1,05 \text{ g/cm}^3$  s objemem vody v těle 42 kilogramů a kostní hmotou 3 kilogramy. Po dosazení těchto hodnot do rovnice nám vyjde, že jedinec má 18,9 % tuku v těle.

Výhodou čtyř kompartmentového modelu je především absence závislosti na předem definovaných hodnotách pro hustotu tukuprosté tkáně a 73,72% zastoupením vody v těle a je tudíž spolehlivější než model tříkompartmentový (Ellis, 2000; Kuriyan, 2018). Nevýhodou je však vyšší náročnost měření a nutnost využití vícero přístrojů najednou (Kuriyan, 2018). Pro výpočet je nutné znát hustotu těla (pomocí podvodního vážení), celkový objem vody (pomocí ředění izotopů nebo bioimpedanční analýzy), hustotu kostních minerálů (pomocí DEXA) a celkovou hmotnost (Ellis, 2000; Kuriyan, 2018).

Odlišným typem je rozdělení také na molekulární úrovni. Pokud bychom použili rozdělení dle molekul, má největší zastoupení voda, která zaujímá podle Heymsfielda a kolektivu (2015)

přibližně 60 % tělesné hmotnosti. Zbýlých 40 % hmotnosti tvoří průměrně z 15,1 % bílkoviny, 19 % tuk a 5,3% připadá na minerály, které jsou v lidském těle uloženy především v kostech (Heymsfield et al., 2015). Zbýlých pár desetín procenta tvoří glykogen (Obrázek 5), který je často přehlížen a rozdělen mezi bílkovinnou složku těla (Heymsfield et al., 2015).



**Obrázek 6.** Tři odlišné modely pro rozdělení lidského těla do jednotlivých kompartmentů. A: Dvou kompartmentový model. B: Tři (či čtyř) kompartmentový. C: Čtyřkompartmentový model. Převzato a přeloženo z Gallagher et al. (2013).

Odlišné dělení v jednotlivých multikompartmentových modelech tedy ukazuje, že lze tělo rozdělit na různé odlišitelné složky. Zároveň lze ale pozorovat, že způsobů, jak využívat kompartmentové modely je vícero a poskytují rozdílné hodnoty pro složení těla. Kompartmentové modely se mohou dále dělit dle logických celků dle uvážení na libovolný počet kompartmentů. Důležité je však, aby každé další měření bylo složením nezávislé na předchozí kompozici (Ellis, 2000). Obecně lze kompartmentové modely brát jako výpočet tělesné hmotnosti a tělesného objemu (Heymsfield et al., 2015). Všechny tyto kompartmentové modely však počítají s tím, že jsou veškeré složky známy a konstantní *in vivo* (Heymsfield et al., 2015).

V současné populaci však dochází k nárůstu dvou trendů. Prvním trendem je nárůst konkrétní složky těla, a to složky tukové (Zdroj 3), což má za následek vyšší výskyt nadváhy či obezity a s tím spojená rizika (Okunogbe et al., 2022; Xi et al., 2012). Druhým trendem je stále se zvyšující věk dožití (Zdroj 4). Prevalence nadváhy a obezity je stále častějším problémem v industrializované společnosti a nadváha či obezita představuje celou řadu zdravotních rizik (Ng et al., 2014), které mají přímý i nepřímý dopad na kvalitu života. Na svém

začátku multikompartmentové modely pracovaly především s matematickými odhady na kadaverech, což však na kadaverózních vzorcích poskytovalo mnohé nepřesnosti při převodu na živé jedince (Gallagher et al., 2013). Proto bylo s rozvojem technologií v oblastech fyziky a medicíny progresivní odebrat předpoklady a používat přímá měření jedinců, jak je tomu v případě tří a čtyřkompartmentového modelu, kdy nám přístroje umožňují měřit složení lidského těla s využitím radiometrických metod přímo na živých jedincích (*in vivo*) s minimálními automaticky předpokládanými hodnotami (Ellis, 2000). Mezi tyto metody řadíme právě bioimpedanční analýzu či duální rentgenovou absorpciometrii (DEXA) (Fogelholm & Van Marken Lichtenbelt, 1997), jejichž využívání se v průběhu času stalo již neodmyslitelnou částí pro zjišťování tělesného složení v klinické praxi (Andreoli et al., 2009; Gallagher et al., 2013).

DEXA ani BIA však neslouží pouze jako součást kompartmentových modelů, ale jsou schopny měřit i některé složky samy a utvářet tak vlastní kompartmentové modely v souvislosti s fyzikálními principy každého z přístrojů (Ellis, 2000; Kuriyan, 2018; Williams et al., 2006). Při měření DEXA bylo zaznamenáno podhodnocení tělesné hmotnosti u obézních žen a lehké nadhodnocení u neobézních mužů (Williams et al., 2006). Obdobně byl pak odhad hmotnosti tukuprosté tkáně nadhodnocen u všech dospělých, a naopak podhodnocený u neobézních dospívajících chlapců (Williams et al., 2006). Autoři přisuzují tuto skutečnost změnám složení těla spojeným s věkem (Williams et al., 2006). V práci Deurenberga (2009) měla DEXA průměrnou chybu odhadu složení těla okolo 3 %, oproti BIA, která měla ve stejné práci chybu odhadu okolo 5 % (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009). V novější práci ale proběhlo srovnání DEXA a BIA, kde bylo konstatováno, že jsou výsledky identických složek těla obou přístrojů prakticky totožné (Miller et al., 2016). Jedná práce však doporučuje využívat DEXA u obézních pacientů z důvodu větší spolehlivosti u opakovaného měření (Erselcan et al., 2000).

Po čtyř kompartmentovém modelu lze využít další modely s dalšími složkami, jako například pěti či šesti kompartmentový. Takové modely se již však v publikacích označují spíše jako multikompartmentové (Ellis, 2000; Kuriyan, 2018; Withers et al., 1998). Výčet ostatních rovnic pro kompartmentové modely je přiložen v příloze (Zdroj 2) či v publikaci (Heymsfield et al., 2015). Ke zjištění složení těla byla i v našem případě použita duální rentgenová absorpciometrie (DEXA).

## 1.4. Duální rentgenová absorpciometrie (DEXA)

Duální rentgenová absorpciometrie je neinvazivní vyšetřovací metoda, která slouží primárně ke zjištění množství minerálů v kostech (*bone mineral content*, BMC) a hustoty kostní tkáně (*bone mineral density*, BMD) (Cullum et al., 1989; Laskey et al., 1991; Mazess et al., 1989; Webber, 2006). Technologie byla poprvé využita v roce 1987 (Heymsfield et al., 2015; Pisani et al., 2013). Výsledek měření se stává klíčovým ukazatelem pro mnohé nemoci či rizika spojených s kostmi (Bachrach, 2000; Laskey et al., 1991; Pisani et al., 2013). Díky DEXA lze diagnostikovat úbytek kostní hmoty a výskyt osteopenie, osteoporózy a odhalit tím zvýšené riziko fraktur (Pisani et al., 2013; Ruff & Hayes, 1988). Měření probíhá nejčastěji v místech zvýšených rizik fraktur jako jsou páteř, ramena, kost patní či kyčle (proximální část femuru), avšak je možné vytvořit i snímek celého těla (Lewis et al., 1994; Mazess & Barden, 1988; Pisani et al., 2013).

Princip DEXA spočívá ve schopnosti paprsků pronikat rozdílnými strukturami, přičemž paprsek se nárazem a následným průnikem určitou strukturou (tkání) zeslabuje (Berger, 2002; Laskey et al., 1991). Snížená hodnota paprsku je zachycena detektorem na opačné straně (Berger, 2002; Cullum et al., 1989; Pisani et al., 2013). Čím hustší je daná tkáň, tím více energie je cestou ztraceno a tím méně energie je zachyceno na detektoru (Berger, 2002). Duální je z důvodu využití dvou fotonů o různých energiích (*high-energy* a *low-energy*) (Mazess et al., 1989; Pisani et al., 2013), přičemž oba paprsky jsou pohlcovány kostí a měkkými tkáněmi zcela odlišně právě kvůli odlišným atenuačním koeficientům (Cullum et al., 1989; Williams et al., 2006; Pisani et al., 2013). Díky tomu je možné odhadnout množství měkkých tkání, udávaných v hodnotě R. Hodnota R je poměr útlumu mezi pohlcením paprsku s nižší a vyšší hodnotou (Mazess et al., 1990). Fotony mají vrchol v různých hodnotách, jeden v 40 (či 70) keV a druhý v 70 (či 140) keV dle typu použitého přístroje (Haarbo et al., 1991; Pietrobelli et al., 1996). Výsledkem rozdílných atenuačních koeficientů je rozdělení na základě vhodných modelů a relativní atenuace do složek na kost, tuk a tukuprostou tkáň (*lean soft tissue*) (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009; Gallagher et al., 2013; Pietrobelli et al., 1996), přičemž tak činí se stále zvyšující se spolehlivostí (Blake & Fogelman, 2010; Kohrt, 1998; Mazess et al., 1989; Nana et al., 2015). Výsledné hodnoty obou paprsků jsou porovnány se známou hodnotou hustoty, kdy dochází k výpočtu a následnému vytvoření 2D obrazu pro každý pixel obrazu na jeden ze tří uvedených kompartmentů (Cullum et al., 1989; Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009; Mazess et al., 1989).

Jednotlivé složky těla přístroj měří tak, že mění hloubku skenování v závislosti na tloušťce tkání měřeného jedince a je tedy nezbytné provést korekci na velikost těla u každého jedince (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009). Zde je ale potřeba zmínit, že korekce tloušťky je odhadována na základě věku, výšky postavy a hmotnosti jedince, což může představovat úskalí ve spolehlivosti měření složení těla (Williams et al., 2006). V současné době jsou na světě tři výrobci duální rentgenové absorpciometrie Lunar (GE Healthcare), Hologic a Norland (Swissray) (Laskey, 1996; Lewiecki et al., 2016). U každého z nich byly zaznamenány rozdílné odhady složení těla a výsledky přístrojů nelze kombinovat mezi sebou (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009; Laskey, 1996). Prokázány byly také odlišné výsledky ve složení těla od stejného výrobce, stejného softwaru, avšak jiného přístroje dané značky (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009).

Hodnocení výsledků z duální rentgenové absorpciometrie obsahuje dva stupně. Prvním stupněm je výpočet absolutního množství minerálních látek, který je udáván v gramech (Cullum et al., 1989) a následně je absolutní množství minerálních látek vyděleno jednotkou plochy (Laskey et al., 1991; Kanis et al., 2008; Cullum et al., 1989). Výsledky měření kostní tkáně jsou pak udávány v jednotkách gramu na centimetr čtvereční, protože je vytvořen 2D obraz (Laskey et al., 1991; Kanis et al., 2008). Druhým stupněm je pak převod hustoty kostní tkáně na T a Z-skóre. Výsledky měření obou paprsků jsou porovnány s tabulkovými hodnotami hustoty kostní tkáně Světové zdravotnické organizace (*World Health Organization*, WHO) a skórovány, přičemž máme k dispozici dvojici výsledků, skládajících se z T-skóre a Z-skóre (Pisani et al., 2013). Odchylku od naměřené hodnoty při porovnání s tabulkovou hodnotou WHO mladé populace (BMD vrchol, 20-30 let) udává T-skóre, jenž je měřítkem úbytku kostní hustoty od rané dospělosti (Binkovitz & Henwood, 2007; Lim et al., 2004; Pisani et al., 2013). Jako kritická byla při měření stanovena hodnota  $-1$ . V případě hodnoty nižší než  $-1$  (např.  $-1,1$ ), lze již hovořit o osteopenii (řidnutí kosti) (Garg & Kharb, 2013). Pokud je hodnota T-skóre nižší než  $-2,5$ , můžeme již hovořit o osteoporóze (Garg & Kharb, 2013). Po výpočtu T-skóre je ještě výsledek porovnán s kontrolní skupinou stejného pohlaví, věku a populace (národnosti, etnika), čímž se vytváří Z-skóre (Garg & Kharb, 2013; Pisani et al., 2013).

Výhodou duální rentgenové absorpciometrie je nižší dávka rentgenového záření (Lewis et al., 1994) oproti například klasickému rentgenovému vyšetření CT (*computed tomography scan*) (Pisani et al., 2013). Radiační dávka DEXA činí zhruba  $0,001\text{mSv}$  (Laskey et al., 1991; Lewis et al., 1994). Díky nízké radiační dávce a krátkému času nutnému (Wahner, 1989) ke skenování se DEXA stala „zlatým standardem“ v diagnostice problémů spojených s kostmi

(Pisani et al., 2013), a to i přes její negativa v podobě stále přítomné radiační dávky, vysoké ceny přístroje, velikosti přístroje a náročnosti údržby (Pisani et al., 2013). Právě kvůli stále přítomné nutnosti vystavení ionizujícímu záření však není DEXA využitelná pro preventivní celoplošný screening populace (Pisani et al., 2013). Dávka je však tak nízká, že lze přístroj využít pro občasné skenování zdravých dobrovolníků (Pomeroy et al., 2019), jak k tomu bylo i v případě našeho testovacího souboru (Jandacka et al., 2020).

## 1.5. Změny ve složení těla v průběhu života

Složení těla se v různých etapách života mění a je charakterizováno jevy jako ztráta svalové hmoty (sarkopenie), nárůstu tukové tkáně, úbytkem kostní hustoty (osteopenie a osteoporóza), ale také změnami množství vody v těle (Andreoli et al., 2009; Coin et al., 2008; Evans & Campbell, 1993; Gallagher et al., 2013; Chen et al., 2007; Chumlea et al., 2002; Johansson et al., 1993; Junno et al., 2018; Nana et al., 2015; Seidell & Visscher, 2000; St-Onge et al., 2004; Thomson et al., 2007).

V průběhu celého života se celková hmotnost mění a to ať v závislosti růstu jako takového, či změn složení samotného těla (Forbes, 1987; Gallagher et al., 2013; Chumlea et al., 2002; Junno et al., 2018; Kyle et al., 2004). Ke změnám dochází také ve stáří, kdy se nejčastěji mění poměr tuku a svalové hmoty (Andreoli et al., 2009; Evans & Campbell, 1993). Některé práce naznačují, že se celková hmotnost jedince zvyšuje do sedmdesáti let a od té doby má tendenci klesat (Gallagher et al., 2013). Jednotlivé složky těla však stejný trend nárůstu tělesné hmotnosti nesdílí. Tukuprostá tkáň systematicky narůstá během vývoje až do zhruba čtyřiceti let, kdy začne ubývat (Chumlea et al., 2002; Junno et al., 2018; Kyle et al., 2004). Úbytek tukuprosté tkáně je charakterizován úbytkem sil, přičemž je svalová hmota, jakožto součást tukuprosté tkáně, v průběhu času nahrazována hmotou tukovou (Chumlea et al., 2002), a to především u mužů (Baumgartner, 2000; Chumlea et al., 2002; St-Onge et al., 2004). Z tohoto důvodu je často u mužů úbytek celkové hmotnosti „maskován“ pouze nahrazením jiné složky těla (Baumgartner, 2000; St-Onge et al., 2004). Zvyšování množství tukové tkáně lze tedy výrazně pozorovat od čtyřiceti let, až do začátku šedesátky (Kyle et al., 2004). V průběhu šestého desetiletí života s přibývajícím věkem množství tukové tkáně klesá (Kyle et al., 2004). Jiná práce však zaznamenala pouze nepatrné snížení tukové tkáně po šesté dekádě života (Seidell & Visscher, 2000). Seidell a Visscher v roce 2000 konstatovali, že mnohé antropometrické údaje nevhodně zachycují změny ve složení těla a nedokáží specifikovat a vysvětlit distribuci tuku ve spojení se stárnutím (Seidell & Visscher, 2000). V roce 2001 taktéž Wang s kolektivem

prokázali relativní zvýšení tukové tkáně v souvislosti s přibývajícím věkem. Množství svalstva, součásti tukuprosté tkáně, bylo nižší jak u mužů, tak u žen, v porovnání s mladšími jedinci (Wang et al., 2001). U mužů je vrchol množství tukuprosté tkáně dříve než u žen, přičemž některé studie dokonce naznačují, že úbytek tukuprosté tkáně je v pozdějších letech u mužů strmější než u žen (Gallagher et al., 2013).

Důležitým faktorem celkové hmotnosti je množství fyzické aktivity, které aktivně limituje či zcela zamezuje zvyšování tukové tkáně, snižuje rychlost úbytku tukuprosté tkáně a s ní snižuje výskyt mortalit (Kyle et al., 2004). Nadváha či obezita ve spojitosti s nedostatkem fyzické aktivity vede přímo ke zvýšení mortality jedince (Berrington De Gonzalez et al., 2010; Lee et al., 1999). Fyzická aktivita přímo ovlivňuje metabolická rizika a s ním spojené výskyty chronických onemocnění (Evans & Campbell, 1993; Semanick et al., 2005; Thune et al., 1998). Důležitým poznatkem je, že spíše než tělesná hmotnost jako taková je tělesné složení klíčovým ukazatelem při výskytu kardiovaskulárních onemocnění (Segal et al., 1987). V této publikaci byl také prokázán zvýšený výskyt hypertenze a cukrovky u jedinců s vyšším množstvím tuku v těle (Segal et al., 1987). Byl pozorován také vliv fyzické aktivity na BMI, kdy byl index tělesné hmotnosti prokazatelně vyšší u neaktivní skupiny oproti skupině aktivní (Kyle et al., 2004). Zároveň měli fyzicky aktivní ženy i muži nižší hmotnost, hodnotu BMI i procentuální zastoupení tuku v těle než neaktivní kontroly (Kyle et al., 2004). Index tělesné hmotnosti lze vypočítat takto:

$$\text{Index tělesné hmotnosti (kg/m}^2\text{)} = \frac{\text{tělesná hmotnost (kg)}}{\text{výška postavy}^2 \text{ (m)}} \quad (16)$$

Obdobně jako BMI lze využít i index tukuprosté hmoty (či tkáně) (*fat-free mass index*, FFMI, případně LMI), který lze vypočítat takto:

$$\text{Index tukuprosté tkáně (kg/m}^2\text{)} = \frac{\text{tukuprostá tkáň (kg)}}{\text{výška postavy}^2 \text{ (m)}} \quad (17)$$

Lze vypočítat také index tukové hmoty (či tkáně) (*body-fat mass index*, BFMI, případně FMI), který lze vypočítat takto:

$$\text{Index tukové tkáně (kg/m}^2\text{)} = \frac{\text{tuková tkáň (kg)}}{\text{výška postavy}^2 \text{ (m)}} \quad (18)$$

Využití indexů je výhodné z toho důvodu, že berou v potaz výšku postavy jedince a umožňují tak porovnání mezi jedinci s různou výškou postavy i v různých etapách života (Kyle et al., 2004). FFMI je důležitý především z důvodu kontroly, zda je tukuprostá tkáň adekvátní tělesné hmotnosti a výšce postavy, BFMI slouží ke zhodnocení množství tukové tkáně jedince a případnému hodnocení stupně nadváhy či obezity (Baker et al., 2013; Kyle et al., 2004). Nižší úbytek tukuprosté tkáně (v rámci indexu tukuprosté tkáně) byl zaznamenán s přibývajícím věkem u aktivní skupiny mužů a žen, kde byla hodnota úbytku  $-0,007\text{kg/m}^2/\text{rok}$  oproti skupině neaktivních mužů a žen, kde hodnota činila  $-0,02\text{ kg/m}^2/\text{rok}$  (Kyle et al., 2004). FFMI i BFMI vykazují velmi cenné údaje pro hodnocení změn hmotnosti v průběhu života (Baker et al., 2013). U zdravých jedinců může totiž dojít k situaci, kdy je BMI v normálních hodnotách a FFMI bude nízký či BFMI příliš vysoký. V takovém případě lze hovořit o latentní obezitě, což je stav definovaný jako nesprávný poměr tukové a tukuprosté tkáně (Sedlak et al., 2020). Jedinec při tomto stavu ztrácí tukuprostou tkáň (dochází k ochabování svalstva) v důsledku absence fyzické aktivity (Sedlak et al., 2020). Tukuprostá tkáň je následně nahrazena tkání tukovou, což má za následek, že je jedinec dle BMI zcela v pořádku, avšak složení jeho těla je vychýleno z obvyklého (normálního) rozložení (Kyle et al., 2004; Sedlak et al., 2020).

Již zmíněný FFMI zůstal ve stáří na nižší úrovni u aktivní skupiny mužů i žen, i pokud měli nižší celkovou hmotnost a BMI oproti neaktivní skupině (Kyle et al., 2004). Aktivní jedinci z této práce měli také nízkou prevalenci vysokého nebo velmi vysokého BFMI oproti neaktivním kontrolám (Kyle et al., 2004). Na druhou stranu, některé práce naznačují, že se zvyšující se hmotností jsou nároky na mechanickou oporu vyšší, což pomáhá udržovat vyšší hodnotu kostní minerální hustoty pomocí snížené resorpce kosti, i když je resorpce kostí pod silnou genetickou regulací (Nguyen et al., 1998; Reid, 2002). Hodnota kostní hustoty je ale velmi individuální, což bylo specificky prokázáno například pro kost stehenní (Marshall et al., 2006).

Svou roli v složení těla hraje zajisté i pohlaví. Muži mají v dospělosti obvykle 10-15 procent tukové tkáně a ženy 20–25 procent (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009), nicméně panuje velká interindividuální variabilita (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009; St-Onge et al., 2004). Všechny ženy ze studie St-Onge a kolektivu z roku 2004 měly více tuku než jejich mužské protějšky. Zvýšení adipozity v průběhu života vysvětluje St-Onge a kolektiv atrofováním orgánů, které zapříčiňuje zvýšení množství extracelulární tekutiny a kolagenu, načež se buněčná hmota objemově zmenšuje (St-Onge et al., 2004). Obdobně pak jihokorejská práce z roku 2004 došla k závěrům, že se množství tukuprosté tkáně u žen společně s tukovou tkání

snižovalo během života, avšak u mužů se s věkem snižovalo množství pouze tukuprosté tkáně a tuková tkáň zůstala na konstantní úrovni (Lim et al., 2004). V práci s 5252 jedinci od 15 do 98 let byl vrchol tukuprosté tkáně u mužů od 35 do 44 let a u žen od 45 do 54 let a poté začal v obou skupinách kontinuálně klesat. U tukové tkáně však docházelo k neustálému nárůstu až do 98 let (Kyle et al., 2001). Z výsledku studie tedy plyne, že vyšší zaznamenaná hmotnost u starších jedinců je způsobena především tukovou tkání (Kyle et al., 2001). Složení těla může být ovlivněno také stravou a různými dietami jako například dieta nízkosacharidová (Manninen, 2006). Z hlediska odhadu složení těla, potažmo přímo tukuprosté tkáně mohou nadhodnocovat výsledky také kovové implantáty, a to právě při využití duální rentgenové absorpciometrie (Jang et al., 2023).

Změny spojené se složením těla v průběhu života mohou být různé také v rámci populací v důsledku etnických i kulturních odlišností (Deurenberg & Deurenberg-Yap, 2009; Gallagher et al., 2013; Kyle et al., 2001; Lim et al., 2004). Toto tvrzení bylo prokázáno i v práci Junno a kolektivu z roku 2018. Skupina industrializovaných mužů i skupina neindustrializovaných mužů vykazovaly jak u tukové, tak u tukuprosté tkáně obecně podobný průběh během celého života, avšak vrcholu dosahovaly obě skupiny v odlišných desetiletích. Obě skupiny taktéž odlišovala rychlost úbytku tukuprosté tkáně a ke konci života dokonce množství tukové tkáně klesalo (Junno et al., 2018). Rozdíly ve složení těla byly pozorovány i u odlišných západních industrializovaných populací (Wagner & Heyward, 2000). U Afroameričanů v USA byla pozorována vyšší množství kostních minerálů a vyšší množství tukuprosté tkáně vůči tkáni tukové než u Američanů evropského původu (Wagner & Heyward, 2000).

Lze tedy pozorovat, že studie naznačují, že se složení těla může lišit v závislosti na fyzické aktivitě, cvičení, pohlaví, věku, ale také populaci či měřících přístrojů a je tedy obecně velmi variabilní.

## 1.6. Analýza a omezení dosavadních poznatků

Správný odhad hmotnosti těla z kostry je klíčový ať už pro paleoantropologické či forenzní účely. Odhad hmotnosti těla z kostry se ale zdá být ovlivněn složením těla, které se v průběhu života mění.

Předchozí práce, které se na problematiku odhadu hmotnosti těla z kostry zaměřují se taktéž shodují, že je patrný vliv BMI na odhad tělesné hmotnosti u současné populace (Chevalier et al., 2016, 2018; Junno et al., 2018; Lacoste Jeanson et al., 2017; Lorkiewicz-Muszyńska et al.,

2013; Pomeroy et al., 2019; Ruff et al., 2024; Schaffer, 2016; Schaffer & Dunn, 2018) a naznačují tak, že by složení těla či věk mohly být klíčové faktory pro spolehlivý odhad hmotnosti těla z kostry.

Procentuální zastoupení tuku v těle je v souvislosti s chybou odhadu hmotnosti zmíněno v práci Schaffera z roku 2016. V práci jsou však testováni pouze jedinci mladí a se zdravým množstvím tuku v těle. Jako zdravá hodnota tuku v těle byla v práci stanovena maximální hodnota 25 % pro muže a 32 % pro ženy (Schaffer, 2016). Autor práce z výsledků také usuzuje, že morfometrickou metodu STBIB je možné využít pouze za předpokladu, že je procentuální podíl tuku nižší než stanovené maximální zdravé hodnoty. Zároveň v diskusi této práce zmiňuje, že při použití u jedinců starších či s vyšším podílem tuku se chyba odhadu bude nejspíše zvyšovat (Schaffer, 2016). Podporuje však morfometrickou metodu STBIB, která dle výsledků práce poskytuje spolehlivé výsledky odhadu hmotnosti těla z kostry, pokud je v určitém rozmezí BMI, podílu tuku a věku (Schaffer, 2016). O dva roky později pak Schaffer a Dunn ve své práci testovali opět morfometrickou metodu STBIB a podpořili svá předchozí tvrzení, že celkovou hmotnost lze odhadovat spolehlivě pouze v rozmezí BMI 18,5–30 kg/m<sup>2</sup> pro muže a 18,5–25 kg/m<sup>2</sup> pro ženy (Schaffer & Dunn, 2018). Procentuálnímu zastoupení tuku v těle je věnována pozornost také v práci Chevaliera a kolektivu z roku 2018. V této práci se naopak pomocí mechanických metod FHD Chevalier a kolektiv snažili najít faktory, které ovlivňují spolehlivost odhadu hmotnosti u starších jedinců se známou hmotností (Chevalier et al., 2018). Došli k závěru, že lze nalézt korelaci mezi průměrem hlavice a tukuprostou tkání, avšak tkání tukovou nikoliv. Ve své předchozí práci z roku 2016 se Chevalier a kolektiv zaměřili primárně na věk a u starších jedinců testovali odhad hmotnosti. Z výsledků autoři usuzují, že průměrnou hmotnost lze odhadnout s vysokou mírou spolehlivosti, avšak individuální odhad hmotnosti je spolehlivý méně (Chevalier et al., 2016). Nejvyšší spolehlivost byla zaznamenána taktéž u normálního rozložení BMI (Chevalier et al., 2016). Autoři také konstatují, že pokud je dostupná předchozí znalost biologického věku a celkového vzezření, mohl by být odhad hmotnosti zajímavým parametrem pro identifikaci osob ve forenzním kontextu (Chevalier et al., 2016). Obě práce Chevaliera a kolektivu z roku 2016 i 2018 byly ale zaměřeny pouze na starší jedince a pro odhad hmotnosti využívaly pouze mechanické metody FHD.

Pro forenzní účely vznikla v roce 2013 i práce Lorkiewicz-Muszyńské a kolektivu, ve které se autoři snažili odhadnout hmotnost pomocí morfometrických i mechanických metod. Výsledky této práce naznačují, že výsledky odhadů hmotnosti obou typů metod korelují se

skutečnou hmotností v normálním rozmezí BMI, ale v případě podváhy či obezity byly výsledky nespolehlivé (Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013). Naznačují tak, že je patrný vliv podílu tuku v těle, ačkoliv procentuální zastoupení tuku v těle přímo nezkoumali. Druhá forenzní práce, zaměřující se na to, zda je možné použít metody odhadu hmotnosti těla z kostry pro individuální odhad, byla publikována v roce 2017 autory Lacoste Jeanson a kolektivem. V této práci proběhlo srovnání dostupných metod odhadu hmotnosti těla z kostry. Autoři z výsledků usuzují, že žádná z testovaných metod není schopna odhadnout hmotnost do takové míry, aby byla kterákoliv metoda vhodná pro individuální odhad ve forenzním kontextu (Lacoste Jeanson et al., 2017) a připojuje se tak k podobným závěrům, které konstatoval Chevalier a kolektiv v roce 2016.

Z části v reakci na publikaci Lacoste Jeanson a kolektivu z roku 2017 vytvořil Ruff a kolektiv v roce 2024 nové morfometrické rovnice odhadu hmotnosti těla z kostry, které by měly spolehlivěji odhadovat hmotnost na moderní populaci, kde je vyšší rozložení BMI. Ruff a kolektiv se snažili touto prací vyvrátit, že nelze použít morfometrickou metodu STBIB pro individuální odhad na současné populaci. Z výsledků práce je patrné, že v normálním rozmezí BMI byla chyba odhadu hmotnosti přibližně 1 % a nové rovnice jsou tak schopny odhadovat hmotnost i na moderní populaci s průměrným vyšším zastoupením tuku v těle (Ruff et al., 2024). V práci Junno a kolektivu (2018) byla také využita morfometrická metoda STBIB a bylo konstatováno, že u jedinců s nízkým procentem tuku v těle efektivně predikuje hmotnost do 50 let života. Od 50. roku života začíná morfometrická metoda nadhodnocovat a nadhodnocuje více s přibývajícím věkem (Junno et al., 2018). Studium vlivu věku na chybu odhadu morfometrické metody bylo ale provedeno v práci Junno et al. (2018) pouze na mužích. Zdá se však, že morfometrická metoda může za určitých podmínek poskytnout velmi spolehlivé výsledky odhadu hmotnosti těla z kostry i na současné populaci.

Jelikož lze duální rentgenovou absorpciometrii využít k odhadu složení těla, samotné snímky by pak bylo možné využít k měření kosterních rozměrů, které by bylo možné aplikovat na publikované rovnice odhadu hmotnosti těla z kostry a zjistit tak, jaký je vztah mezi odhady hmotnosti jednotlivých rovnic a složením těla. Jedna práce, zaměřující se na odhad hmotnosti těla ze snímků duální rentgenové absorpciometrie již byla publikována Pomeroy a kolektivem v roce 2019. Soubor byl v publikaci tvořen indickou populací. Využity byly ale pouze metody mechanické, a to průměr hlavice stehenní kosti. Výsledky poskytly podobné odhady jako tradiční antropometrické metody při měření průměru hlavice stehenní kosti. Průměrná procentuální chyba odhadu hmotnosti se pohybovala okolo 15 % (Pomeroy et al., 2019).

Autorka se také snažila vytvořit rovnice čistě pro odhad jednotlivých složek těla (tukové a tukuprosté tkáně). Chyba odhadu rovnice pro tukuprostou tkáň činila 15 %, avšak pro tukovou tkáň byla chyba odhadu vyšší než 35 % (Pomeroy et al., 2019). Práce studovala pouze mladé dospělé jedince a ukázala, že ani u nich množství tuku nekoreluje s průměrem hlavice stehenní kosti, což indikuje, že u jedinců s vyšším podílem tuku v těle bude větší chyba odhadu hmotnosti těla, protože hlavice efektivně reflektuje pouze tukuprostou tkáň. Jde ale tyto výsledky na malém souboru subsistenčních zemědělců s nízkým BMI vztáhnout také na západní populace?

Mnohé práce, které se problematice dříve věnovaly, byly omezené počtem jedinců v souboru či byly zaměřeny pouze na úzkou škálu jedinců omezených populačně, věkem či podílem tuku. Žádná studie dosud nevyužila snímky z duální rentgenové absorpciometrie k měření kosterních rozměrů pro oba typy metod odhadu hmotnosti těla z kostry a neporovnála výsledné odhady hmotnosti publikovaných rovnic s jednotlivými složkami těla, celkovou hmotností a příslušnými indexy.

## 2. Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zjistit, jaké má složení těla vliv na odhad hmotnosti těla z kostry. Konkrétně nás zajímá, zda a případně jak bude chyba odhadu hmotnosti těla z kostry ovlivněna podílem tuku v těle.

Vliv složení těla na odhad hmotnosti bude otestován na souboru fyzicky aktivních a neaktivních dospělých jedinců. Aktivní dospělí poslouží jako model pro minulé populace, jelikož je ve skupině vyšší výskyt atletických jedinců s vyšším množstvím pohybu. Neaktivní dospělí poslouží jako model pro současnou západní populaci, kde je vyšší prevalence jedinců s nadváhou či obezitou.

Jelikož se složení těla v průběhu života mění, bude nás zajímat, jak se v souvislosti s věkem mění tělesné složení a chyba odhadu hmotnosti u aktivní a neaktivní části souboru a mezi pohlavími.

Srovnáme všechny pohlavně nespecifické a pohlavně specifické rovnice a bude nás zajímat, kterou rovnici je tedy vhodnější používat na moderních industrializovaných populacích, potažmo přímo na české populaci.

### 3. Materiál a metody

#### 3.1. Soubor

Materiál pro tuto práci tvořili účastníci projektu 4HAIE (*Healthy Aging in Industrial Environment – Program 4*), který byl schválen Etickou komisí Ostravské univerzity (3/2018) (Cipryan et al., 2020; Jandacka et al., 2020). Projekt byl primárně zacílen na výzkum pravidelného běhu ve znečištěném prostředí a s ním spojená rizika (Jandacka et al., 2020). Účastníci projektu byli vybráni z dvou krajů České republiky – Moravskoslezského kraje, kde je vysoká koncentrace škodlivin v ovzduší a Jižních Čech, kde je koncentrace škodlivin ze všech krajů nejnižší (Cipryan et al., 2020). Podmínkou bylo setrvání v jednom z daných krajů minimálně posledních pět let před zahájením programu (Cipryan et al., 2020; Jandacka et al., 2020). Kompletní testovací soubor čítal data o 1320 jedincích. Někteří jedinci ( $n = 44$ ) byli z celkového původního datasetu vyřazeni z důvodu endoprotéz či neostrých snímků duální rentgenové absorpciometrie, na kterých nebylo možné zajistit kosterní rozměry pro tuto diplomovou práci. Po vyřazení jedinců byla pro tuto diplomovou práci využita data 1276 jedinců z nichž bylo 699 mužů a 577 žen (Tabulka 2). Všichni jedinci byli dospělí (18–65 let), nekuřáci, schopni normální přirozené fyzické aktivity (Kutac et al., 2021). Celou skupinu společně z obou krajů tvořili aktivní běžci (6 týdnů pravidelného běhání), kterých bylo 734 a druhou část tvořili neaktivní zdraví jedinci, kterých bylo dohromady 542. Soubor jsme následně rozdělili dle pohlaví na aktivní a neaktivní skupiny (Tabulka 3).

Tabulka 2. Charakteristika souboru – muži ( $n = 699$ ), ženy ( $n = 577$ )

|                                                    | Pohlaví | Průměr | Směrodatná<br>odchylka | Minimum | Maximum |
|----------------------------------------------------|---------|--------|------------------------|---------|---------|
| Věk<br>(roky)                                      | Muži    | 37,9   | 12,39                  | 18      | 65      |
|                                                    | Ženy    | 37,9   | 12,64                  | 18      | 65      |
| Výška postavy<br>(cm)                              | Muži    | 180,5  | 6,57                   | 164,4   | 201,6   |
|                                                    | Ženy    | 167,9  | 6,15                   | 148,5   | 188,7   |
| Hmotnost těla<br>(kg)                              | Muži    | 81,8   | 11,78                  | 50,3    | 127,4   |
|                                                    | Ženy    | 67,2   | 12,46                  | 40,5    | 123,5   |
| Index tělesné<br>hmotnosti<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Muži    | 25,1   | 3,34                   | 16,6    | 42,9    |
|                                                    | Ženy    | 23,8   | 4,17                   | 16,0    | 49,2    |

Tabulka 3. Charakteristika jednotlivých skupin souboru – muži aktivní (n = 440), muži neaktivní (n = 259), ženy aktivní (n = 294), ženy neaktivní (n = 283)

|                                                    | Pohlaví /<br>Skupina | Průměr | Směrodatná<br>odchylka | Minimum | Maximum |
|----------------------------------------------------|----------------------|--------|------------------------|---------|---------|
| Věk<br>(roky)                                      | Muži, Aktivní        | 37,15  | 11,56                  | 18      | 65      |
|                                                    | Muži, Neaktivní      | 39,29  | 13,62                  | 18      | 65      |
|                                                    | Ženy, Aktivní        | 36,29  | 11,26                  | 18      | 65      |
|                                                    | Ženy, Neaktivní      | 39,61  | 13,75                  | 18      | 65      |
| Výška postavy<br>(cm)                              | Muži, Aktivní        | 180,47 | 6,47                   | 164,4   | 201,6   |
|                                                    | Muži, Neaktivní      | 180,51 | 6,75                   | 164,5   | 200,5   |
|                                                    | Ženy, Aktivní        | 168,36 | 5,86                   | 152,4   | 188,7   |
|                                                    | Ženy, Neaktivní      | 167,39 | 6,4                    | 148,5   | 184,6   |
| Hmotnost těla<br>(kg)                              | Muži, Aktivní        | 79,48  | 9,84                   | 53,90   | 107,90  |
|                                                    | Muži, Neaktivní      | 85,86  | 13,60                  | 50,30   | 127,40  |
|                                                    | Ženy, Aktivní        | 64,18  | 10,2                   | 40,5    | 101,7   |
|                                                    | Ženy, Neaktivní      | 70,25  | 13,8                   | 46,7    | 123,5   |
| Index tělesné<br>hmotnosti<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Muži, Aktivní        | 24,38  | 2,56                   | 17,04   | 32,28   |
|                                                    | Muži, Neaktivní      | 26,36  | 4,07                   | 16,58   | 42,95   |
|                                                    | Ženy, Aktivní        | 22,59  | 3,07                   | 15,97   | 35,73   |
|                                                    | Ženy, Neaktivní      | 25,08  | 4,75                   | 17,56   | 49,23   |
| Průměr hlavice<br>stehenní kosti<br>(mm)           | Muži, Aktivní        | 49,90  | 2,69                   | 40,45   | 57,67   |
|                                                    | Muži, Neaktivní      | 49,58  | 2,88                   | 42,89   | 57,34   |
|                                                    | Ženy, Aktivní        | 44,13  | 2,34                   | 38,37   | 52,91   |
|                                                    | Ženy, Neaktivní      | 44,55  | 2,63                   | 37,94   | 52,19   |
| Bi-cristální<br>šíře<br>(cm)                       | Muži, Aktivní        | 26,14  | 1,50                   | 21,40   | 31,10   |
|                                                    | Muži, Neaktivní      | 26,07  | 1,50                   | 21      | 30,40   |
|                                                    | Ženy, Aktivní        | 25,46  | 1,54                   | 21,50   | 29,40   |
|                                                    | Ženy, Neaktivní      | 25,19  | 1,58                   | 20,30   | 29,10   |

### 3.2. Antropometrie a složení těla

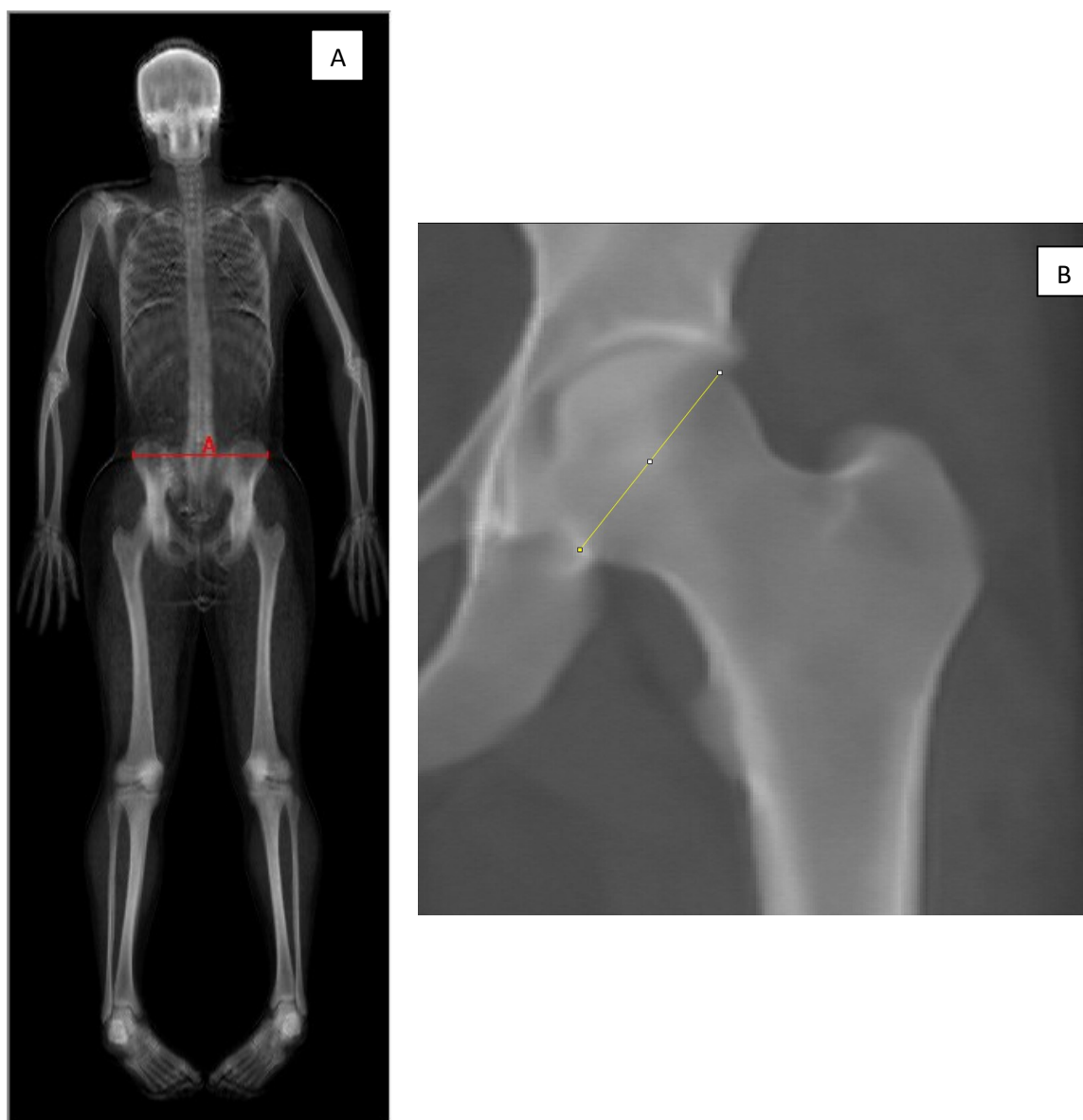
Dodané informace o jednotlivých účastnících projektu obsahovaly data o jejich pohlaví, věku, výšce postavy, tělesné hmotnosti, hmotnosti tukové tkáně, hmotnosti tukuprosté tkáně a procentuálního zastoupení tuku v těle. Původní měření probandů probíhalo v ranních hodinách. Probandi byli oblečeni pouze v krátkých kalhotách, v triku a byli bez bot. Výška postavy byla změřena stadiometrem InBody BSM 370 (Biospace, Jižní Korea) (Cipryan et al., 2020; Kutáč et al., 2019). Hmotnost těla a množství vody bylo změřeno diagnostickým přístrojem InBody 770 (Biospace, Jižní Korea) (Cipryan et al., 2020). Ke zjištění složení těla pomocí duální rentgenové absorpciometrie (DEXA) byl využit kostní denzitometr Hologic Horizon A (Hologic Discovery A, Waltham, Massachusetts, USA) (Cipryan et al., 2020; Kutáč et al., 2019). Pomocí denzitometru byly u každého jedince pořízeny snímky celého těla, kyčlí a lumbálních obratlů. Pro tuto práci byly využity snímky celého těla a obou kyčlí.

### 3.3. Měření kosterních rozměrů

K vlastnímu měření kosterních rozměrů jsme využili dodané snímky z duální rentgenové absorpciometrie a program Hologic APEX Software (verze 5.6.1. rev 015) vyvinutý společností Hologic Inc. (Hologic Discovery A, Waltham, Massachusetts, USA). Pro mechanické rovnice jsme měřili průměr hlavic (levé i pravé) stehenních kostí a pro morfometrické rovnice jsme měřili bi-cristální šíři. Bi-cristální šíři měříme jako nejvzdálenější spojnicí bodů *crista iliaca* (P2) (Stloukal, 1999). Měření bi-cristální šíře jsme provedli v programu APEX pomocí funkce „Ruler“ s přesností na desetinu centimetru (Obrázek 6A).

Průměr hlavice stehenní kosti jsme měřili jako svislý průměr hlavice stehenní kosti kolmý na osu krčku (F18) (Stloukal, 1999). Metoda průměru hlavice stehenní kosti byla v naší práci využita z důvodu kvalitního snímku v oblasti kyčle, při kterém bylo možné průměr změřit. Celotělový snímek neměl dostatečné rozlišení, abychom mohli otestovat rovnice založené na rozměrech jako je průměr hlavice stehenní kosti. Nebylo by tedy možné změřit průměr hlavice stehenní kosti skrze program APEX. Z důvodu absence funkce „Ruler“ v programu Hologic APEX Software u snímků zaměřených na kyčle jsme pro měření na snímcích kyčlí využili program ImageJ. Pro vizualizaci DEXA snímků v jiném programu byl do ImageJ vložen plugin Hologic P Reader, který vytvořil profesor X. Neil Dong, Ph.D. z University of Texas at Tyler (Department of Health and Kinesiology). V záložce „Plugins“ jsme skrze „Hologic P Reader“

otevřeli vždy konkrétní snímek. Následně jsme skrze funkci „*Straight*“ změřili průměr hlavice stehenní kosti. Udaný rozměr však byl pouze v pixelech daného snímku. Proto jsme využili program APEX, kde jsme u snímků zaměřených na kyčle využili možnost měření plochy. Změřili jsme plochu celkového snímku a velikost byla zaznamenána v milimetrech čtverečních. Snímky kyčlí měly všechny stejný rozměr. Poměr pixelů vůči milimetrům činil 2:1. Jeden pixel tedy odpovídal v našem měřítku 0,5 mm skutečného obrazu ( $1 \text{ px} = 0,5 \text{ mm}$ ). Z kyčelních snímků byl tedy změřen průměr hlavice stehenní kosti v pixelech (Obrázek 6B) a výsledek vydělen dvěma, čímž jsme dostali hodnotu v milimetrech. Totéž bylo provedeno pro druhou kyčel a oba rozměry průměrů levé i pravé hlavice stehenní kosti byly zaneseny do tabulky a spárovány se zbylými daty, které byly o jedincích dodány.



**Obrázek 7.** Měření kosterních rozměrů z DEXA snímků: bi-cristální šíře (A), průměr hlavice stehenní kosti (B)

### 3.4. Odhad hmotnosti těla z kostry

Tělesná hmotnost jedince byla odhadována pomocí dříve publikovaných rovnic, do kterých byly dosazeny námi změřené kosterní rozměry. Námi změřené hodnoty jsme dosadili do celkem 14 mechanických (Tabulka 4) a 9 morfometrických rovnic (Tabulka 5).

Do mechanických rovnic byla dosazena velikost hlavičky stehenní kosti v milimetrech. Do morfometrických rovnic byla bi-cristální šíře dosazena v centimetrech a výška postavy také v centimetrech. Hmotnost těla byla u pohlavně nespecifických morfometrických rovnic vypočtena jako hmotnost těla z mužské a ženské rovnice a z obou výsledků pohlavně specifických rovnic byl vypočítán průměr.

Tabulka 4. Seznam použitých mechanických rovnic

| Publikace            | Pohlavně nespecifické             | Pohlavně specifické                |                                    |
|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|                      | Muži + Ženy                       | Muži                               | Ženy                               |
| Ruff et al. 1991     | $2,160 \times \text{FHD} - 24,8$  | $2,741 \times \text{FHD} - 54,9$   | $2,426 \times \text{FHD} - 35,1$   |
| McHenry, 1992        | $2,239 \times \text{FHD} - 39,9$  | -                                  | -                                  |
| Grine et al. 1995    | $2,268 \times \text{FHD} - 36,5$  | -                                  | -                                  |
| Ruff et al. 2012     | $2,300 \times \text{FHD} - 41,72$ | $2,800 \times \text{FHD} - 66,7$   | $2,180 \times \text{FHD} - 35,8$   |
| Elliott et al. 2016b | $1,33 \times \text{FHD} - 0,38$   | $1,57 \times \text{FHD} - 0,78$    | $0,82 \times \text{FHD} - 0,47$    |
| Sládek et al. 2018   | $2,295 \times \text{FHD} - 41,7$  | $2,851 \times \text{FHD} - 70,572$ | $2,280 \times \text{FHD} - 40,142$ |

FHD = průměr hlavičky stehenní kosti (v milimetrech)

Tabulka 5. Seznam použitých morfometrických rovnic

| Publikace        | Pohlavně nespecifické | Pohlavně specifické                                        |                                                            |
|------------------|-----------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                  |                       | Muži                                                       | Ženy                                                       |
| Ruff et al. 1997 | Průměr M+Ž            | $0,373 \times \text{ST} + 3,033 \times \text{BI}^a - 82,5$ | $0,522 \times \text{ST} + 1,809 \times \text{BI}^a - 75,5$ |
| Ruff et al. 2005 | Průměr M+Ž            | $0,422 \times \text{ST} + 3,126 \times \text{BI}^a - 92,9$ | $0,504 \times \text{ST} + 1,804 \times \text{BI}^a - 72,6$ |
| Ruff et al. 2024 | Průměr M+Ž            | $0,711 \times \text{ST} + 1,857 \times \text{BI}^b - 102$  | $0,708 \times \text{ST} + 1,527 \times \text{BI}^b - 93,8$ |

Průměr M+Ž = průměr z pohlavně specifických rovnic dané publikace

BI = bi-cristální šíře (v centimetrech)

ST = výška postavy (v centimetrech)

<sup>a</sup>Převod ze skeletální (SBI) na živoucí bi-cristální šíři (BI) pomocí  $\text{BI} = 1,17 \times \text{SBI} - 3$

<sup>b</sup>Převod ze skeletální (SBI) na živoucí bi-cristální šíři (BI) pomocí  $\text{BI} = 1,085 \times \text{SBI} - 1,5$

### 3.5. Provedené analýzy

Jako první jsme počítali chybu měření, kterou lze vidět v Tabulce 6. Chyba měření byla vypočtena z DEXA snímků prvních 100 jedinců souboru měřených dvakrát s odstupem hodiny.

Tabulka 6. Chyba měření DEXA snímků vypočtená z opakovaného měření, n = 100

|                   | Průměrný<br>rozdíl<br>MD (mm) | Průměrný<br>absolutní<br>rozdíl<br>MAD (mm) | Procentuální<br>průměrný<br>rozdíl<br>MD (%) | Procentuální<br>průměrný<br>absolutní rozdíl<br>MAD (%) |
|-------------------|-------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Bi-cristální šíře | 0,530±0,953                   | 0,950±0,953                                 | 0,205±0,481                                  | 0,369±0,371                                             |
| Levá kyčel        | -0,320±1,060                  | 0,880±0,673                                 | -0,687±2,280                                 | 1,881±1,460                                             |
| Pravá kyčel       | 0,037±1,190                   | 0,848±0,835                                 | 0,130±2,548                                  | 1,806±1,802                                             |

průměr±standardní odchylka (SD)

Průměrný rozdíl (MD) jsme vypočítali pomocí rovnice:

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{první měření} - \text{druhé měření})}{n} \quad (19)$$

Průměrný absolutní rozdíl (MAD) jsme vypočítali pomocí rovnice:

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n ABS| \text{první měření} - \text{druhé měření}|}{n} \quad (20)$$

Procentuální průměrný rozdíl (MD%) jsme vypočítali pomocí rovnice:

$$MD\% = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{(\text{první měření} - \text{druhé měření})}{\left( \frac{(\text{první měření} + \text{druhé měření})}{2} \right)} \right) \times 100}{n} \quad (21)$$

Procentuální průměrný absolutní rozdíl (MAD%) jsme vypočítali pomocí rovnice:

$$MAD\% = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{ABS| \text{první měření} - \text{druhé měření}|}{ABS \left| \frac{(\text{první měření} + \text{druhé měření})}{2} \right|} \right) \times 100}{n} \quad (22)$$

Měření levé a pravé kyčle bylo porovnáno párovaným t-testem. Hodnota  $p$  vychází 0,005, což znamená, že je statisticky nevýznamný rozdíl mezi levou a pravou kyčlí. Hodnota Cohenova  $D$  byla při 95 % konfidenčním intervalu v rozmezí  $-0,133$  a  $-0,023$ , což značí, že dle Cohenova  $D$  není biologicky či klinicky relevantní a má pouze malý efekt (Cohen, 2009). Rozdíl mezi levou a pravou kyčlí byl v naší práci 0,06 milimetru. Rozdíl průměru hlavice stehenní kosti mezi levou a pravou byl v jiné práci potvrzen maximálně 2 milimetry (Young et al., 2013). V našem případě jsme u mechanické metody průměru hlavice stehenní kosti měřili levou i pravou hlavici zvlášť a následně použili na jednom jedinci pro dosažení do rovnic průměr rozměrů obou hlavic.

Jako první měření jsme vypočítali procentuální chybu odhadu hmotnosti u každé použité rovnice. Procentuální chybu jsme vypočítali pomocí rovnice:

$$\%PE \text{ odhadu hmotnosti} = \left( \frac{(hmotnost \text{ odhadnutá} - hmotnost \text{ zvážena})}{hmotnost \text{ zvážena}} \right) \times 100 \quad (23)$$

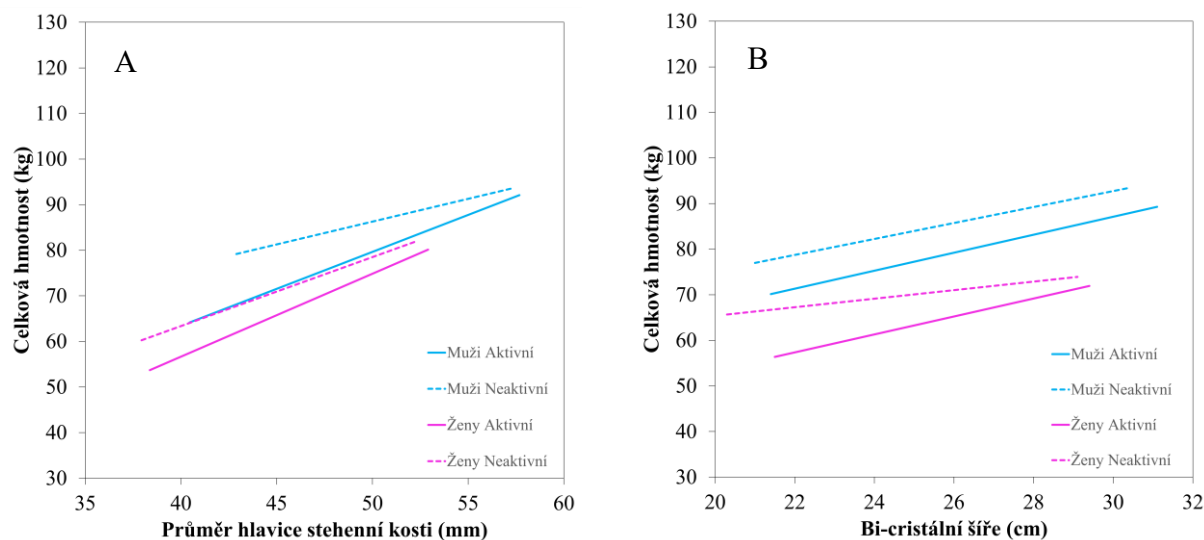
Soubor jsme dále rozdělili dle pohlaví na muže a ženy na aktivní a neaktivní skupinu. Celkem jsme měli čtyři skupiny: Muži, Aktivní; Muži, Neaktivní; Ženy, Aktivní a Ženy, Neaktivní. Odhady nesespecifických rovnic jsou tvořeny společně pro muže a ženy na našem celém testovacím souboru dle skupiny. Pohlavně specifické rovnice byly otestovány vždy jen na konkrétním pohlaví a skupině.

Procentuální chyby odhadu hmotnosti jednotlivých pohlavně nesespecifických a specifických rovnic jsme následně společně vynesli vůči reálné hodnotě hmotnosti pro aktivní skupinu a neaktivní skupinu. Jakmile jsme měli dostupné procentuální chyby odhadu jednotlivých rovnic ve všech skupinách, vztah mezi oběma proměnnými jsme testovali využitím lineární regrese a korelační analýzy. Nejdříve jsme využili analýzu lineární regrese na procentuální chybu odhadu a procentuální zastoupení tuku v těle na našem souboru mužů a žen. Analýzu lineární regrese jsme obdobně využili také na procentuální chybu odhadu a BMI na souboru aktivních a neaktivních mužů a žen. Pro jednotlivé skupiny jsme následně využili polynomickou regresi proměnných v souvislosti s věkem. Jednalo se o proměnné: tělesná hmotnost, hmotnost tukuprosté tkáně, hmotnost tukové tkáně, BMI, LMI a FMI. Následně jsme využili polynomickou regresi pro procentuální chybu odhadu spojenou s věkem na všechny čtyři skupiny. Statistické testy tedy zahrnovaly: korelační testy, lineární regresi a polynomické křivky druhého stupně.

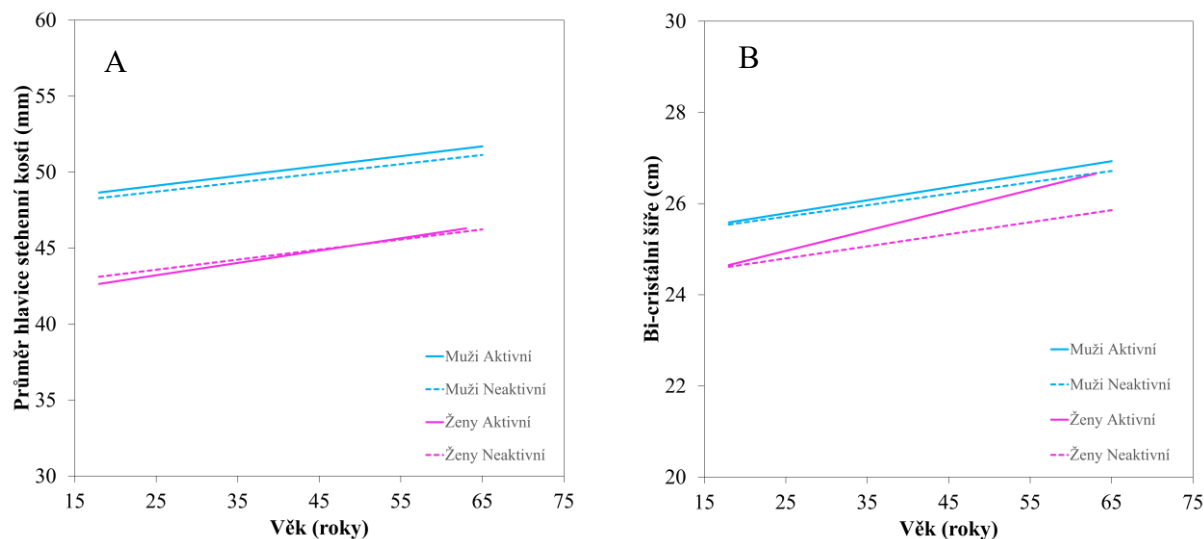
Statistická analýza byla provedena v programu Jamovi, verze 2.3.28.0. Data byla importována z listu Microsoft Excel pomocí „*Special import*“. Využity byl model Lineární regrese (*Analyses – Regression – Linear regression*). Grafy byly vytvořeny v prostředí Microsoft Excel, Verze 2406. Veškeré úpravy obrázků byly provedeny v prostředí GNU Image Manipulation Program (GIMP), verze 2.10.38.

## 4. Výsledky

Nejdříve nás zajímal vztah mezi celkovou hmotností těla a jednotlivými námi měřenými proměnnými v aktivní a neaktivní skupině. Proměnné průměr hlavice stehenní kosti a bi-cristální šíře jsme vynesli vůči celkové hmotnosti těla (Graf 1) a nadále vůči věku (Graf 2).



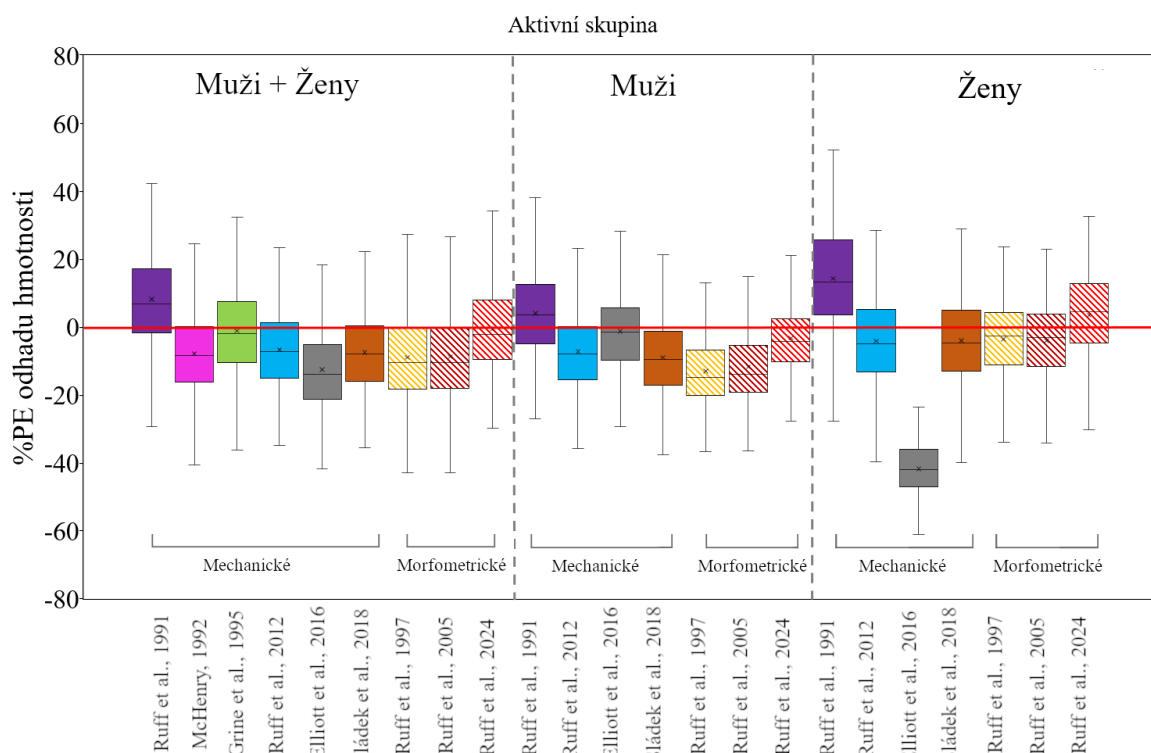
**Graf 1.** Srovnání celkové hmotnosti a průměru hlavice stehenní kosti (Graf A) a bi-cristální šíře (Graf B) ve všech čtyřech kategoriích dle pohlaví a fyzické aktivity.



**Graf 2.** Srovnání průměru hlavice stehenní kosti a věku (Graf A) a bi-cristální šíře a věku (Graf B) ve všech čtyřech kategoriích dle pohlaví a fyzické aktivity.

Z výsledků je patrné, že se zvyšující se celkovou hmotností se zvyšují kosterní rozměry ať už průměru hlavice stehenní kosti či bi-cristální šíře. Rozdíly jsou však pozorovatelné v rámci aktivní a neaktivní skupiny a v rámci pohlaví. Ke změnám proměnných dochází i s věkem, kde se opět s přibývajícím věkem zvyšuje jak průměr hlavice stehenní kosti, tak i bi-cristální šíře.

V rámci odhadu hmotnosti těla z kostry nás jako první zajímala procentuální chyba odhadu tělesné hmotnosti jednotlivých pohlavně nespécifických a pohlavně specifických rovnic vůči skutečné hodnotě při aplikaci na naši část aktivního a část neaktivního testovacího souboru. Pohlavně nespécifické rovnice byly testovány na celém souboru mužů a žen. Pohlavně specifické rovnice byly aplikovány pouze na příslušné pohlaví. Nejdříve jsme otestovali aktivní část našeho souboru (Graf 3).



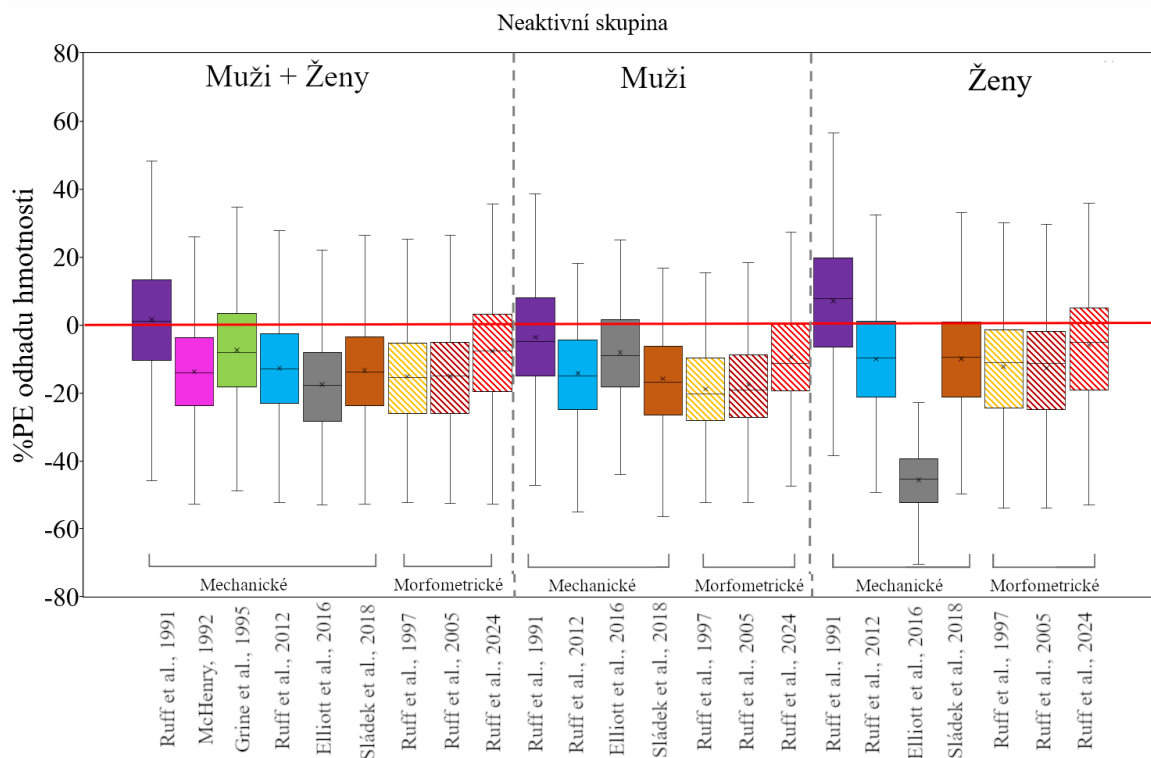
**Graf 3.** Srovnání všech využitých mechanických a morfometrických rovnic na aktivních jedincích z našeho souboru. Muži + Ženy: Pohlavně nespécifické rovnice, Muži: Pohlavně specifické rovnice pro muže, Ženy: Pohlavně specifické rovnice pro ženy. Plné boxploty = mechanické rovnice, Šrafované boxploty = morfometrické rovnice. Červená čára naznačuje skutečnou hodnotu hmotnosti jedince (*true value*)

Drtivá většina (19 z 23) rovnic v našem souboru průměrně podhodnocovala skutečnou hmotnost jedinců. Jednotlivé průměrné hodnoty chyb odhadu hmotnosti těla z kostry jsou zobrazeny v Tabulce 7. Jediné mechanické rovnice, které systematicky nadhodnocovaly jak u pohlavně nespécifických, tak u pohlavně specifických rovnic byly rovnice z publikace Ruff et al.

(1991). Ostatní mechanické rovnice vždy průměrně podhodnocovaly. U morfometrických metod taktéž většina rovnic podhodnocovala, vyjma pohlavně specifické rovnice pro ženy z publikace Ruff et al. (2024).

Jako nejspolehlivější se ukázala morfometrická pohlavně nespecifická rovnice z publikace Ruff et al. (2024), jejíž průměrná chyba odhadu byla na celé aktivní části našeho souboru pro muže a ženy společně pouhých  $-0,68\%$ . Z mechanických pohlavně nespecifických rovnic byla nejspolehlivější rovnice Grine et al. (1995) s průměrnou procentuální chybou odhadu  $-1,09\%$ . U pohlavně specifických rovnic pro muže byla nejspolehlivější mechanická rovnice Elliott et al., (2016b) s průměrnou chybou  $-1,19\%$  a druhá nejspolehlivější byla opět morfometrická rovnice z publikace Ruff et al. (2024) s chybou  $-3,18\%$ . U pohlavně specifických rovnic pro ženy byla nejspolehlivější morfometrická rovnice z publikace Ruff et al. (2024), která jako jediná ze všech morfometrických rovnic nadhodnocovala, a to v průměru o  $3,47\%$ . Největším překvapením je rovnice z publikace Elliott et al. (2016b). Ačkoliv pohlavně specifická rovnice pro muže pracovala na našem souboru spolehlivě s průměrnou chybou  $-1,19\%$ , její varianta sestavená pro ženy pracovala na našem souboru nespolehlivě s průměrnou chybou  $-41,68\%$ .

Po aktivní části našeho souboru jsme obdobně postupovali u části neaktivní (Graf 4).



**Graf 4.** Srovnání všech využitých mechanických a morfometrických rovnic na neaktivní části našeho souboru. Muži + Ženy: Pohlavně nespecifické rovnice, Muži: Pohlavně specifické rovnice pro muže, Ženy: Pohlavně specifické rovnice pro ženy. Plné boxploty = mechanické rovnice, Šrafované boxploty = morfometrické rovnice. Červená čára naznačuje skutečnou hodnotu hmotnosti jedince (*true value*)

Průměrné procentuální chyby odhadu hmotnosti těla z kostry u neaktivní části testovacího souboru jsou taktéž zobrazeny v Tabulce 7. U neaktivní části souboru jsou průměrné procentuální chyby odhadu hmotnosti těla z kostry mnohdy vyšší než u aktivní části souboru a jednotlivé odhady jsou tedy méně spolehlivé, tj. jsou více vzdáleny skutečné hodnotě než u aktivní části souboru.

Ze všech pohlavně nespecifických rovnic byla nejvíce spolehlivá rovnice z publikace Ruff et al. (1991), která průměrně nadhodnocovala o 1,56 %. Pohlavně nespecifická a pohlavně specifická rovnice pro ženy z publikace Ruff et al. (1991) jako jediné dvě průměrně nadhodnocovaly a zbytek použitých rovnic systematicky průměrně podhodnocoval.

U pohlavně specifických rovnic pro muže byla nejspolehlivější taktéž mechanická rovnice z publikace Ruff et al. (1991) s průměrnou chybou odhadu -3,60 %. U pohlavně specifické ženské rovnice však byla spolehlivější morfometrická rovnice z publikace Ruff et al. (2024), která průměrně podhodnocovala o -5,90 %.

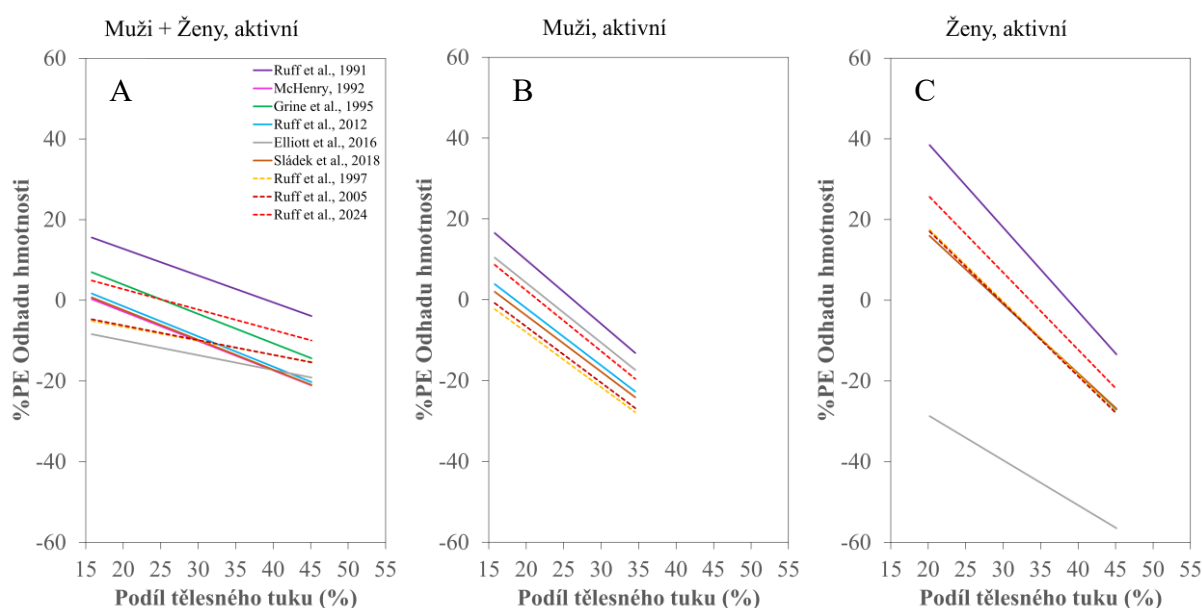
Stejně jako u aktivní části našeho souboru i u neaktivní části byla rovnice pro muže z publikace Elliott et al. (2016b) jednou z mechanických rovnic s nejnižší průměrnou chybou odhadu. Rovnice pro ženy ze stejné publikace ovšem vykazovala průměrnou chybu -45,65 %, ještě vyšší než u aktivní části souboru. V Tabulce 7 pak lze pozorovat jednotlivé průměrné procentuální chyby odhadu hmotnosti pro aktivní i neaktivní část našeho testovacího souboru.

Tabulka 7. Průměrné procentuální chyby odhadu hmotnosti jednotlivých využitých rovnic

| Rovnice              | Aktivní |        |        | Neaktivní |        |        |
|----------------------|---------|--------|--------|-----------|--------|--------|
|                      | M+Ž     | Muži   | Ženy   | M+Ž       | Muži   | Ženy   |
| <i>Mechanické</i>    |         |        |        |           |        |        |
| Ruff et al. 1991     | 8,20    | 4,09   | 14,29  | 1,56      | -3,60  | 7,02   |
| McHenry 1992         | -7,79   | -      | -      | -13,75    | -      | -      |
| Grine et al. 1995    | -1,09   | -      | -      | -7,39     | -      | -      |
| Ruff et al. 2012     | -6,61   | -7,24  | -4,10  | -12,67    | -14,21 | -10,11 |
| Elliott et al. 2016b | -12,45  | -1,19  | -41,68 | -17,51    | -8,15  | -45,65 |
| Sládek et al. 2018   | -7,48   | -8,94  | -4,01  | -13,47    | -15,83 | -9,96  |
| <i>Morfometrické</i> |         |        |        |           |        |        |
| Ruff et al. 1997     | -8,92   | -12,98 | -3,53  | -15,18    | -18,84 | -12,30 |
| Ruff et al. 2005     | -8,71   | -11,73 | -3,94  | -15,03    | -17,67 | -12,66 |
| Ruff et al. 2024     | -0,68   | -3,18  | 3,47   | -7,66     | -9,53  | -5,90  |

Jelikož byla procentuální chyba odhadu hmotnosti těla z kostry u každé rovnice odlišná, zajímalo nás, jakou roli v odhadu hmotnosti těla z kostry hraje v každé rovnici složení těla, respektive jakou roli hraje její nejvíce variabilní část, množství tělesného tuku. Jako první jsme se zaměřili na aktivní část našeho souboru.

Vliv podílu tělesného tuku na chybu odhadu hmotnosti těla u aktivní části souboru je uveden v Grafu 5 a jednotlivé hodnoty korelací v Tabulce 9 pro mechanické rovnice a Tabulce 10 pro morfometrické rovnice. U všech testovaných rovnic je vztah mezi chybou odhadu a podílem tuku negativní. Se zvyšujícím se procentuálním zastoupením tuku v těle se zvyšuje chyba odhadu. Neplatí to však ve všech případech. Například u rovnice z publikace Ruff et al. (1991) byla nejvyšší chyba při nejmenším podílu tuku. Oproti ostatním rovnicím však byla chyba kladného charakteru, což znamenalo, že byla celková hmotnost jedince nadhodnocována vůči hmotnosti skutečné. U jedinců s nízkým obsahem tuku tak byla hmotnost u většiny rovnic nadhodnocována, zatímco u jedinců s vyšším množstvím tuku byla skutečná hmotnost více podhodnocována. Ve všech případech však byl zaznamenán negativní trend.



**Graf 5.** Procentuální chyba odhadu hmotnosti ve vztahu k procentuálnímu zastoupení tuku v těle u aktivní části souboru. A: Pohlavně nespecifické rovnice, aplikované na aktivní část všech mužů a žen, B: Pohlavně specifické rovnice pro aktivní muže, C: Pohlavně specifické rovnice pro aktivní ženy

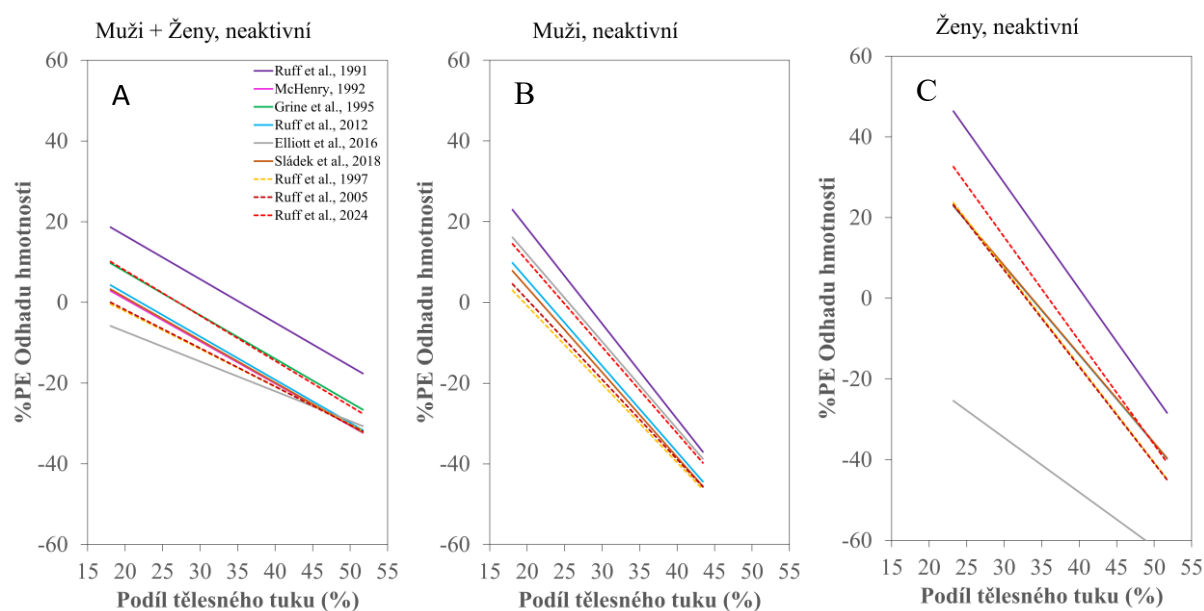
U pohlavně nespecifických rovnic vidíme rozdíl ve sklonech regresních přímek mezi mechanickými a morfometrickými rovnicemi v souvislosti s přibývajícím podílem tuku, přičemž je u morfometrických rovnic sklon nižší než u rovnic mechanických, vyjma rovnice z publikace Elliott et al. (2016b). U pohlavně specifických rovnic pro muže je však situace u

mechanických i morfometrických rovnic prakticky totožná a všechny využití rovnice mají obdobný sklon. U pohlavně specifických rovnic pro ženy je situace podobná jako u mužů, ale sklony jednotlivých pohlavně specifických rovnic jsou vyšší. S přibývajícím podílem tělesného tuku se chyba odhadu u žen zvyšuje více než u mužů. Výjimku tvoří sklon u pohlavně specifické rovnice pro ženy z publikace Elliott et al. (2016b), který je výrazně nižší vůči ostatním využitým pohlavně specifickým rovnicím pro aktivní ženy.

Pohlavně nespecifické morfometrické rovnice mají sklon nižší než mechanické pohlavně nespecifické rovnice, tj. že se se zvyšujícím podílem tělesného tuku nezvyšuje chyba odhadu tak rapidně jako u rovnic mechanických. U mechanických rovnic je sklon naopak vyšší než u morfometrických rovnic, ale s nízkým podílem tuku v těle mají mechanické rovnice z publikací McHenry (1992), Ruff et al. (2012) a Sládek et al. (2018) nejblíže ke skutečné hodnotě, ale se zvyšujícím se procentuálním zastoupením tuku v těle se chyba odhadu zvyšuje rapidněji než u ostatních rovnic. U pohlavně nespecifické rovnice Ruff et al. (1991) naopak pozorujeme, že s nízkým podílem tuku v těle se chyba odhadu snižuje od nejvyšší k nižší, neboli čím nižší je podíl tuku v těle, tím více rovnice nadhodnocovala skutečnou hmotnost.

U pohlavně specifických rovnic pro muže aplikovaných na náš soubor je vidět kontinuální trend zvýšení chyby odhadu u mechanických i morfometrických rovnic. U mužů byl podíl tělesného tuku nanejvýš okolo 35% a dosahoval u morfometrických rovnic Ruff et al. (1997) a Ruff et al. (2005) chyby odhadu hmotnosti okolo -30 %. Obě tyto morfometrické rovnice na celém souboru podhodnocovaly skutečnou hmotnost v celém rozsahu souboru. U pohlavně specifických rovnic pro ženy lze vidět, že podíl tělesného tuku dosahuje u aktivní části souboru až 45 %, ale dosahuje při této hodnotě chyby okolo -30 %, a to u morfometrických rovnic Ruff et al. (1997) a Ruff et al. (2005) a mechanické rovnice Sládek et al. (2018). Pohlavně specifické rovnice pro ženy mnohem častěji nadhodnocovaly skutečnou hmotnost s nízkými procenty tuku než tomu tak bylo u mužských rovnic. Největší nadhodnocení bylo pozorováno u všech tří rovnic z publikace Ruff et al. (1991).

Obdobně jsme postupovali i u neaktivní části našeho souboru. Vliv podílu tělesného tuku na chybu odhadu hmotnosti je uveden v Grafu 6 a jednotlivé hodnoty korelací v Tabulce 11 pro mechanické rovnice a Tabulce 12 pro morfometrické rovnice. U všech testovaných rovnic je vztah mezi chybou odhadu a podílem tuku negativní, tj. oba typy metod tedy začínají podhodnocoovat skutečnou hmotnost jedince se zvyšujícím se množstvím tuku v těle. Naopak u jedinců s nízkým podílem tělesného tuku mají rovnice tendence nadhodnocoovat skutečnou hmotnost.



**Graf 6.** Procentuální chyba odhadu hmotnosti ve vztahu k procentuálnímu zastoupení tuku v těle. A: Pohlavně nespecifické rovnice, aplikované na celém souboru všech neaktivních mužů a žen, B: Pohlavně specifické rovnice pro neaktivní muže, C: Pohlavně specifické rovnice pro neaktivní ženy

Na rozdíl od aktivní části našeho souboru zde u neaktivní části souboru nejsou u pohlavně nespecifických a specifických rovnic výrazně znatelné rozdíly ve sklonu mezi mechanickými a morfometrickými rovnicemi v souvislosti s přibývajícím podílem tuku. S vyšším zastoupením tělesného tuku v těle se ještě zvýšila chyba odhadu hmotnosti těla z kostry. U neaktivní skupiny lze tedy pozorovat vyšší hodnoty procentuálních chyb v souvislosti s vyšším podílem tuku, na rozdíl od aktivní části našeho souboru, kde byly chyby a podíl tělesného tuku nižší. Rozdíl mezi pohlavně specifickými a pohlavně nespecifickými rovnicemi je zřetelný v míře sklonu, kdy pohlavně nespecifické rovnice mají sklon s přibývajícím podílem tuku mírnější než rovnice pohlavně specifické. U mužů byl podíl tělesného tuku nanejvýš 44%, u žen pak 52%. Pokud byl podíl tuku v těle vyšší než 30 % u mužů, byla všemi rovnicemi skutečná hodnota podhodnocována. U žen bylo podhodnocování skutečné hmotnosti zaznamenáno u všech rovnic za hranicí 40 % tuku. V obou případech pohlavně specifických rovnic se jednalo o podhodnocování skutečné hmotnosti v případě rovnic z publikace Ruff et al. (1991). Výjimku ze všech rovnic zde tvoří pohlavně specifická rovnice pro ženy z publikace Elliott et al. (2016b), která se zcela vymyká sklonem i chybou odhadu ve spojení s podílem tělesného tuku všem ostatním použitým rovnicím, ačkoliv celkově taktéž udává negativní trend a potvrzuje, že se se zvyšujícím se množstvím tuku v těle chyba odhadu zvyšuje.

Tabulka 8. Korelace a sklon mezi procentuální chybou odhadu a podílem tělesného tuku u využitých mechanických rovnic

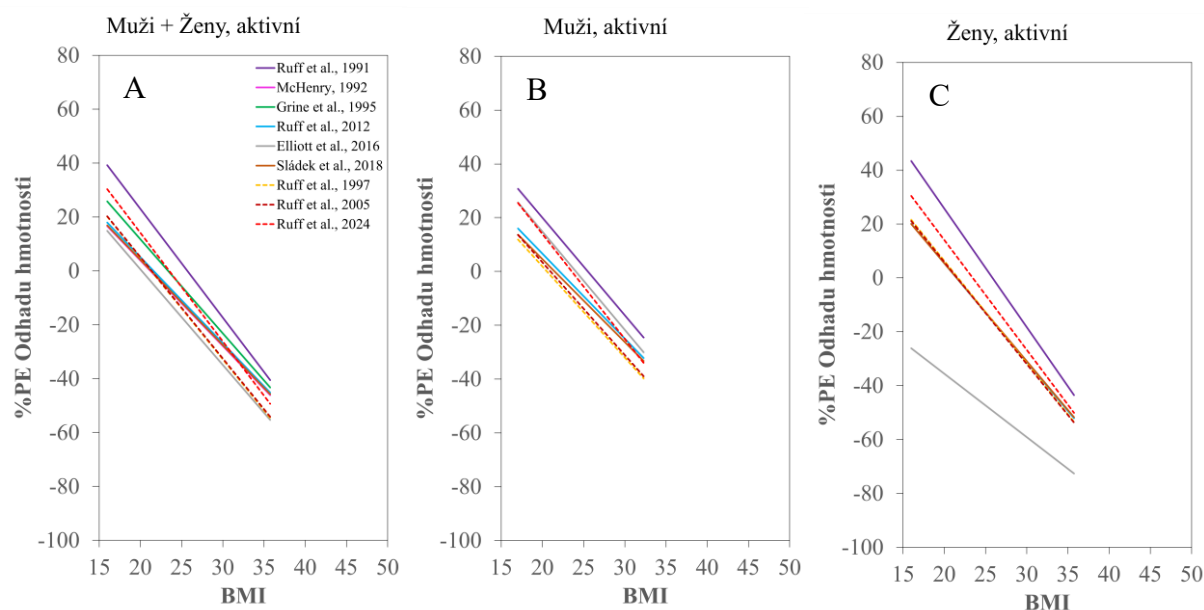
| Rovnice              | Aktivní        |        |        | Neaktivní      |        |        |
|----------------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
|                      | R <sup>2</sup> | Sklon  | p      | R <sup>2</sup> | Sklon  | p      |
| Ruff et al. 1991     |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,081          | −0,664 | <0,001 | 0,178          | −1,076 | <0,001 |
| Muži:                | 0,248          | −1,584 | <0,001 | 0,525          | −2,363 | <0,001 |
| Ženy:                | 0,452          | −2,080 | <0,001 | 0,564          | −2,623 | <0,001 |
| McHenry 1992         |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,137          | −0,729 | <0,001 | 0,231          | −1,045 | <0,001 |
| Muži:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Ženy:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Grine et al. 1995    |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,119          | −0,727 | <0,001 | 0,178          | −1,076 | <0,001 |
| Muži:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Ženy:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Ruff et al. 2012     |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,141          | −0,750 | <0,001 | 0,234          | −1,067 | <0,001 |
| Muži:                | 0,232          | −1,418 | <0,001 | 0,507          | −2,135 | <0,001 |
| Ženy:                | 0,440          | −1,727 | <0,001 | 0,553          | −2,198 | <0,001 |
| Elliott et al. 2016b |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,034          | −0,366 | <0,001 | 0,123          | −0,737 | <0,001 |
| Muži:                | 0,263          | −1,483 | <0,001 | 0,537          | −2,16  | <0,001 |
| Ženy:                | 0,492          | −1,114 | <0,001 | 0,597          | −1,349 | <0,001 |
| Sládek et al. 2018   |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,140          | −0,739 | <0,001 | 0,233          | −1,054 | <0,001 |
| Muži:                | 0,227          | −1,394 | <0,001 | 0,501          | −2,104 | <0,001 |
| Ženy:                | 0,431          | −1,717 | <0,001 | 0,546          | −2,197 | <0,001 |

Tabulka 9. Korelace a sklon mezi procentuální chybou odhadu a podílem tělesného tuku u využitých morfometrických rovnic

| Rovnice          | Aktivní        |        |        | Neaktivní      |        |        |
|------------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
|                  | R <sup>2</sup> | Sklon  | p      | R <sup>2</sup> | Sklon  | p      |
| Ruff et al. 1997 |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:     | 0,028          | −0,348 | <0,001 | 0,172          | −0,932 | <0,001 |
| Muži:            | 0,237          | −1,363 | <0,001 | 0,512          | −1,944 | <0,001 |
| Ženy:            | 0,546          | −1,812 | <0,001 | 0,645          | −2,403 | <0,001 |
| Ruff et al. 2005 |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:     | 0,030          | −0,364 | <0,001 | 0,177          | −0,951 | <0,001 |
| Muži:            | 0,235          | −1,387 | <0,001 | 0,508          | −1,978 | <0,001 |
| Ženy:            | 0,547          | −1,809 | <0,001 | 0,646          | −2,392 | <0,001 |
| Ruff et al. 2024 |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:     | 0,059          | −0,506 | <0,001 | 0,228          | −1,119 | <0,001 |
| Muži:            | 0,291          | −1,504 | <0,001 | 0,544          | −2,137 | <0,001 |
| Ženy:            | 0,558          | −1,910 | <0,001 | 0,656          | −2,572 | <0,001 |

Následně jsme se podívali na korelaci mezi chybou odhadu a indexem tělesné hmotnosti (BMI). Nejdříve jsme srovnávali chybu odhadu s BMI na aktivní části našeho souboru. Vliv BMI na chybu odhadu u aktivní části souboru je zobrazen v Grafu 7 a jednotlivé hodnoty korelací v Tabulce 10 pro mechanické rovnice a Tabulce 11 pro morfometrické rovnice.

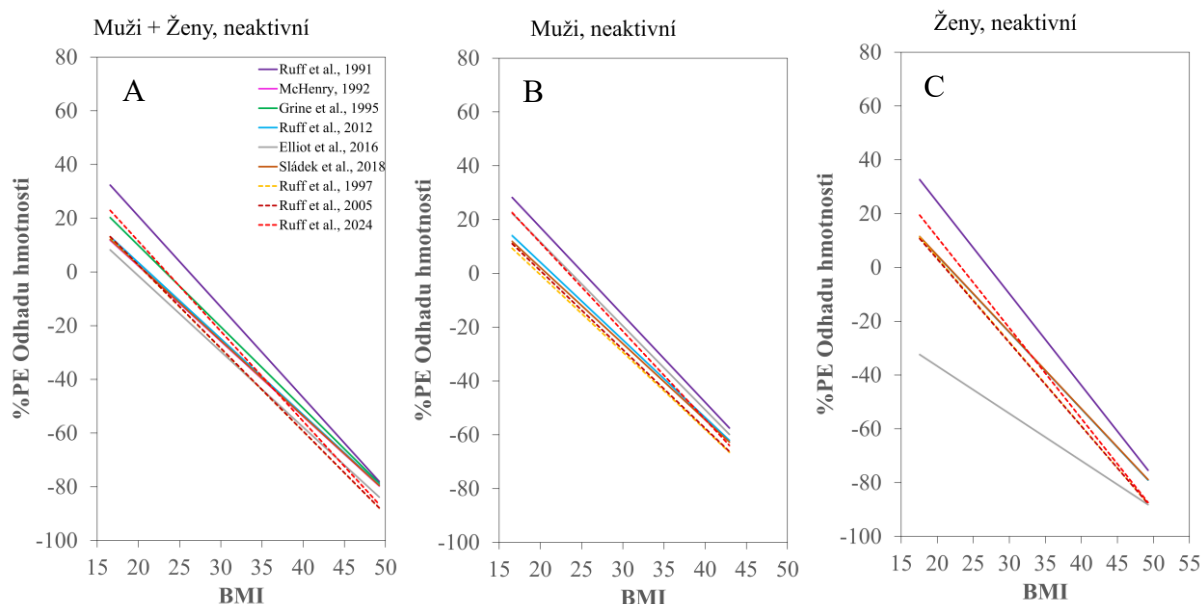
U všech testovaných rovnic je vztah mezi chybou odhadu a BMI negativní, tj., se zvyšujícím se BMI se snižuje spolehlivost odhadu hmotnosti těla z kostry. U jedinců s BMI nižším než  $18,5 \text{ kg/m}^2$  (podváha) mají rovnice tendenci nadhodnocovat skutečnou hmotnost. Ve skupině BMI  $18,5\text{--}25 \text{ kg/m}^2$ , tedy normálního BMI, pracují rovnice s maximálně 20 % chybou. Ve skupině BMI  $25\text{--}30 \text{ kg/m}^2$  (nadváha) již průměrná chyba rovnic překračuje 20 %. Při hodnotách BMI vyšších než  $30 \text{ kg/m}^2$  (obezita) se chyba odhadu hmotnosti těla z kostry neustále prohlubuje a dochází tak k podhodnocování skutečné hmotnosti až do více než 60 % skutečné hmotnosti. Nejvyšších korelací mezi chybou odhadu hmotnosti a BMI na aktivní části našeho souboru bylo dosaženo u všech tří rovnic z publikace Ruff et al. (2024).



**Graf 7.** Procentuální chyby odhadu hmotnosti ve vztahu k indexu tělesné hmotnosti (BMI). A: Pohlavně nespécifické rovnice aplikované na celou část aktivního souboru, B: Pohlavně specifické rovnice pro aktivní muže, C: Pohlavně specifické rovnice pro aktivní ženy

Obdobně jsme sledovali korelaci a sklon mezi chybou odhadu a indexem tělesné hmotnosti u neaktivní části. Vliv BMI na chybu odhadu u neaktivní části souboru je zobrazen v Grafu 8 a jednotlivé hodnoty korelací v Tabulce 10 pro mechanické rovnice a Tabulce 11 pro morfometrické rovnice. Z výsledků je patrné, že vztah mezi chybou odhadu hmotnosti těla je

opět negativní, tj. že se zvyšujícím se BMI klesá spolehlivost odhadu hmotnosti těla z kostry a to jak u pohlavně specifických, tak pohlavně nespecifických rovnic. Neplatí to však pro nižší hodnoty BMI než  $20 \text{ kg/m}^2$ , kdy je skutečná hmotnost nadhodnocována. Rozdíl ve sklonu mezi pohlavně nespecifickými a pohlavně specifickými rovnicemi není patrný.



**Graf 8.** Procentuální chyby odhadu hmotnosti ve vztahu k indexu tělesné hmotnosti (BMI). A: Pohlavně nespecifické rovnice aplikované na neaktivní část souboru, B: Pohlavně specifické rovnice pro neaktivní muže , C: Pohlavně specifické rovnice pro neaktivní ženy

Stejně jako u aktivní části našeho souboru lze pozorovat, že u jedinců s BMI nižším než  $18,5 \text{ kg/m}^2$  (podváha) mají rovnice tendenci nadhodnocovat skutečnou hmotnost. Ve skupině BMI  $18,5\text{--}25 \text{ kg/m}^2$ , tedy normálních hodnot BMI, pracují rovnice s maximální 20 % chybou. Ve skupině BMI  $25\text{--}30 \text{ kg/m}^2$  (nadváha) již průměrná chyba rovnic překračuje 20 %. Při hodnotách BMI vyšších než  $30 \text{ kg/m}^2$  se chyba odhadu hmotnosti těla z kostry neustále prohlubuje a dochází tak k podhodnocování skutečné hmotnosti až do více než 90 % skutečné hmotnosti.

Na rozdíl od aktivní skupiny vidíme, že neaktivní skupina má vyšší zastoupení jedinců s nadváhou a obezitou. Čím vyšší bylo BMI, tím vyšší byla výsledná chyba odhadu hmotnosti těla z kostry. Nejvyšších korelací mezi chybou odhadu a BMI dosahují na neaktivní části našeho souboru taktéž všechny tři rovnice z publikace Ruff et al. (2024).

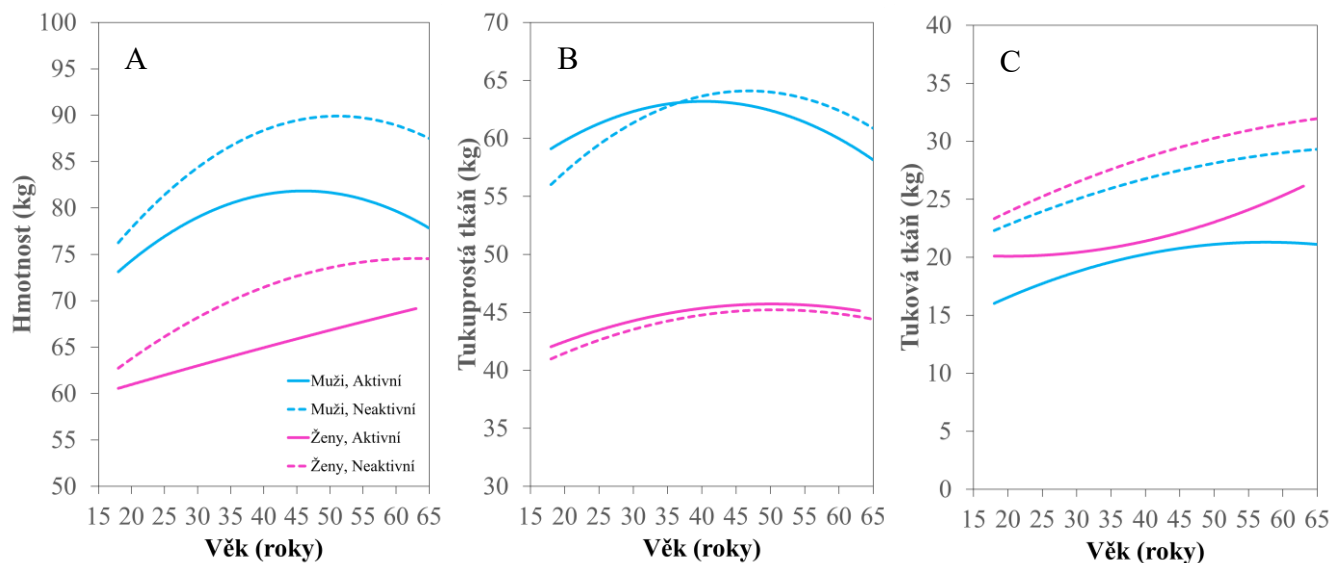
Tabulka 10. Korelace a sklon mezi procentuální chybou odhadu a BMI u využitých mechanických rovnic

| Rovnice              | Aktivní        |        |        | Neaktivní      |        |        |
|----------------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
|                      | R <sup>2</sup> | Sklon  | P      | R <sup>2</sup> | Sklon  | P      |
| Ruff et al. 1991     |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,710          | −4,037 | <0,001 | 0,773          | −3,379 | <0,001 |
| Muži:                | 0,576          | −3,631 | <0,001 | 0,694          | −3,249 | <0,001 |
| Ženy:                | 0,709          | −4,396 | <0,001 | 0,762          | −3,410 | <0,001 |
| McHenry 1992         |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,617          | −3,173 | <0,001 | 0,727          | −2,800 | <0,001 |
| Muži:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Ženy:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Grine et al. 1995    |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,650          | −3,493 | <0,001 | 0,744          | −3,030 | <0,001 |
| Muži:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Ženy:                | -              | -      | -      | -              | -      | -      |
| Ruff et al. 2012     |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,609          | −3,195 | <0,001 | 0,723          | −2,831 | <0,001 |
| Muži:                | 0,511          | −3,164 | <0,001 | 0,647          | −2,884 | <0,001 |
| Ženy:                | 0,689          | −3,651 | <0,001 | 0,746          | −2,854 | <0,001 |
| Elliott et al. 2016b |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,760          | −3,548 | <0,001 | 0,789          | −2,818 | <0,001 |
| Muži:                | 0,705          | −3,653 | <0,001 | 0,781          | −3,118 | <0,001 |
| Ženy:                | 0,773          | −2,353 | <0,001 | 0,814          | −1,761 | <0,001 |
| Sládek et al. 2018   |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:         | 0,612          | −3,172 | <0,001 | 0,725          | −2,806 | <0,001 |
| Muži:                | 0,491          | −3,085 | <0,001 | 0,633          | −2,828 | <0,001 |
| Ženy:                | 0,675          | −3,629 | <0,001 | 0,735          | −2,852 | <0,001 |

Tabulka 11. Korelace a sklon mezi procentuální chybou odhadu a podílem tělesného tuku u využitých morfometrických rovnic

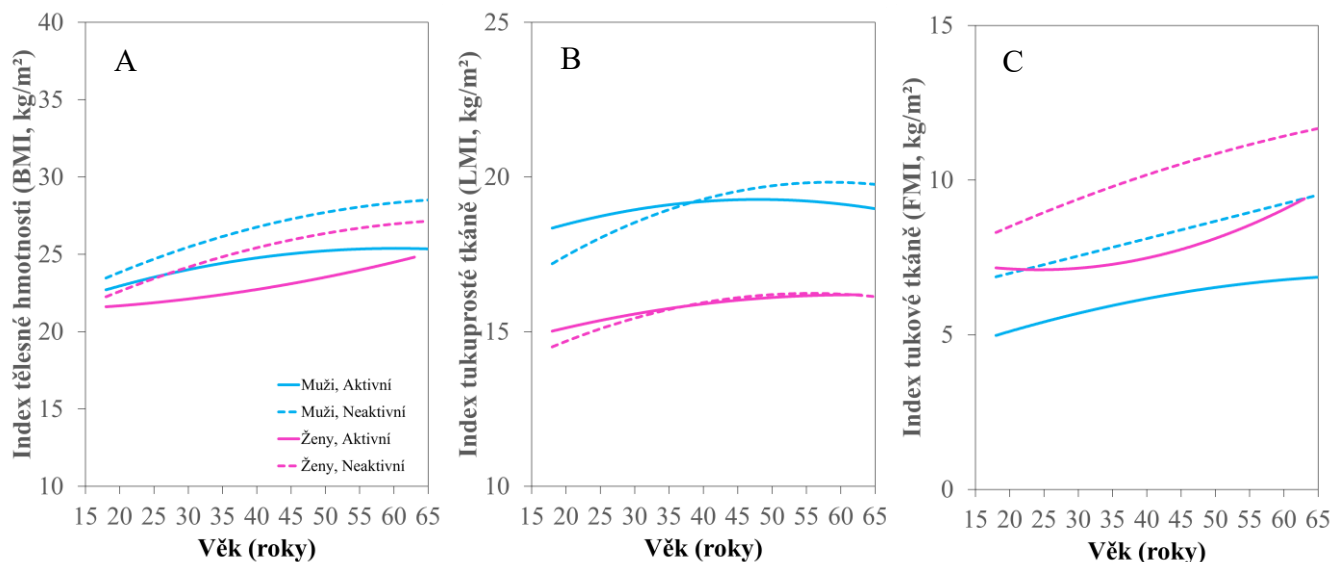
| Rovnice          | Aktivní        |        |        | Neaktivní      |        |        |
|------------------|----------------|--------|--------|----------------|--------|--------|
|                  | R <sup>2</sup> | Sklon  | P      | R <sup>2</sup> | Sklon  | P      |
| Ruff et al. 1997 |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:     | 0,775          | −3,779 | <0,001 | 0,828          | −3,089 | <0,001 |
| Muži:            | 0,649          | −3,393 | <0,001 | 0,782          | −2,874 | <0,001 |
| Ženy:            | 0,847          | −3,797 | <0,001 | 0,872          | −3,162 | <0,001 |
| Ruff et al. 2005 |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:     | 0,770          | −3,766 | <0,001 | 0,826          | −3,093 | <0,001 |
| Muži:            | 0,641          | −3,445 | <0,001 | 0,778          | −2,926 | <0,001 |
| Ženy:            | 0,847          | −3,788 | <0,001 | 0,872          | −3,110 | <0,001 |
| Ruff et al. 2024 |                |        |        |                |        |        |
| Muži + Ženy:     | 0,891          | −4,030 | <0,001 | 0,900          | −3,351 | <0,001 |
| Muži:            | 0,863          | −3,899 | <0,001 | 0,904          | −3,281 | <0,001 |
| Ženy:            | 0,896          | −4,075 | <0,001 | 0,899          | −3,371 | <0,001 |

Vztah tělesné hmotnosti a jednotlivých složek těla s věkem je zobrazen v Grafu 9, zvlášť pro aktivní a neaktivní část souboru a dále rozděleny dle pohlaví.



**Graf 9.** Změny tělesné hmotnosti či hmotností jednotlivých složek těla v souvislosti s věkem. Muži jsou v grafech označeni modrou barvou a ženy růžovou. V obou skupinách dle pohlaví jsou plnou čarou vyobrazení aktivní, přerušovanou pak neaktivní jedinci dané skupiny. A: Celková hmotnost (kg), B: Tukuprostá tkáň (kg), C: Tuková tkáň (kg)

Vztah indexů tělesné hmotnosti, indexů pro tukuprostou a tukovou tkáň s věkem jsou zobrazeny v Grafu 10, zvlášť pro aktivní a neaktivní část souboru a dále dle pohlaví.



**Graf 10.** Změny indexů pro výpočet tělesné hmotnosti či indexů konkrétních složek těla. Muži jsou v grafech označeni modrou barvou a ženy růžovou. V obou skupinách dle pohlaví jsou plnou čarou vyobrazení aktivní, přerušovanou pak neaktivní jedinci dané skupiny. A: Tělesná hmotnost (BMI, kg/m²), B: Tukuprostá tkáň (FMI, kg/m²), C: Tuková tkáň (FMI, kg/m²)

Z výsledků grafů je patrné, že na našem souboru dochází v průběhu života ke změnám ve složení těla. U mužů dochází k nárůstu tělesné hmotnosti až do zhruba 50 let. U aktivní skupiny je vrchol tělesné hmotnosti dříve než u skupiny neaktivní (Graf 9A). U neaktivní skupiny dochází k vrcholu tělesné hmotnosti až v padesátém roku života (Graf 9A). Zajímavé je, že úbytek tukuprosté tkáně je aktivních jedinců z našeho souboru od 37. roku větší než u zdravých kontrol, ačkoliv nárůst tukové tkáně je nižší a s přibývajícím věkem se snižuje (Graf 9B). U zdravých kontrol je však v pozdějších fázích života úbytek tukuprosté tkáně nižší navzdory konstantně se zvyšujícímu množství tkáně tukové (Graf 9C).

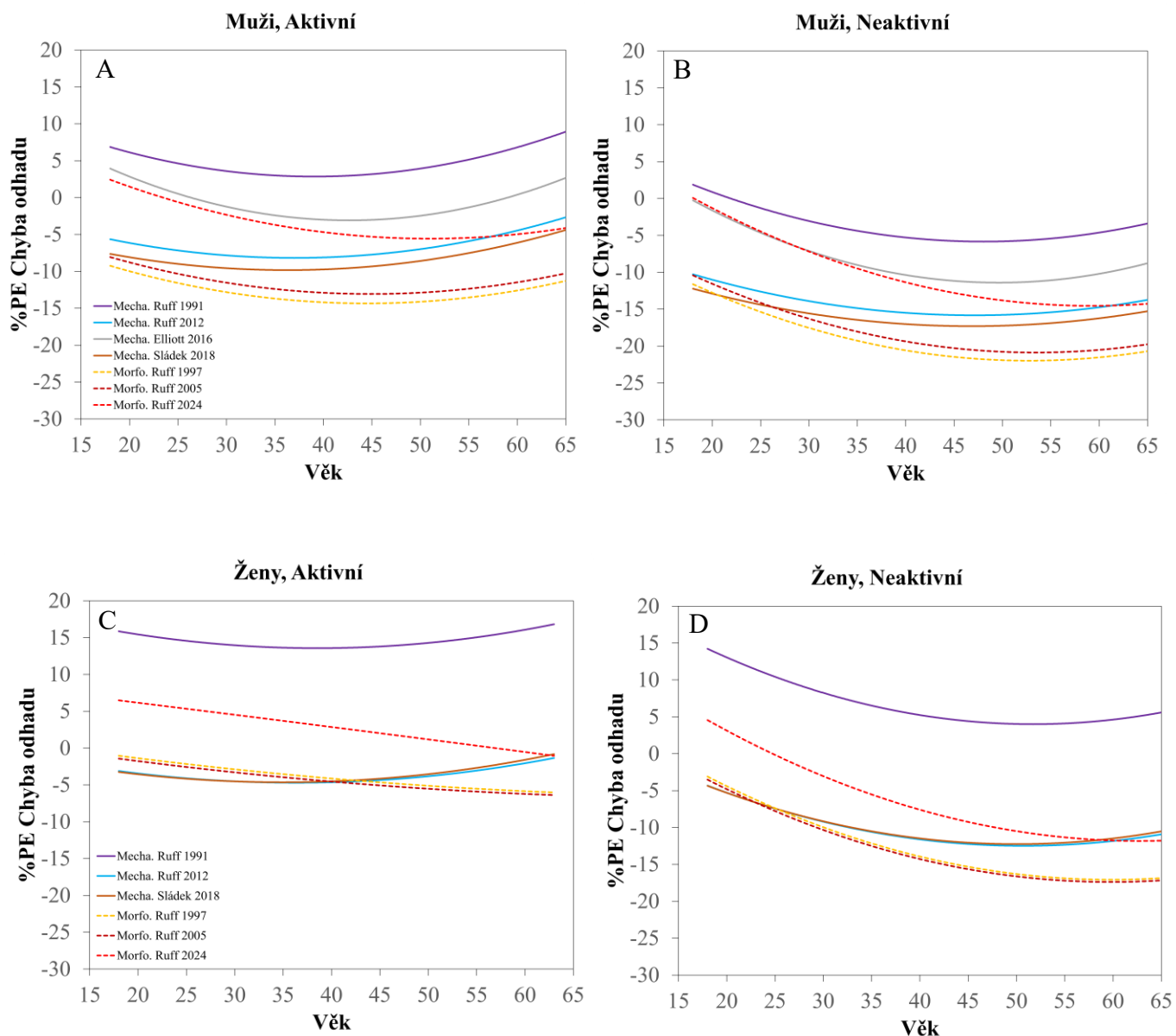
Na náš testovací soubor jsme také využili indexy pro výpočet tělesné hmotnosti, či hmotnosti jednotlivých složek těla. Ačkoliv tedy tělesná hmotnost od padesátého roku života klesá (Graf 9A) index tělesné hmotnosti se v obou skupinách kontinuálně zvyšuje v průběhu celého života, přičemž k většímu nárůstu v průběhu života dochází ve neaktivní skupině (Graf 10A). U indexu tukuprosté tkáně pozorujeme vyšší hodnoty u aktivní skupiny v mladším období, přičemž od 37. roku dochází ke snížení LMI ve stejné skupině (Graf 10B), a to u obou pohlaví. U neaktivní skupiny u obou pohlaví je naopak trend opačný, kdy je LMI do 37 let nižší a v pozdější fázi života je naopak ve vyšších hodnotách než u aktivních skupin (Graf 10B). Rozdíl v indexu tukuprosté tkáně je v průběhu života taktéž mnohem více znatelný u neaktivních mužů než u žen oproti aktivní skupině stejného pohlaví. Největší rozdíl je zachycen v indexu tukové tkáně, který je u aktivní skupiny obou pohlaví trvale nižší než u skupiny neaktivních jedinců stejného pohlaví, a to v celém období života (Graf 10C). Velmi pozoruhodná je u FMI křivka skupiny aktivních žen, která má opačné tendence než zbylé tři křivky. Křivka indikuje, že mají aktivní ženy z našeho testovacího souboru v průběhu života prudší nárůst tukové tkáně oproti neaktivním kontrolám, ale pouze do čtyřiceti let od té doby mají nárůst tkáně tukové pomalejší (Graf 10C). Stejně jako u mužů tedy pozorujeme u žen v průběhu života změny ve složení těla. Tělesná hmotnost u žen našeho souboru však na rozdíl od mužů postupně narůstá v celém sledovaném období, a to jak u aktivní i neaktivní skupiny (Graf 9A). Oproti tomu tukuprostá tkáň dosahuje u žen svého maxima v obou skupinách okolo padesátého roku života, od kterého začíná pozvolně klesat (Graf 9B), což sice koresponduje s jejich mužskými protějšky, avšak po padesátém roce nedochází k tak výraznému úbytku jako u mužů. Ačkoliv se tedy tělesná hmotnost u žen v průběhu života zvyšuje (Graf 9A), množství tukuprosté tkáně se od určitého věku, byť nepatrně, snižuje (Graf 9B). Oproti tomu graf závislosti tukové tkáně na věku, potvrzuje nárůst tukové tkáně u aktivních i neaktivních u obou pohlaví (Graf 9C). U aktivní skupiny našeho souboru je u žen nárůst tukové tkáně do čtyřiceti

let sice pomalejší, nicméně od 40 let je strmější oproti neaktivní skupině, kde pozorujeme nárůst v průběhu celého života víceméně kontinuální (Graf 9C). U neaktivní skupiny je množství tukové tkáně permanentně na vyšší než u aktivní (Graf 9C). Při využití indexů pro tělesnou hmotnost i jednotlivé složky těla vidíme, že BMI je v obou skupinách na konstantním vzestupu v průběhu celého života (Graf 10A). V našem souboru je BMI u neaktivní skupiny žen vyšší než u skupiny aktivních žen v průběhu celého života a stejně je tak tomu u mužů (Graf 10A). Index tukuprosté tkáně však nenarůstá po celou dobu života ani u mužů ani u žen. (Graf 10B). Zajímavé je, že u aktivních mužů je nejdříve index tukuprosté tkáně výrazně vyšší než u neaktivních, avšak s přibývajícím věkem se křivky prohazují a je LMI je u aktivních mužů nižší než u neaktivních (Graf 10B). U žen pozorujeme u indexu tukuprosté tkáně jedinou odlišnost u mladých žen, kdy mají aktivní ženy do 30 let vyšší LMI a později se obě křivky pro aktivní i neaktivní ženy překrývají.

Odlišná je však křivka indexu tukové tkáně, která je výrazně nižší u aktivní skupiny u obou pohlaví, ale s postupem času je trend zvyšování LMI u žen razantnější (Graf 10C) ve smyslu zvýšeného indexu tukové tkáně v pozdější fázi života, především pak v aktivní skupině. Je však nutné podotknout, že FMI je nižší u aktivních žen po celou dobu života oproti FMI žen neaktivních. Stejně je tomu tak u mužů, ačkoliv se křivky pro aktivní ženy s neaktivními muži ve dvou bodech protínají.

Nyní jsme tedy potvrdili, že se u aktivních i neaktivních jedinců obou pohlaví z našeho souboru složení těla v průběhu života mění. Jak se tedy v souvislosti s věkem bude měnit chyba odhadu pohlavně specifických rovnic v každém ze čtyř skupin našeho souboru?

Jako poslední nás zajímalo, jak se bude měnit procentuální chyba odhadu hmotnosti těla z kostry v souvislosti s věkem. Vliv věku na chybu odhadu je zobrazen v Grafu 11.



**Graf 11.** Procentuální chyba odhadu jednotlivých pohlavně specifických rovnic aplikovaných na odlišné skupiny. A: Muži, Aktivní, B: Muži, Neaktivní, C: Ženy, Aktivní, D: Ženy, Neaktivní. Plná čára = mechanické rovnice. Přerušovaná čára = morfometrické rovnice. Mechanická rovnice Elliott et al. (2016b) není u žen uvedena, protože byla zcela mimo rozsah.

Využili jsme pouze pohlavně specifické rovnice a aplikovali je vždy na příslušné pohlaví. Ve všech čtyřech skupinách pozorujeme na našem souboru odlišný vývoj polynomických

křivek procentuálních chyb odhadu mechanických a morfometrických rovnic v souvislosti s věkem.

U skupiny aktivních mužů (Graf 11A) lze pozorovat v průběhu celého života systematické nadhodnocování hmotnosti u rovnice Ruff et al. (1991). Ostatní mechanické rovnice v průběhu života spíše skutečnou hmotnost podhodnocovaly, i když rovnice z publikace Elliott et al. (2016b) u mladých dospělých mužů byla v průměru blízko skutečné hodnotě, ale v průběhu života se postupně chyba odhadu zvyšovala. Ostatní mechanické rovnice systematicky podhodnocovaly skutečnou hmotnost v průběhu celého života. Obě hybridní rovnice Ruff et al. (2012) a Sládek et al. (2018) na našem souboru v souvislosti s věkem průměrně podhodnocovaly okolo  $-5\%$  až  $-10\%$ . U morfometrických metod rovnice Ruff et al. (1997) a Ruff et al. (2005) v souvislosti s věkem predikovaly skutečnou hmotnost hůře než zbylé uvedené rovnice. Poslední otestovaná morfometrická rovnice Ruff et al. (2024) pro muže však na našem souboru predikovala v časovém horizontu hmotnost těla mnohem spolehlivěji než dvě starší morfometrické rovnice pro muže. Všechny rovnice pro aktivní i neaktivní muže měly tvar písmene U, přičemž většina rovnic odhadovala nejspolehlivěji po dovršení dospělosti a následně ke konci měřeného období 65 let.

U neaktivních mužů (Graf 11B) je situace lehce odlišná, jelikož pozorujeme, že většina rovnic mechanických i morfometrických podhodnocuje skutečnou hmotnost v celém průběhu života, vyjma rovnice Ruff et al. (1991), která lehce nadhodnocuje těsně po dovršení dospělosti a postupně začíná jako zbylé rovnice taktéž podhodnocovat. Rovnice pro muže z publikace Elliott et al. (2016b) sice v mládí chybu odhadu hmotnosti má blízko skutečné hodnotě, avšak v průběhu života se chyba odhadu zvyšuje až ke  $-10\%$ . Zbylé dvě hybridní mechanické, rovnice udržují chybu odhadu hmotnosti okolo  $-10\%$  až  $-15\%$  v průběhu celého života na našem testovacím souboru. Morfometrické rovnice ovšem se zvyšujícím se věkem zvyšují u neaktivní skupiny mužů svou chybu odhadu více než rovnice mechanické. Nejnižší procentuální chyba odhadu byla u mladých neaktivních jedinců po dovršení dospělosti a s postupem života se chyba zvětšovala až do padesátého roku života. Z tří otestovaných morfometrických rovnic je skutečné hodnotě v 18 letech nejbližší Ruff et al. (2024), nicméně následuje s věkem strmější propad v procentuální chybě odhadu hmotnosti, než je tomu u dvou zbylých morfometrických rovnic. Vhodné je poznamenat, že je oproti aktivní skupině vidět výrazný celkový negativní posun ve spolehlivosti odhadu hmotnosti, právě v souvislosti se zvýšeným množstvím tukové tkáně a celkovému BMI u neaktivní skupiny mužů.

Grafické znázornění procentuální chyby odhadu v souvislosti s věkem přineslo u skupiny aktivních žen taktéž zajímavý výsledek (Graf 11C). Mechanická rovnice Ruff et al. (1991) po celý život systematicky nadhodnocovala v průměru okolo 15 %. Rovnice Elliott et al. (2016b) není vyobrazena vůbec, jelikož na grafu dosahovala hodnoty průměrné chyby 40 %, a proto byla z grafického znázornění zcela vyřazena. U morfometrických rovnic je u žen zajímavý taktéž lineární negativní trend průměrné chyby odhadu se zvyšujícím se věkem. U skupiny aktivních žen docházelo s přibývajícím věkem ke kontinuálnímu, prakticky lineárnímu snižování spolehlivosti morfometrických rovnic.

U neaktivních žen pozorujeme prohlubování chyby odhadu v souvislosti s věkem prakticky ve všech rovnicích, vyjma rovnice z publikace Ruff et al. (1991), která má nejnížší chybu odhadu v 50 letech. U morfometrických rovnic, obdobně jako u neaktivních mužů, se se zvyšujícím se věkem zvyšuje u neaktivní skupiny žen chyba odhadu více než u rovnic mechanických a rovnice byly nejspolehlivější u nejmladších dospělých žen.

Při porovnání aktivních skupin obou pohlaví na našem souboru pozorujeme u ženských mechanických rovnic nižší chybu odhadu než u mužů, a to v průběhu celého života. Výjimku tvoří mechanická rovnice Ruff et al. (1991) kde je spolehlivost metody vyšší u mužů než u žen. U morfometrických rovnic je situace u aktivních žen taková, že nejnovější rovnice z publikace Ruff et al. (2024) nadhodnocuje naši aktivní skupinu žen v průběhu celého života. Morfometrické rovnice Ruff et al. (1997) a Ruff et al. (2005) naopak nejspolehlivěji odhadovaly hmotnost u mladých žen a s přibývajícím věkem spolehlivost rovnic klesala.

U skupiny neaktivních žen je velikost chyby odhadu v souvislosti s věkem zřetelnější oproti skupině žen aktivních (Graf 11D). U rovnice Ruff et al. (1991) dochází k nadhodnocení a postupně ke snižování chyby odhadu v souvislosti s věkem až do padesáti let. Ostatní mechanické rovnice systematicky podhodnocovaly skutečnou hmotnost žen z neaktivní skupiny. Rovnice Elliott et al. (2016b) opět není v grafickém přehledu znázorněna z důvodu velmi vysoké hodnoty procentuální chyby odhadu, která se na neaktivní části souboru žen pohybovala okolo -50 %. U morfometrických metod pozorujeme u starších prací Ruff et al. (1997) a Ruff et al. (2005), že nejspolehlivější jsou rovnice na mladých ženách. U morfometrické rovnice Ruff et al. (2024) sice taktéž s přibývajícím věkem klesá spolehlivost odhadu, nicméně u mladých žen má rovnice tendenci dokonce lehce nadhodnocovat skutečnou hmotnost. S přibývajícím věkem však spolehlivost odhadu klesá i u této rovnice a začíná skutečnou hmotnost po 25 roce podhodnocovat.

## 5. Diskuse

Výsledky této diplomové práce naznačují, že chybu odhadu hmotnosti těla z kostry ovlivňuje složení těla, které se v průběhu života mění. Většina testovaných rovnic podhodnocovala hmotnosti jedinců ve skupině aktivních i neaktivních mužů i žen z našeho souboru. Podíl tuku negativně koreloval s chybou odhadu, ale u jedinců s podváhou měly rovnice tendenci nadhodnocovat skutečnou hmotnost. U jedinců s nadváhou měly rovnice tendence podhodnocovat a o to výrazněji u jedinců s obezitou, kde chyba odhadu dosahovala až prakticky 100 %. U jedinců s nadváhou či obezitou bylo s přibývajícím procentuálním zastoupením tuku v těle a se zvyšujícím se BMI pozorováno zvyšování chyby odhadu hmotnosti těla z kostry. V souvislosti s věkem jsme zaznamenali, že nejspolehlivější byly rovnice u jedinců mladých, těsně po dovršení dospělosti a postupně se chyba odhadu s přibývajícím věkem zvyšovala. Okolo 50. roku života se však průměrná chyba odhadu přestala zvyšovat a začala naopak klesat až k nejvyššímu věku účastníků, který byl 65 let. U aktivních mužů i žen byla chyba odhadu v souvislosti s věkem nižší než u skupiny neaktivních mužů a žen.

Náš soubor by rozdělen do čtyř kategorií na aktivní muže, neaktivní muže, aktivní ženy a neaktivní ženy a uvedené mechanické i morfometrické rovnice byly otestovány na skupinách z našeho souboru. Morfometrické rovnice měly na našem souboru ve vícero případech vyšší spolehlivost odhadu než rovnice mechanické. Vyšší spolehlivost morfometrických metod je v souladu s výsledky předchozích studií (Auerbach & Ruff, 2004; Junno et al., 2018; Ruff, 1994; Ruff et al., 1997, 2005; Ruff & Wood, 2023), ale najdou se i práce, které vyšší spolehlivost morfometrických metod zpochybňují (Elliott et al., 2016b). Zmíněná práce Elliott a kolektivu z roku 2016 byla postavena na větším množství jedinců s vyšší celkovou hmotností, aby lépe odpovídala současné populaci. Hmotnost jedinců v publikaci činila až 146 kg, přičemž BMI však uvedeno nebylo. Rovnice byly postaveny na kadaverózních vzorcích ze Švýcarska se známou hmotností jedinců před smrtí. Jedinci byli od 18 do 90 let, ale větší, poměrnou část jedinců tvořila skupina jedinců starších padesáti let. Celkově bylo v publikaci využito 203 jedinců (103 mužů a 100 žen). Vytvořené rovnice z publikace Elliott et al. (2016b) jsme se pokusili otestovat i v této práci, přičemž mechanická rovnice pro muže poskytla výsledky s nejnižší průměrnou chybou (−1,19 %) odhadu pro aktivní muže, avšak rovnice pro aktivní ženy nebyla schopna predikovat skutečnou hmotnost s průměrnou chybou nižší než 40 %. Na limity této práce upozorňovali Ruff a kolektiv ve své práci z roku 2018, především pak na stáří

a nekontrolovanou hmotnost jedinců ze studie. Není tedy možné univerzálně tvrdit, že by mechanické rovnice poskytovaly výrazně lepší (spolehlivější) predikci vůči morfometrickým metodám. Naopak morfometrická rovnice z publikace Ruff et al. (2024), která byla postavena na jedincích s BMI do 30 kg/m<sup>2</sup>, dosáhla vůbec nejnížší průměrné chyby odhadu ze všech pohlavně nespecifických rovnic. Tato práce využila právě i jedince s nadváhou, aby lépe odpovídala současné industrializované západní společnosti a byla tak vhodná pro forenzní účely. Nezahrnuli však jedince s obezitou, u kterých byla chyba odhadu vysoká. Obrovskou výhodou je vytvoření těchto morfometrických rovnic na celosvětových skupinách, aby obsahovaly co nejvíce množství variací lidského těla na rozdíl od rovnic mechanických, které jsou co by do variací rozměrů mnohem více omezené (Auerbach & Ruff, 2004; Ruff et al., 1997, 2005; Ruff & Wood, 2023). Na našem souboru byla u morfometrických rovnic průměrná chyba odhadu hmotnosti těla z kostry mnohdy vyšší než u některých rovnic mechanických, vyjma právě rovnic z této publikace Ruff et al. (2024). Chyba odhadu je ale nejspíše větší proto, protože mnohé referenční soubory předchozích rovnic měly normální BMI, avšak při aplikaci na soubor s vyšším průměrným BMI dávají vysokou chybu odhadu a nejspíše vyšší, než je tomu tak u metod mechanických. Mnozí jedinci s BMI pod 18,5 kg/m<sup>2</sup> byli naopak rovnicemi nadhodnocováni. Při aplikaci na skupinu s normálním BMI byly ale výsledky spolehlivé ve stejné skupině BMI. To potvrzují také jiné práce, kdy omezení na jedince dle BMI zvyšuje spolehlivost odhadu hmotnosti těla z kostry v průběhu života a nejspolehlivějších výsledků je dosaženo taktéž v normálním rozmezí BMI (Chevalier et al., 2018; Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013; Schaffer, 2016; Schaffer & Dunn, 2018). Bez omezení referenčního souboru na jedince bez nadváhy a obezity jsou ale oba typy metod nespolehlivé (Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013). I v naší skupině při rozdělení na aktivní a neaktivní skupinu byla chyba odhadu v souvislosti s BMI nižší u aktivní skupiny než u skupiny neaktivní.

V práci jsme otestovali taktéž mechanické rovnice vytvořené hybridní metodou, a to z dvou publikací Ruff et al. (2012) a Sládek et al. (2018). Rovnice z prací Ruff et al. (2012) a Sládek et al. (2018) využívají hybridní přístup, kde je odhad tělesné hmotnosti proveden morfometricky na dostupných exemplářích a poskytuje základ pro vyvinutí rovnic mechanických, které se aplikují na méně kompletní jedince ze souboru, které neměly dostatečnou zachovalost k použití morfometrické metody (Ruff et al., 2012). Na našem souboru obě pohlavně specifické i nespecifické rovnice měly obdobnou spolehlivost z důvodu využití identických morfometrických rovnic pro vytvoření odvozených predikčních rovnic.

Chyby odhadu na našem souboru mohly být způsobeny také odlišností mezi jedinci na kterých byly původní rovnice postaveny a naším testovacím souborem. Roli ve spolehlivosti odhadu tělesné hmotnosti hraje množství a typ dostupného materiálu se kterým pracujeme, včetně referenčního souboru, se kterým je jedinec srovnáván a na kterém jsou postaveny matematické rovnice pro daný odhad (Ruff & Wood, 2023). Rovnice Ruff et al. (1991) je postavena na Američanech afrického a evropského původu. McHenryho rovnice (1992) zase dobře odráží jedince, kteří jsou menšího vzrůstu (Pomeroy & Stock, 2012) a naopak špatně odhaduje jedince s větší hmotností (tělem) (Auerbach & Ruff, 2004), protože tato rovnice zahrnuje jako jediná Khoisany (6) a africké Pygmeje (2). Rovnice Grinea a kolektivu lze využít u jedinců, kteří mají vyšší hmotnost a mají celkově větší těla (Pomeroy & Stock, 2012), protože je rovnice z publikace Grine et al. (1995) postavena na Američanech afrického a evropského původu a na původních obyvatelích Severní Ameriky, Indiánech. V případě, že se velikost těla jedince nenachází v okrajových částech velikostního spektra moderního člověka, lze využít průměr všech tří rovnic z publikací Ruff et al. (1991), McHenry (1992) a Grine et al. (1995), jak doporučuje Auerbach a Ruff ve svém přehledu z roku 2004. Pro účely této práce k průměrování všech tří rovnic nedošlo, jelikož nás zajímaly primárně jednotlivé publikované rovnice. Navíc byla publikována i práce, která nepotvrdila výrazné vylepšení spolehlivosti odhadu při zprůměrování všech tří rovnic při aplikaci na současné populace se známou hmotností (Chevalier et al., 2016). Zároveň Ruff a kolektiv ve své práci z roku 1991 doporučuje, aby se při využití rovnic z jeho publikace na minulých populacích odečítalo 10 % z výsledné hodnoty, pokud jde o aplikaci na populace minulé, což zdůvodňuje zvýšenou adipozitou současné populace vůči populacím minulým (Ruff et al., 1991). Odečtení 10 % od výsledné hodnoty by mnohdy vylepšilo i spolehlivost u našeho testovacího souboru. Zajímavostí je také, že u jediných ze všech testovaných rovnic jsou u rovnic z publikace Ruff et al. (1991) zaznamenány průměrné nižší chyby odhadu u neaktivní části testovacího souboru než u části aktivní.

Odlišnosti ve výsledcích mechanických a morfometrických metod mohou tak být způsobené referenčním souborem, vysokým podílem obézních jedinců v jednotlivých publikacích, ale i v našem souboru. V našem případě na našem souboru s velkým podílem obézních jedinců odhadovala hmotnost nejlépe rovnice, která je založena taktéž na referenčním souboru s vyšším podílem starších jedinců s vyšším BMI. Z tohoto důvodu tak rovnice založené na atletických jedincích s nižším BMI v našem případě hmotnost mnohdy podhodnocovaly.

Obecně u našich výsledků platilo, že čím vyšší bylo procento tuku v těle, tím více měly rovnice tendence podhodnocovat výsledný odhad hmotnosti těla z kostry vůči skutečné hmotnosti. To platilo obecně pro mechanické i morfometrické metody a pro aktivní i neaktivní část souboru. V případě jedinců s nízkým podílem tuku měly ale rovnice odhadu hmotnosti těla z kostry tendenci naopak nadhodnocovat tělesnou hmotnost. Pouze celková hmotnost nebo hmotnost jednotlivých kompartmentů těla však může být zavádějící, pokud jsou jedinci porovnáváni mezi sebou. Proto jsme všechny jedince ze skupiny vztáhli nejen k vlastní hmotnosti, ale také k vlastní výšce postavy. V aktivní skupině bylo průměrné BMI nižší než ve skupině neaktivní. V neaktivní skupině bylo větší množství jedinců s nadváhou (BMI vyšší než 25 kg/m<sup>2</sup>) či obezitou BMI (vyšší než 30 kg/m<sup>2</sup>) než ve skupině aktivní.

Jelikož se složení těla mění i v rámci populací (Chumlea et al., 2002; Roberts, 1953), dochází k rozdílům ve výšce postavy i složení těla. Změny ve složení těla nelze pozorovat pouze na úrovni populací, v důsledku dlouhodobé adaptace (Ruff, 2002), ale také na úrovni individuální (Junno et al., 2018). Roli ve složení těla bude zajisté hrát zmíněná fyzická aktivita (Semanick et al., 2005), ale i strava a míra stresu (Kuriyan, 2018; Siri, 1956). Způsob obživy, včetně její dostupnosti, by mohl být příčinou vyššího množství variací složení a tvarů těl (Ruff, 2002). Rozdíly ve tvarech těl jsou u moderních lidí nejspíše výsledkem propojení genetických faktorů, stravy, klimatických adaptací a vývojového prostředí, které zahrnují taktéž nemoci (Ruff, 2002). U žen by pak změny ve složení těla mohly být indukovány také hormonálními změnami, především pak po padesátém roku života vlivem menopauzy, která má vliv na složení těla (Douchi et al., 1997). Změnu ve složení těla díky fyzické aktivitě můžeme potvrdit i touto prací, kdy ve skupině aktivních, kterou tvořili běžci, bylo nižší procentuální zastoupení tuku v těle. Analýzy pomocí polynomických křivek druhého stupně, které byly proloženy grafy u našich čtyř skupin, společně s indexy pro celkovou hmotnost či části kompartmentů pak prokázaly rozdílné trendy vývoje hmotnosti v průběhu života. V návaznosti na množství tuku a celkovou hmotnost lze pak k výsledkům této práce konstatovat, že rovnice spolehlivě predikují pouze jedince v normálním rozmezí BMI (18,5–25 kg/m<sup>2</sup>).

V současné době se se zvyšující se prevalencí nadváhy a obezity v západní industrializované společnosti (Ng et al., 2014; Okunogbe et al., 2022) v důsledku nedostatku fyzické aktivity lze pozorovat i na našem testovacím souboru zvýšení BMI u neaktivních skupin oproti skupinám aktivním. Populace minulé měly však nejspíše menší množství tukové tkáně a větší množství tukuprosté tkáně (Churchill et al., 2012; Pontzer et al., 2018; Ruff, 2002). Představa, že by však populace minulé nejvíce odpovídaly silovým atletům je také mylná (Ruff,

2000). I když měly minulé populace nízké procenta tuku, současní siloví atleti mají neomezený přísun potravy a pravidelný cvičební plán, což ji umožňuje dosahovat rozměrů těla, které nejspíše neodpovídají realitě minulých populací (Ruff, 2000). Z hlediska referenčního souboru pro populace minulé by tak bylo nejvhodnější využít desetibojaře, protože jsou nejvíce všestranní (Junno et al., 2018; Ruff, 2002). Na našem testovacím souboru aktivních jedinců s nižším množstvím tuku, než u neaktivní části souboru pozorujeme taktéž nižší chybu odhadu hmotnosti. Chyba odhadu byla také nižší u mladých dospělých a s věkem se postupně zvyšovala až do 50 let. Naše výsledky tedy podporují hypotézu, že mladí jedinci s nižším množstvím tuku by byli vhodnější pro referenční soubor pro populace minulé, a to z důvodu nejvyšší spolehlivosti odhadu v rozmezí normálního BMI do 25 kg/m<sup>2</sup>. Referenční soubor, který bude takto omezen na jedince s velmi omezeným množstvím tuku, by tedy byl nejvhodnější pro využití v paleoantropologických studiích. V nedávném shrnutí metod odhadu tělesné hmotnosti z kostry autoři Ruff a Wood (2023) konstatují, že univerzálně lze tvrdit, že čím více je v čase vzdálen referenční soubor od zkoumaného jedince, tím se jeho použitelnost a spolehlivost snižuje (Ruff & Wood, 2023).

Jelikož tedy věk a množství tukové tkáně ovlivňuje odhad hmotnosti těla z kostry, čím vyšší je procentuální množství tuku v těle, tím vyšší je podhodnocení odhadu hmotnosti a rovnice pak neodráží skutečnou hmotnost jedince. Nabízí se tedy příležitost, že rovnice nedokážou predikovat jedince s podváhou, nadváhou či obezitou adekvátně, jelikož tento stav zcela neodráží kosterní systém. Pro forenzní účely je tedy využití rovnic pro odhad hmotnosti těla z kostry na současné populaci nejspíše velmi problematické a individuální odhad prakticky nemožný pro jedince s nadváhou či obezitou. Právě tuk se ukázal jako klíčový prvek z hlediska odhadu hmotnosti těla z kostry. Zvýšená adipozita, respektive množství tuku v těle, by tedy mohlo být klíčovým vodítkem v problematice odhadu hmotnosti těla z kostry. Vyšší zastoupení jedinců s nadváhou či obezitou v neaktivní skupině by pak mohlo vysvětlovat, proč docházelo v neaktivní skupině často k nižší spolehlivosti odhadu hmotnosti těla z kostry.

Z hlediska věku jsme také potvrdili, že se složení těla mění. Na našem souboru byl pozorován úbytek tukuprosté tkáně u jedinců po padesátém roku života, kdežto množství tukové tkáně narůstalo v průběhu celého života. Ačkoliv se jedná o průřezová data, mohl by úbytek tělesné hmotnosti v souvislosti s věkem zastíněn pouze změnou jednotlivých složek těla, kdy došlo vlivem věku k výměně tukuprosté tkáně za tkáň tukovou a celková hmotnost pak zůstala na stejné úrovni.

S přibývajícím věkem by totiž změny ve složení těla mohly představovat potencionální problém jak pro odhad jedince, tak pro sestavení referenčního souboru, a to z důvodu, že jsou rovnice často postaveny na kadaverózních souborech lidí vyššího věku. Pokud byly použity kadaverózní soubory, mohla by metoda průměru hlavice stehenní kosti efektivněji zamezovat chybám spojeným se senescencí a změnou hmotnosti oproti metodám morfometrickým, protože udržuje svůj rozměr průměru hlavice stehenní kosti lépe než proměnné v morfometrických metodách. Velikost hlavice stehenní kosti obstojně odolává zubu času a není tedy v průběhu života výrazně ovlivněna procesem stárnutí (Lieberman et al., 2001; Ruff et al., 1991). Na druhou stranu, při využití mechanických rovnic průměru hlavice stehenní kosti pro odhadu hmotnosti těla z kostry pro forenzní účely by tato skutečnost představovala problém mnohem větší, jelikož průměr hlavice nemusí reflektovat aktuální hmotnost jedince. U mechanických metod se Chevalier a kolektiv (2016) pokoušel zjistit spolehlivost odhadu hmotnosti těla z kostry pomocí mechanické metody průměru hlavice stehenní kosti na starších jedincích současné populace. Došel k závěru, že omezením jedinců vybraného souboru z normálního BMI lze výrazně zlepšit odhady hmotnosti. To lze potvrdit i touto prací, kdy chyba odhadu nebyla tak vysoká u aktivní i neaktivní části souboru jako při BMI hodnotách mimo normální rozsah. Reverzibilně lze tedy pro forenzní účely vylepšit průměrnou chybu predikce při omezení referenčního souboru na jedince s normálním BMI (Chevalier et al., 2016). Velký rozdíl v predikcích je ale v uplatnitelnosti takového odhadu hmotnosti, zda se jedná o průměrný odhad jedince v populaci nebo individuální odhad, což je tvrzení vyskytující se ve vícero publikacích (Chevalier et al., 2016; Lacoste Jeanson et al., 2017). K podobným výsledkům vylepšení odhadu hmotnosti při omezení BMI do 25 kg/m<sup>2</sup> došla i další práce (Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013). Výsledkem tedy je, že čím větší je BMI nad normální hodnotu, tím hůře jsou schopny rovnice predikovat skutečnou hmotnost jedince. Tuto hypotézu podporují i výsledky této práce.

Univerzálně lze ale tvrdit, že jsou mechanické i morfometrické metody jsou postaveny na proměnných, které se u dospělého jedince v čase vesměs nemění či se mění velmi málo. Kosterní systém a jeho skeletální struktury mají ale pouze omezenou schopnost reagovat na rapidní změny hmotnosti (Sládek et al., 2018). Z výsledků této práce pak vyplývá, že u jedinců s podváhou, nadváhou či obezitou má kosterní systém v dospělosti nejspíše jen omezenou schopnost reagovat na tělesné složení, kvůli čemuž tak nelze u těchto jedinců odhadovat tělesnou hmotnost spolehlivě, čímž tuto hypotézu podporujeme. Nárůst kosterních rozměrů by pak byl měl být paradoxně nejvíce pozorovatelný u obézních jedinců, jelikož dochází ke

změnám v důsledku nutnosti nést větší zátěž těla (hmotnost) (Evans et al., 2015) v industrializované populaci nejčastěji z důvodu zvýšeného množství tukové tkáně (Ng et al., 2014). Kosterní rozměry u jedinců s vysokým podílem tuku korelují hůře a odhad hmotnosti těla z kostry se stává nespolehlivým, jak ukazují naše výsledky. Podíl tuku v těle pak ovlivňuje i BMI a další indexy jako FMI, u kterých jsme zaznamenali odlišné hodnoty v souvislosti s věkem u aktivní a neaktivní části testovacího souboru.

Index tělesné hmotnosti je výrazně ovlivněn věkem (Berrington De Gonzalez et al., 2010; Bosy-Westphal & Müller, 2015; Gallagher et al., 1996), jelikož v pozdější fázi života dochází nejen snižování výšky postavy, ale také k nárůstu tělesné hmotnosti (Gallagher et al., 1996). Na našem testovacím souboru probíhalo zvyšování tělesné hmotnosti prakticky do poloviny života, index tělesné hmotnosti se pak ale na našem souboru zvyšoval po celou dobu života, a to ve všech skupinách. Stejně jako uvádí Junno et al. (2018), tělesná hmotnost jedinců se v jejich práci prakticky konstantně zvyšovala po velkou část života (do 75 let), i když od zhruba 40. roku života docházelo ke snižování výšky postavy. Morfometrická STBIB metoda poskytuje spolehlivé odhady až do páté dekády života, od kdy má tendenci nadhodnocovat výsledný odhad (Junno et al., 2018). To z části odporuje našim výsledkům, kdy se u vícero rovnic zvyšovala chyba odhadu až do 50. roku života a poté se chyba odhadu naopak zvyšovat přestala. Při aplikacích na minulé populace je však nadhodnocování od 50 let relativně zanedbatelné, jelikož naši předci se těchto věků dožívali nejspíše jen velmi výjimečně, jelikož jedinci minulých populací (z archeologických kosterních souborů) zřídka obsahují velké množství jedinců v pokročilém věku a představují obecně mladší věkovou skupinu (Sládek et al., 2018). Změny spojené s věkem pak zahrnují také úbytek fyzické aktivity (Evans & Campbell, 1993), který se projevuje úbytkem tukuprosté tkáně (a to především úbytkem svalové hmoty) (Kyle et al., 2004). Úroveň poklesu tukuprosté tkáně (a především svalů) lze ale ovlivnit množstvím fyzické aktivity, kde se ukazuje, že jedinci, kteří jsou aktivní po celý život mají nižší úbytek svalové hmoty, a naopak nenabírají větší množství tkáně tukové (Evans & Campbell, 1993). To lze pozorovat i na našem testovacím souboru při pohledu na rozdíl mezi aktivní a neaktivní částí souboru.

Odlišnost mezi mužskými a ženskými rovnicemi a jejich odhadů nejspíše tkví ve odlišných proporcích těl u žen v oblasti trupu, což má za následek odlišnosti bi-cristální šíře (Ruff, 2000). I když je podle některých autorů využití pohlavně specifických rovnic logickou a preferovanou variantou (Elliott et al., 2016a; Ruff et al., 2012), může použití pohlavně nespecifických rovnic poskytovat obdobně dobře vykazující výsledky pokud není pohlaví známé (Sládek et al., 2018).

Rozdíly mezi pohlavně specifickými rovnicemi a odlišnostmi v tělesném složení mezi pohlavími nám naznačují, že také kosterní rozměry jsou v čase plastické, což jsme v rámci průřezových dat potvrdili i na našem testovacím souboru.

Junno a kolektiv se ve své práci z roku 2018 zabývali otázkou, zda jsou skeletální rozměry v dospělosti plastické či nikoliv, a do jaké míry jsou schopny odrážet tělesnou hmotnost. Autoři uvádějí, že vzhledem ke zvyšující se celkové hmotnosti se zvyšuje i bi-cristální šíře. Z důvodu snižování výšky postavy pak dochází ke kompenzačnímu vztahu mezi výškou postavy a bi-cristální šíří, což má za následek, že odhady hmotnosti založené na morfometrických rovnicích lépe reflektují aktuální hmotnost než mechanické metody (Junno et al., 2018). To by odpovídalo i výsledkům této práce, kdy morfometrické metody byly spolehlivější než metody mechanické. Zároveň lze změnu kosterních rozměrů pro morfometrické rovnice v souvislosti s věkem potvrdit i touto prací. To by mohlo naznačovat, že by morfometrické metody byly také vhodnější pro individuální odhady pro forenzní účely. Změnu rozměru bi-cristální šíře v průběhu života potvrzuje i studie Bergera a kolektivu z roku 2011. V této práci se bi-cristální šíře mezi 20. a 80. rokem života průměrně zvýšila o 22 milimetrů (Berger et al., 2011). Je však nutné zmínit, že šlo o průřezová data, která byla použita napříč věkovými skupinami stejně jako v této práci. Přesto se nabízí závěr, že s přihlédnutím ke změnám tělesných rozměrů v čase mohou být morfometrické metody spolehlivější pro individuální odhad tělesné hmotnosti, zejména pak u starších osob, nejspíše však pouze v normálním rozložení BMI.

Naše výsledky ukazují také na nárůst FHD s věkem, což taktéž odpovídá studii (Berger et al., 2011), ale odporuje studii (Ruff et al., 1991). Shoda s Bergerem a kolektivem může být ale pouze proto, že jsme oba použili průřezový soubor a nárůst je jen důsledkem sekulárního trendu. Práce Bergera a kolektivu prokázala změnu velikosti průměru hlavičky stehenní kosti od 20 do 80 let, kdy se průměr hlavičky průměrně zvětšil o 3,3 milimetru za uplynulých 60 let (Berger et al., 2011). Ruff a kolektiv v roce 1991 naopak uvádí, že se velikost hlavičky stehenní kosti nemění, což uvádí i práce Liebermana a kolektivu z roku 2001, což znamená, že odhadovaná hmotnost je hmotnost, které jedinec dosáhl po dovršení dospělosti (Ruff, 2002). Lineární rozměr průměru hlavičky stehenní kosti tedy odráží tělesnou hmotnost jedince v době dovršení dospělosti a nemusí odpovídat aktuální hmotnosti v návaznosti na senescenční změny (Chevalier et al., 2016). Malé změny kosterních rozměrů však nemusí být vždy vnímány zcela negativně – z pohledu paleoantropologie a bioarcheologie by změny mohly lépe odolávat senescenčním změnám spojeným s věkem a také složení těla, potažmo přímo nárůstu tukové tkáně.

Limitem této práce by mohlo být, že se v našem případě jednalo o průřezová data a nikoliv longitudinální, a to ať v rámci hodnocení složení těla, tak v rámci kosterních rozměrů v souvislosti s věkem. Jak bylo zaznamenáno v práci Junno a kolektivu z roku 2018, rozdíl mezi longitudinálními daty na živých jedincích a průřezovými daty na skeletálních šířkách s převodem na živé jedince ukázal, že bi-cristální šíře se u živých lidí na longitudinálních datech zvyšovala s věkem strměji než u dat průřezových. Bi-cristální šíře je u kosterních sbírek brána výhradně z průřezových dat (Junno et al., 2018). Autoři přikládají odlišnost mezi průřezovými a longitudinálními daty právě změnám při zvýšení tloušťky měkkých tkání (především pak tkáně tukové) při měření kaliperem, které se pak neberou v potaz v případě změn spojených s věkem a obecně pak sekulárním trendům a z nich následných implikací (Junno et al., 2018). Junno a kolektiv ve své práci z roku 2018 taktéž uvedli, že zvýšené množství tuku v oblasti *crista iliaca* vede k rozšíření bi-cristální šíře. V obou případech však poskytují velmi podobné výsledky, které mají relativně nízký vliv na morfometrický odhad hmotnosti těla z kostry. Tloušťka měkkých tkání (pojivové a tukové tkáně) se s přibývajícím věkem zvyšuje (Bosy-Westphal & Müller, 2015) a může tedy ovlivňovat výsledný odhad hmotnosti těla z kostry (Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013). Právě tloušťka tkání (pojivové a tukové) je důležitá i pro odhad složení těla, například při antropometrickém měření kaliperem. Proto je u morfometrických rovnic nutné převádět skeletální bi-cristální šíři na živoucí bi-cristální šíři (Ruff et al., 2005), jelikož jsme naše data získávaly z DEXA snímků. U mechanických rovnic jsme u FHD takový převod neprováděli. Vzhledem k DEXA snímkům a tloušťce tkání lze v souvislosti se složením těla ještě zmínit, že DEXA navíc předpokládá konstantní hodnotu hydratace 73 %, která ale není konstantní a není ani u všech lidí stejná, což může ovlivnit výsledky složení těla. Měření složení těla může také ovlivňovat rozložení tuku, protože pixely, které obsahují kost srovnávají složení z přilehlých pixelů, které však mohou mít odlišný obsah tuku okolo kosti (Williams et al., 2006), což může ovlivnit výslednou hodnotu procentuálního zastoupení tuku v těle.

Pro tuto diplomovou práci pak z DEXA snímků vzniká ještě jeden problém. Jelikož přístroj Hologic Horizon A tvoří snímky pomocí izocentrického vějířového svazku (*fan beam*), dochází při tvorbě snímku k minimálnímu zkreslení obrazu, a to především v mediolaterálním směru (Boudousq et al., 2005; Griffiths et al., 1997). Zkreslení je přímo uvnitř programu APEX korigováno a snímek je upraven při využití měření vzdálenosti ze snímku (*ruler*), ale tato funkce je dostupná pouze u celotělového snímku. V našem případě jsme pomocí programu APEX změřili pouze bi-cristální šíři na celotělovém snímku, ale nebylo možné změřit hlavici

stehenní kosti. Snímky se zaměřením pouze na kyčle jsme proto vyexportovali do externího programu ImageJ, kde však korektura zkreslení obrazu provedena nebyla, což by mohlo zkreslit naše výsledky. Jelikož jsme však přístroj neměli k dispozici, nebylo možné ověřit k jak velké distorzi obrazu na tomto konkrétním přístroji dochází. Vzhledem k jediné dostupné publikaci, která srovnává mnohem starší (*fan beam*) přístroj společnosti Hologic a (*pencil beam*) společnosti Lunar lze však očekávat, že s postupem technologií je nyní distorze obrazu od středu snímku do kraje nižší než 8,2 %, jak je uvedeno v této práci (Pocock et al., 1997) a to především z důvodu schopnosti přístroje Hologic Horizon A tvořit kvalitnější snímky pomocí otočného ramene, lepšího detektorového pole a kalibraci pixel-by-pixel (Zdroj 5).

Při využití predikčních rovnic odhadu hmotnosti je třeba rozlišovat, zda bude rovnice aplikována na minulé či současné populace. Na obě uplatnění je třeba nahlížet odlišně.

Pokud bychom odhadovali hmotnost těla na jedincích z populací minulých, je vhodné využít rovnice, které v referenčním souboru obsahují jedince, kteří budou mít nižší množství tukové tkáně, budou více sportovně založení a rovnice nebude obsahovat jedince s nadváhou či obezitou (BMI nad 25, potažmo 30 kg/m<sup>2</sup>). Při absenci nadváhy či obezity byl odhad hmotnosti spolehlivější a absence nadváhy či obezity je také jev nejspíše charakteristický pro minulé populace.

Pokud bychom využili metody odhadu hmotnosti těla z kostry pro forenzní účely, nabízelo by se využít rovnice, které by v referenčním souboru obsahovaly širší škálu rozměrů jedinců z industrializované společnosti, tj. včetně fyzicky méně aktivních jedinců, aby soubor lépe odpovídal současné „běžné populaci“. V případě nadváhy a obezity však zahrnutí těchto jedinců do predikční rovnice neposkytuje vždy spolehlivější odhad, jelikož množství tukové tkáně negativně ovlivňuje výsledný odhad hmotnosti těla z kostry, jak bylo dokázáno na našem souboru aktivních a neaktivních jedinců. Navíc rovnice z práce Elliott et al. (2016b) postavená právě na větším množství lidí s nadváhou či obezitou fungovala sice na aktivních mužích o trochu lépe oproti ostatním mechanickým rovnicím, u neaktivních však nikoliv. Ženská rovnice ze stejné práce pak měla vyšší chybu odhadu a fungovala hůře na neaktivní části souboru než na té aktivní. Nejvyšší celkové spolehlivosti však bylo dosaženo u rovnic z publikace Ruff et al. z roku 2024, u kterých byl referenční soubor taktéž omezen, avšak pouze do BMI 30 kg/m<sup>2</sup>, což naznačuje, že je i pro tyto účely nezbytné omezit referenční vzorek, který bude blíže charakterizovat danou populaci. V takovém případě se pak zdá, že jsou naše výsledky v souladu s předchozími pracemi, kdy při omezení jedinců dle BMI dochází k vylepšení spolehlivosti odhadu (Chevalier et al., 2016; Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013; Schaffer, 2016). U

obézních jedinců jsou odhady hmotnosti stále nespolehlivé a zahrnutí takových jedinců do referenčního souboru nejspíše způsobí ještě větší nespolehlivost potencionální vytvořené rovnice. Aplikace rovnic pro odhad hmotnosti těla z kostry se zdá být pro forenzní účely velmi omezená a literatura uvádí, že se v praxi příliš nevyužívá, i když snahy o její aplikaci lze nalézt (Chevalier et al., 2016; Lacoste Jeanson et al., 2017; Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013; Schaffer, 2016). Jelikož ale špatná interpretace odhadu může pro forenzní účely přinášet mnohé právní důsledky je v současné době četnost využití těchto metod v praxi mizivá (Lorkiewicz-Muszyńska et al., 2013). V nedávné práci Ruff et al. (2024), ze které jsme čerpali některé morfometrické rovnice však autor uvádí, že lze využít odhad hmotnosti těla z kostry pro forenzní účely, ale pouze v případě omezení cílového jedince na skupinu s normálním BMI ( $18,5\text{--}25\text{ kg/m}^2$ ) a nemusí být nutně použitelná v rámci různých složení těl populací a odlišných distribucí BMI ve společnosti. Mnohem více prací pak proto bude nutných k pochopení a hlubšímu adresování této problematiky.

V paleoantropologickém i forenzním odvětví je tak odhad hmotnosti jednotlivce problematický a je spíše uplatnitelný na populační bázi, a to pro paleoantropologické účely než pro individuální účely forenzní, není-li blíže specifikováno složení těla jedince v populaci. Pokud však složení těla specifikováno je, zdají se být metody odhadu hmotnosti těla z kostry, a především pak morfometrická metoda, relativně spolehlivou metodou pro odhad hmotnosti těla z kostry i na současných populacích.

## 6. Závěr

Závěrem lze tedy konstatovat, že množství tukové tkáně ovlivňuje chybu odhadu hmotnosti těla z kostry. Čím vyšší je podíl tukové tkáně, tím méně spolehlivě jsou schopny rovnice predikovat hmotnost jedince a tím více podhodnocují hmotnost těla. U jedinců s nízkým podílem tukové tkáně je však situace opačná a rovnice mají mnohdy tendenci nadhodnocovat vůči skutečné hmotnosti. V souvislosti s indexem tělesné hmotnosti měly testované rovnice tendenci podhodnocovat hmotnost u jedinců s nadváhou, přičemž u obézních jedinců dosahovala chyba odhadu až téměř 100 %. Nejspolehlivější odhady hmotnosti těla z kostry byly zaznamenány u jedinců v normálním rozmezí BMI (18,5–25 kg/m<sup>2</sup>).

U aktivní skupiny mužů i žen pozorujeme spolehlivější odhad hmotnosti těla z kostry než u jedinců ze skupin neaktivních.

Shodně s literaturou jsme potvrdili, že se složení těla v průběhu života mění. Se zvyšujícím se věkem dochází k úbytku tukuprosté tkáně, která je nahrazována tkání tukovou. Celková hmotnost byla nejspolehlivěji odhadována u jedinců mladých a postupně se chyba odhadu s přibývajícím věkem zvyšovala, a to více v neaktivní skupině. Okolo 50. roku života se však průměrná chyba odhadu u mnohých rovnic přestala zvyšovat a začala naopak mírně klesat.

Nejnižší průměrná chyba odhadu byla na celém souboru zaznamenána u morfometrické pohlavně nespecifické rovnice z publikace Ruff et al. (2024), která je tak nejvhodnější pro použití na současné české populaci.

## 7. Zdroje

### 7.1. Zdroje literatury

- Aiello, L. C., & Wood, B. A. (1994). Cranial variables as predictors of hominine body mass. *American Journal of Physical Anthropology*, 95(4), 409–426. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330950405>
- Andreoli, A., Scalzo, G., Masala, S., Tarantino, U., & Guglielmi, G. (2009). Body composition assessment by dual-energy X-ray absorptiometry (DXA). *La Radiologia Medica*, 114(2), 286–300. <https://doi.org/10.1007/s11547-009-0369-7>
- Antón, S. C., & Swisher, C. C. (2004). Early Dispersals of *Homo* from Africa. *Annual Review of Anthropology*, 33(1), 271–296. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.33.070203.144024>
- Auerbach, B. M. (2011). Methods for estimating missing human skeletal element osteometric dimensions employed in the revised fully technique for estimating stature. *American Journal of Physical Anthropology*, 145(1), 67–80. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21469>
- Auerbach, B. M., & Ruff, C. B. (2004). Human body mass estimation: A comparison of „morphometric" and „mechanical" methods. *American Journal of Physical Anthropology*, 125(4), 331–342. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20032>
- Auerbach, B. M., & Ruff, C. B. (2010). Stature estimation formulae for indigenous North American populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 141(2), 190–207. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21131>
- Bachrach, L. K. (2000). Dual energy X-ray absorptiometry (DEXA) measurements of bone density and body composition: Promise and pitfalls. *Journal of Pediatric Endocrinology & Metabolism: JPEM*, 13 Suppl 2, 983–988.
- Baker, J. F., Davis, M., Alexander, R., Zemel, B. S., Mostoufi-Moab, S., Shults, J., Sulik, M., Schiferl, D. J., & Leonard, M. B. (2013). Associations between body composition and bone density and structure in men and women across the adult age spectrum. *Bone*, 53(1), 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2012.11.035>
- Baumgartner, R. N. (2000). Body Composition in Healthy Aging. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 904(1), 437–448. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2000.tb06498.x>

- Beck, T. (2003). Measuring the structural strength of bones with dual-energy X-ray absorptiometry: Principles, technical limitations, and future possibilities. *Osteoporosis International*, 14(0), 81–88. <https://doi.org/10.1007/s00198-003-1478-0>
- Behnke, A. R., Feen, B. G., & Welham, W. C. (1942). THE SPECIFIC GRAVITY OF HEALTHY MEN: BODY WEIGHT ÷ VOLUME AS AN INDEX OF OBESITY. *Journal of the American Medical Association*, 118(7), 495. <https://doi.org/10.1001/jama.1942.02830070001001>
- Berger, A. (2002). How does it work?: Bone mineral density scans. *BMJ*, 325(7362), 484–484. <https://doi.org/10.1136/bmj.325.7362.484>
- Berger, A. A., May, R., Renner, J. B., Viradia, N., & Dahners, L. E. (2011). Surprising evidence of pelvic growth (widening) after skeletal maturity. *Journal of Orthopaedic Research*, 29(11), 1719–1723. <https://doi.org/10.1002/jor.21469>
- Berrington De Gonzalez, A., Hartge, P., Cerhan, J. R., Flint, A. J., Hannan, L., MacInnis, R. J., Moore, S. C., Tobias, G. S., Anton-Culver, H., Freeman, L. B., Beeson, W. L., Clipp, S. L., English, D. R., Folsom, A. R., Freedman, D. M., Giles, G., Hakansson, N., Henderson, K. D., Hoffman-Bolton, J., ... Thun, M. J. (2010). Body-Mass Index and Mortality among 1.46 Million White Adults. *New England Journal of Medicine*, 363(23), 2211–2219. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1000367>
- Bianconi, E., Piovesan, A., Facchin, F., Beraudi, A., Casadei, R., Frabetti, F., Vitale, L., Pelleri, M. C., Tassani, S., Piva, F., Perez-Amodio, S., Strippoli, P., & Canaider, S. (2013). An estimation of the number of cells in the human body. *Annals of Human Biology*, 40(6), 463–471. <https://doi.org/10.3109/03014460.2013.807878>
- Binkovitz, L. A., & Henwood, M. J. (2007). Pediatric DXA: Technique and interpretation. *Pediatric Radiology*, 37(1), 21–31. <https://doi.org/10.1007/s00247-006-0153-y>
- Blake, G. M., & Fogelman, I. (2010). An Update on Dual-Energy X-Ray Absorptiometry. *Seminars in Nuclear Medicine*, 40(1), 62–73. <https://doi.org/10.1053/j.semnuclmed.2009.08.001>
- Bolam, K. A., Van Uffelen, J. G. Z., & Taaffe, D. R. (2013). The effect of physical exercise on bone density in middle-aged and older men: A systematic review. *Osteoporosis International*, 24(11), 2749–2762. <https://doi.org/10.1007/s00198-013-2346-1>
- Bosy-Westphal, A., & Müller, M. J. (2015). Identification of skeletal muscle mass depletion across age and BMI groups in health and disease—There is need for a unified definition. *International Journal of Obesity*, 39(3), 379–386. <https://doi.org/10.1038/ijo.2014.161>

- Boudousq, V., Goulart, D. M., Dinten, J. M., De Kerleau, C. C., Thomas, E., Mares, O., & Kotzki, P. O. (2005). Image resolution and magnification using a cone beam densitometer: Optimizing data acquisition for hip morphometric analysis. *Osteoporosis International*, 16(7), 813–822. <https://doi.org/10.1007/s00198-004-1751-x>
- Brener, A., Waksman, Y., Rosenfeld, T., Levy, S., Peleg, I., Raviv, A., Interator, H., & Lebenthal, Y. (2021). The heritability of body composition. *BMC Pediatrics*, 21(1), 225. <https://doi.org/10.1186/s12887-021-02695-z>
- Brown, J. L., & Orians, G. H. (1970). Spacing Patterns in Mobile Animals. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1(1), 239–262. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.01.110170.001323>
- Brožek, J., Grande, F., Anderson, J. T., & Keys, A. (1963). Densitometric analysis of body composition: Revision of some quantitative assumptions. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 110(1), 113–140. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1963.tb17079.x>
- Byard, R. W. (2012). The complex spectrum of forensic issues arising from obesity. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 8(4), 402–413. <https://doi.org/10.1007/s12024-012-9322-5>
- Calder, W. A. (1984). *Size, function, and life history*. Harvard University Press.
- Cipryan, L., Kutac, P., Dostal, T., Zimmermann, M., Krajcigr, M., Jandackova, V., Sram, R., Jandacka, D., & Hofmann, P. (2020). Regular running in an air-polluted environment: Physiological and anthropometric protocol for a prospective cohort study (Healthy Aging in Industrial Environment Study – Program 4). *BMJ Open*, 10(12), e040529. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-040529>
- Cohen, J. (2009). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed., reprint). Psychology Press.
- Coin, A., Sergi, G., Minicuci, N., Giannini, S., Barbiero, E., Manzato, E., Pedrazzoni, M., Minisola, S., Rossini, M., Del Puente, A., Zamboni, M., Inelmen, E. M., & Enzi, G. (2008). Fat-free mass and fat mass reference values by dual-energy X-ray absorptiometry (DEXA) in a 20–80 year-old Italian population. *Clinical Nutrition*, 27(1), 87–94. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2007.10.008>
- Cullum, I. D., Ell, P. J., & Ryder, J. P. (1989). X-ray dual-photon absorptiometry: A new method for the measurement of bone density. *The British Journal of Radiology*, 62(739), 587–592. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-62-739-587>

- Damuth, J. D., & MacFadden, B. J. (Ed.). (2005). *Body size in mammalian paleobiology: Estimation and biological implications*. Cambridge University Press.
- De Mendonça, M. C. (2000). Estimation of height from the length of long bones in a Portuguese adult population. *American Journal of Physical Anthropology*, 112(1), 39–48. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(200005\)112:1<39::AID-AJPA5>3.0.CO;2-#](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(200005)112:1<39::AID-AJPA5>3.0.CO;2-#)
- Deurenberg, P., & Deurenberg-Yap, M. (2009). Ageing and changes in body composition: The importance of valid measurements. In *Food for the Ageing Population* (s. 169–183). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9781845695484.2.169>
- Douchi, T., Oki, T., Nakamura, S., Ijuin, H., Yamamoto, S., & Nagata, Y. (1997). The effect of body composition on bone density in pre- and postmenopausal women. *Maturitas*, 27(1), 55–60. [https://doi.org/10.1016/S0378-5122\(97\)01112-2](https://doi.org/10.1016/S0378-5122(97)01112-2)
- Duyar, I., Pelin, C., & Zagyapan, R. (2006). A new method of stature estimation for forensic anthropological application. *Anthropological Science*, 114(1), 23–27. <https://doi.org/10.1537/ase.041217>
- Elliott, M., Kurki, H., Weston, D. A., & Collard, M. (2016a). Estimating body mass from postcranial variables: An evaluation of current equations using a large known-mass sample of modern humans. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 8(4), 689–704. <https://doi.org/10.1007/s12520-015-0251-6>
- Elliott, M., Kurki, H., Weston, D. A., & Collard, M. (2016b). Estimating body mass from skeletal material: New predictive equations and methodological insights from analyses of a known-mass sample of humans. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 8(4), 731–750. <https://doi.org/10.1007/s12520-015-0252-5>
- Ellis, K. J. (2000). Human Body Composition: In Vivo Methods. *Physiological Reviews*, 80(2), 649–680. <https://doi.org/10.1152/physrev.2000.80.2.649>
- Erselcan, T., Candan, F., Saruhan, S., & Ayca, T. (2000). Comparison of Body Composition Analysis Methods in Clinical Routine. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 44(5–6), 243–248. <https://doi.org/10.1159/000046691>
- Evans, Paggiosi, M. A., Eastell, R., & Walsh, J. S. (2015). Bone Density, Microstructure and Strength in Obese and Normal Weight Men and Women in Younger and Older Adulthood. *Journal of Bone and Mineral Research*, 30(5), 920–928. <https://doi.org/10.1002/jbmr.2407>
- Evans, W. J., & Campbell, W. W. (1993). Sarcopenia and Age-Related Changes in Body Composition and Functional Capacity. *The Journal of Nutrition*, 123, 465–468. [https://doi.org/10.1093/jn/123.suppl\\_2.465](https://doi.org/10.1093/jn/123.suppl_2.465)

- Farr, J. N., & Khosla, S. (2015). Skeletal changes through the lifespan—From growth to senescence. *Nature Reviews Endocrinology*, 11(9), 513–521. <https://doi.org/10.1038/nrendo.2015.89>
- Feldesman, M. R., Kleckner, J. G., & Lundy, J. K. (1990). Femur/stature ratio and estimates of stature in mid- and late-pleistocene fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 83(3), 359–372. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330830309>
- Ferretti, J. L., Capozza, R. F., Cointry, G. R., Capiglioni, R., Roldan, E. J., & Zanchetta, J. R. (2000). Densitometric and tomographic analyses of musculoskeletal interactions in humans. *Journal of Musculoskeletal & Neuronal Interactions*, 1(1), 31–34.
- Fogelholm, M., & Van Marken Lichtenbelt, W. (1997). Comparison of body composition methods: A literature analysis. *European Journal of Clinical Nutrition*, 51(8), 495–503. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1600448>
- Forbes, G. B. (1987). *Human Body Composition*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4654-1>
- Formicola, V. (1993). Stature reconstruction from long bones in ancient population samples: An approach to the problem of its reliability. *American Journal of Physical Anthropology*, 90(3), 351–358. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330900309>
- Fully, G. (1956). [New method of determination of the height]. *Annales De Medecine Legale, Criminologie, Police Scientifique Et Toxicologie*, 36(5), 266–273.
- Gallagher, D., Chung, S., & Akram, M. (2013). Body Composition. In *Encyclopedia of Human Nutrition* (s. 191–199). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375083-9.00027-1>
- Gallagher, D., Visser, M., Sepulveda, D., Pierson, R. N., Harris, T., & Heymsfield, S. B. (1996). How Useful Is Body Mass Index for Comparison of Body Fatness across Age, Sex, and Ethnic Groups? *American Journal of Epidemiology*, 143(3), 228–239. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a008733>
- Garg, M., & Kharb, S. (2013). Dual energy X-ray absorptiometry: Pitfalls in measurement and interpretation of bone mineral density. *Indian Journal of Endocrinology and Metabolism*, 17(2), 203. <https://doi.org/10.4103/2230-8210.109659>
- Grabowski, M., Hatala, K. G., & Jungers, W. L. (2018). Body mass estimates of the earliest possible hominins and implications for the last common ancestor. *Journal of Human Evolution*, 122, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2018.05.001>
- Grabowski, M., Hatala, K. G., Jungers, W. L., & Richmond, B. G. (2015). Body mass estimates of hominin fossils and the evolution of human body size. *Journal of Human Evolution*, 85, 75–93. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2015.05.005>

- Griffiths, M. R., Noakes, K. A., & Pocock, N. A. (1997). Correcting the Magnification Error of Fan Beam Densitometers. *Journal of Bone and Mineral Research*, 12(1), 119–123. <https://doi.org/10.1359/jbmr.1997.12.1.119>
- Grine, F. E., Jungers, W. L., Tobias, P. V., & Pearson, O. M. (1995). FossilHomo femur from Berg Aukas, northern Namibia. *American Journal of Physical Anthropology*, 97(2), 151–185. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330970207>
- Haarbo, J., Gotfredsen, A., Hassager, C., & Christiansen, C. (1991). Validation of body composition by dual energy X-ray absorptiometry (DEXA). *Clinical Physiology*, 11(4), 331–341. <https://doi.org/10.1111/j.1475-097X.1991.tb00662.x>
- Heymsfield, S. B., Ebbeling, C. B., Zheng, J., Pietrobelli, A., Strauss, B. J., Silva, A. M., & Ludwig, D. S. (2015). Multi-component molecular-level body composition reference methods: Evolving concepts and future directions. *Obesity Reviews*, 16(4), 282–294. <https://doi.org/10.1111/obr.12261>
- Holliday, T. W., & Ruff, C. B. (1997). Ecogeographical patterning and stature prediction in fossil hominids: Comment on M.R. Feldesman and R.L. Fountaine, *American Journal of Physical Anthropology* (1996) 100:207-224. *American Journal of Physical Anthropology*, 103(1), 137–140. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-8644\(199705\)103:1<137::AID-AJPA10>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-8644(199705)103:1<137::AID-AJPA10>3.0.CO;2-1)
- Chen, Z., Wang, Z., Lohman, T., Heymsfield, S. B., Outwater, E., Nicholas, J. S., Bassford, T., LaCroix, A., Sherrill, D., Punyanitya, M., Wu, G., & Going, S. (2007). Dual-Energy X-Ray Absorptiometry Is a Valid Tool for Assessing Skeletal Muscle Mass in Older Women. *The Journal of Nutrition*, 137(12), 2775–2780. <https://doi.org/10.1093/jn/137.12.2775>
- Chevalier, T., Clarys, J. P., Lefèvre, P., Beauthier, J., Louryan, S., & Cattrysse, E. (2018). Body mass prediction from femoral volume and sixteen other femoral variables in the elderly: BMI and adipose tissue effects. *American Journal of Physical Anthropology*, 166(1), 26–42. <https://doi.org/10.1002/ajpa.23396>
- Chevalier, T., Lefèvre, P., Clarys, J. P., & Beauthier, J.-P. (2016). The accuracy of body mass prediction for elderly specimens: Implications for paleoanthropology and legal medicine. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 43, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.jflm.2016.07.015>
- Chumlea, W., Guo, S., Kuczmarski, R., Flegal, K., Johnson, C., Heymsfield, S., Lukaski, H., Friedl, K., & Hubbard, V. (2002). Body composition estimates from NHANES III

- bioelectrical impedance data. *International Journal of Obesity*, 26(12), 1596–1609.  
<https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0802167>
- Churchill, S. E., Berger, L. R., Hartstone-Rose, A., & Zondo, B. H. (2012). Body size in African Middle Pleistocene *Homo*. In S. C. Reynolds & A. Gallagher (Ed.), *African Genesis* (1. vyd., s. 319–346). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9781139096164.021>
- İşcan, M. Y. (2005). Forensic anthropology of sex and body size. *Forensic Science International*, 147(2–3), 107–112. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.09.069>
- Jandacka, D., Uchytíl, J., Zahradník, D., Farana, R., Vilimek, D., Skypala, J., Urbaczka, J., Plešek, J., Motyka, A., Blaschova, D., Beinhauerova, G., Rygelova, M., Brtva, P., Balazova, K., Horka, V., Malus, J., Silvernail, J. F., Irwin, G., Nieminen, M. T., ... Hamill, J. (2020). Running and Physical Activity in an Air-Polluted Environment: The Biomechanical and Musculoskeletal Protocol for a Prospective Cohort Study 4HAIE (Healthy Aging in Industrial Environment—Program 4). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(23), 9142.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph17239142>
- Jang, J. Y., Kim, M., Lee, D., & Won, C. W. (2023). Effect of total knee replacement on skeletal muscle mass measurements using dual energy X-ray absorptiometry. *Scientific Reports*, 13(1), 2908. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29069-y>
- Johansson, A. G., Forslund, A., Sjödin, A., Mallmin, H., Hambræus, L., & Ljunghall, S. (1993). Determination of body composition—A comparison of dual-energy x-ray absorptiometry and hydrodensitometry. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 57(3), 323–326. <https://doi.org/10.1093/ajcn/57.3.323>
- Jungers, W. L. (Ed.). (1985). *Size and Scaling in Primate Biology*. Springer US.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3647-9>
- Junno, J.-A., Niskanen, M., Maijanen, H., Holt, B., Sladek, V., Niinimäki, S., & Berner, M. (2018). The effect of age and body composition on body mass estimation of males using the stature/bi-iliac method. *Journal of Human Evolution*, 115, 122–129.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.10.006>
- Kanis, J. A., Burlet, N., Cooper, C., Delmas, P. D., Reginster, J.-Y., Borgstrom, F., Rizzoli, R., & European Society for Clinical and Economic Aspects of Osteoporosis and Osteoarthritis (ESCEO). (2008). European guidance for the diagnosis and management of osteoporosis in postmenopausal women. *Osteoporosis International: A Journal Established as Result of Cooperation between the European Foundation for*

- Osteoporosis and the National Osteoporosis Foundation of the USA*, 19(4), 399–428.  
<https://doi.org/10.1007/s00198-008-0560-z>
- Kohrt, W. M. (1998). Preliminary evidence that DEXA provides an accurate assessment of body composition. *Journal of Applied Physiology*, 84(1), 372–377.  
<https://doi.org/10.1152/jappl.1998.84.1.372>
- Krogman, W. M. (1978). *The human skeleton in forensic medicine*. C.C. Thomas.
- Kuriyan, R. (2018). Body composition techniques. *Indian Journal of Medical Research*, 148(5), 648. [https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR\\_1777\\_18](https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_1777_18)
- Kutac, P., Buzga, M., Elavsky, S., Bunc, V., Jandacka, D., & Krajcigr, M. (2021). The Effect of Regular Physical Activity on Muscle and Adipose Tissue in Premenopausal Women. *Applied Sciences*, 11(18), 8655. <https://doi.org/10.3390/app11188655>
- Kutáč, P., Bunc, V., & Sigmund, M. (2019). Whole-body dual-energy X-ray absorptiometry demonstrates better reliability than segmental body composition analysis in college-aged students. *PLOS ONE*, 14(4), e0215599.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215599>
- Kyle, U. G., Genton, L., Gremion, G., Slosman, D. O., & Pichard, C. (2004). Aging, physical activity and height-normalized body composition parameters. *Clinical Nutrition*, 23(1), 79–88. [https://doi.org/10.1016/S0261-5614\(03\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0261-5614(03)00092-X)
- Kyle, U. G., Genton, L., Slosman, D. O., & Pichard, C. (2001). Fat-free and fat mass percentiles in 5225 healthy subjects aged 15 to 98 years. *Nutrition*, 17(7–8), 534–541.  
[https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(01\)00555-X](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(01)00555-X)
- Lacoste Jeanson, A., Santos, F., Villa, C., Dupej, J., Lynnerup, N., & Brůžek, J. (2017). Body mass estimation from the skeleton: An evaluation of 11 methods. *Forensic Science International*, 281, 183.e1–183.e8. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.10.026>
- Laskey, M. A. (1996). Dual-energy X-ray absorptiometry and body composition. *Nutrition*, 12(1), 45–51. [https://doi.org/10.1016/0899-9007\(95\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0899-9007(95)00017-8)
- Laskey, M. A., Flaxman, M. E., Barber, R. W., Trafford, S., Hayball, M. P., Lyttle, K. D., Crisp, A. J., & Compston, J. E. (1991). Comparative performance *in vitro* and *in vivo* of Lunar DPX and Hologic QDR-1000 dual energy X-ray absorptiometers. *The British Journal of Radiology*, 64(767), 1023–1029. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-64-767-1023>
- Lee, C. D., Blair, S. N., & Jackson, A. S. (1999). Cardiorespiratory fitness, body composition, and all-cause and cardiovascular disease mortality in men. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 69(3), 373–380. <https://doi.org/10.1093/ajcn/69.3.373>

- Lewiecki, E. M., Binkley, N., Morgan, S. L., Shuhart, C. R., Camargos, B. M., Carey, J. J., Gordon, C. M., Jankowski, L. G., Lee, J.-K., & Leslie, W. D. (2016). Best Practices for Dual-Energy X-ray Absorptiometry Measurement and Reporting: International Society for Clinical Densitometry Guidance. *Journal of Clinical Densitometry*, 19(2), 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.jocd.2016.03.003>
- Lewis, M. K., Blake, G. M., & Fogelman, I. (1994). Patient dose in dual x-ray absorptiometry. *Osteoporosis International*, 4(1), 11–15. <https://doi.org/10.1007/BF02352255>
- Lieberman, D. E., Devlin, M. J., & Pearson, O. M. (2001). Articular area responses to mechanical loading: Effects of exercise, age, and skeletal location. *American Journal of Physical Anthropology*, 116(4), 266–277. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1123>
- Lim, S., Joung, H., Shin, C. S., Lee, H. K., Kim, K. S., Shin, E. K., Kim, H.-Y., Lim, M.-K., & Cho, S.-I. (2004). Body composition changes with age have gender-specific impacts on bone mineral density. *Bone*, 35(3), 792–798. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2004.05.016>
- Lorkiewicz-Muszyńska, D., Przysańska, A., Kociemba, W., Sroka, A., Rewekant, A., Żaba, C., & Paprzycki, W. (2013). Body mass estimation in modern population using anthropometric measurements from computed tomography. *Forensic Science International*, 231(1–3), 405.e1-405.e6. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2013.05.017>
- Lundy, J. K. (1985). The mathematical versus anatomical methods of stature estimate from long bones: *The American Journal of Forensic Medicine and Pathology*, 6(1), 73–76. <https://doi.org/10.1097/00000433-198503000-00013>
- Maïmoun, L., & Sultan, C. (2011). Effects of physical activity on bone remodeling. *Metabolism*, 60(3), 373–388. <https://doi.org/10.1016/j.metabol.2010.03.001>
- Manninen, A. H. (2006). Very-low-carbohydrate diets and preservation of muscle mass. *Nutrition & Metabolism*, 3(1), 9. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-3-9>
- Marshall, L. M., Lang, T. F., Lambert, L. C., Zmuda, J. M., Ensrud, K. E., & Orwoll, E. S. (2006). Dimensions and Volumetric BMD of the Proximal Femur and Their Relation to Age Among Older U.S. Men. *Journal of Bone and Mineral Research*, 21(8), 1197–1206. <https://doi.org/10.1359/jbmr.060506>
- Masao, F. T., Ichumbaki, E. B., Cherin, M., Barili, A., Boschian, G., Iurino, D. A., Menconero, S., Moggi-Cecchi, J., & Manzi, G. (2016). New footprints from Laetoli (Tanzania) provide evidence for marked body size variation in early hominins. *eLife*, 5, e19568. <https://doi.org/10.7554/eLife.19568>

- Mazess, Barden, H., Bisek, J., & Hanson, J. (1990). Dual-energy x-ray absorptiometry for total-body and regional bone-mineral and soft-tissue composition. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 51(6), 1106–1112. <https://doi.org/10.1093/ajcn/51.6.1106>
- Mazess, Collick, B., Trempe, J., Barden, H., & Hanson, J. (1989). Performance evaluation of a dual-energy X-ray bone densitometer. *Calcified Tissue International*, 44(3), 228–232. <https://doi.org/10.1007/BF02556569>
- Mazess, R. B., & Barden, H. S. (1988). Measurement of bone by dual-photon absorptiometry (DPA) and dual-energy X-ray absorptiometry (DEXA). *Annales Chirurgiae Et Gynaecologiae*, 77(5–6), 197–203.
- McHenry, H. M. (1976). Early hominid body weight and encephalization. *American Journal of Physical Anthropology*, 45(1), 77–83. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330450110>
- McHenry, H. M. (1992). Body size and proportions in early hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 87(4), 407–431. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330870404>
- McHenry, H. M. (1994). Behavioral ecological implications of early hominid body size. *Journal of Human Evolution*, 27(1–3), 77–87. <https://doi.org/10.1006/jhev.1994.1036>
- Miller, R. M., Chambers, T. L., Burns, S. P., & Godard, M. P. (2016). Validating InBody® 570 Multi-frequency Bioelectrical Impedance Analyzer versus DXA for Body Fat Percentage Analysis.: 3576 Board #15 June 4, 8. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48, 991. <https://doi.org/10.1249/01.mss.0000487979.68551.d7>
- Moore, M. K., & Schaefer, E. (2011). A Comprehensive Regression Tree to Estimate Body Weight from the Skeleton\*,†: ESTIMATION OF BODY WEIGHT FROM SKELETON. *Journal of Forensic Sciences*, 56(5), 1115–1122. <https://doi.org/10.1111/j.1556-4029.2011.01819.x>
- Nana, A., Slater, G. J., Stewart, A. D., & Burke, L. M. (2015). Methodology Review: Using Dual-Energy X-Ray Absorptiometry (DXA) for the Assessment of Body Composition in Athletes and Active People. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 25(2), 198–215. <https://doi.org/10.1123/ijsnem.2013-0228>
- Ng, M., Fleming, T., Robinson, M., Thomson, B., Graetz, N., Margono, C., Mullany, E. C., Biryukov, S., Abbafati, C., Abera, S. F., Abraham, J. P., Abu-Rmeileh, N. M. E., Achoki, T., AlBuhairan, F. S., Alemu, Z. A., Alfonso, R., Ali, M. K., Ali, R., Guzman, N. A., ... Gakidou, E. (2014). Global, regional, and national prevalence of overweight and obesity in children and adults during 1980–2013: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet*, 384(9945), 766–781. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60460-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60460-8)

- Nguyen, T. V., Howard, G. M., Kelly, P. J., & Eisman, J. A. (1998). Bone Mass, Lean Mass, and Fat Mass: Same Genes or Same Environments? *American Journal of Epidemiology*, 147(1), 3–16. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a009362>
- Novak, J. M., Bruzek, J., Zamrazilova, H., Vankova, M., Hill, M., & Sedlak, P. (2020). The relationship between adolescent obesity and pelvis dimensions in adulthood: A retrospective longitudinal study. *PeerJ*, 8, e8951. <https://doi.org/10.7717/peerj.8951>
- OECD & European Union. (2022). *Health at a Glance: Europe 2022: State of Health in the EU Cycle*. OECD. <https://doi.org/10.1787/507433b0-en>
- Ogden, C. L., Carroll, M. D., Kit, B. K., & Flegal, K. M. (2014). Prevalence of Childhood and Adult Obesity in the United States, 2011-2012. *JAMA*, 311(8), 806. <https://doi.org/10.1001/jama.2014.732>
- Okunogbe, A., Nugent, R., Spencer, G., Powis, J., Ralston, J., & Wilding, J. (2022). Economic impacts of overweight and obesity: Current and future estimates for 161 countries. *BMJ Global Health*, 7(9), e009773. <https://doi.org/10.1136/bmjgh-2022-009773>
- Pearson. (1899). IV. Mathematical contributions to the theory of evolution.—V. On the reconstruction of the stature of prehistoric races. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 192, 169–244. <https://doi.org/10.1098/rsta.1899.0004>
- Pietrobelli, A., Formica, C., Wang, Z., & Heymsfield, S. B. (1996). Dual-energy X-ray absorptiometry body composition model: Review of physical concepts. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 271(6), E941–E951. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1996.271.6.E941>
- Pisani, P., Renna, M. D., Conversano, F., Casciaro, E., Muratore, M., Quarta, E., Paola, M. D., & Casciaro, S. (2013). Screening and early diagnosis of osteoporosis through X-ray and ultrasound based techniques. *World Journal of Radiology*, 5(11), 398–410. <https://doi.org/10.4329/wjr.v5.i11.398>
- Pocock, N. A., Noakes, K. A., Majerovic, Y., & Griffiths, M. R. (1997). Magnification error of femoral geometry using fan beam densitometers. *Calcified Tissue International*, 60(1), 8–10. <https://doi.org/10.1007/s002239900177>
- Pomeroy, E., Mushrif-Tripathy, V., Kulkarni, B., Kinra, S., Stock, J. T., Cole, T. J., Shirley, M. K., & Wells, J. C. K. (2019). Estimating body mass and composition from proximal femur dimensions using dual energy x-ray absorptiometry. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11(5), 2167–2179. <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0665-z>

- Pomeroy, E., & Stock, J. T. (2012). Estimation of stature and body mass from the skeleton among coastal and mid-altitude andean populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 147(2), 264–279. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21644>
- Pontzer, H., Wood, B. M., & Raichlen, D. A. (2018). Hunter-gatherers as models in public health. *Obesity Reviews*, 19(S1), 24–35. <https://doi.org/10.1111/obr.12785>
- Rani, D., Krishan, K., Kumar, A., & Kanchan, T. (2021). Assessment of body weight from percutaneous widths of the bones and joints-Implications in forensic and clinical examinations: Assessment of body weight from widths of the bones and joints. *Acta Biomedica Atenei Parmensis*, 92(3), e2021225. <https://doi.org/10.23750/abm.v92i3.10274>
- Raxter, M. H., Auerbach, B. M., & Ruff, C. B. (2006). Revision of the Fully technique for estimating statures. *American Journal of Physical Anthropology*, 130(3), 374–384. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20361>
- Reid, I. R. (2002). Relationships among body mass, its components, and bone mass simultaneously at BoneKEY-Osteovision (<http://www.bonekey-ibms.org>), a Web site sponsored by the International Bone and Mineral Society. *Bone*, 31(5), 547–555. [https://doi.org/10.1016/S8756-3282\(02\)00864-5](https://doi.org/10.1016/S8756-3282(02)00864-5)
- Roberts, D. F. (1953). Body weight, race and climate. *American Journal of Physical Anthropology*, 11(4), 533–558. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330110404>
- Robson, S. L., & Wood, B. (2008). Hominin life history: Reconstruction and evolution. *Journal of Anatomy*, 212(4), 394–425. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2008.00867.x>
- Rosenberg, K. R., Zúñe, L., & Ruff, C. B. (2006). Body size, body proportions, and encephalization in a Middle Pleistocene archaic human from northern China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(10), 3552–3556. <https://doi.org/10.1073/pnas.0508681103>
- Ruff, C. B. (1994). Morphological adaptation to climate in modern and fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 37(S19), 65–107. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330370605>
- Ruff, C. B. (1998). Evolution of the Hominid Hip. In E. Strasser, J. G. Fleagle, A. L. Rosenberger, & H. M. McHenry (Ed.), *Primate Locomotion* (s. 449–469). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0092-0\\_23](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0092-0_23)
- Ruff, C. B. (2000). Body mass prediction from skeletal frame size in elite athletes. *American Journal of Physical Anthropology*, 113(4), 507–517. [https://doi.org/10.1002/1096-8644\(200012\)113:4<507::AID-AJPA5>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1096-8644(200012)113:4<507::AID-AJPA5>3.0.CO;2-F)

- Ruff, C. B. (2002). Variation in Human Body Size and Shape. *Annual Review of Anthropology*, 31(1), 211–232. <https://doi.org/10.1146/annurev.anthro.31.040402.085407>
- Ruff, C. B., Burgess, M. L., Squyres, N., Junno, J.-A., & Trinkaus, E. (2018). Lower limb articular scaling and body mass estimation in Pliocene and Pleistocene hominins. *Journal of Human Evolution*, 115, 85–111. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.10.014>
- Ruff, C. B., & Hayes, W. C. (1988). Sex differences in age-related remodeling of the femur and tibia. *Journal of Orthopaedic Research*, 6(6), 886–896. <https://doi.org/10.1002/jor.1100060613>
- Ruff, C. B., Holt, B. M., Niskanen, M., Sladěk, V., Berner, M., Garofalo, E., Garvin, H. M., Hora, M., Maijanen, H., Niinimäki, S., Salo, K., Schuplerová, E., & Tompkins, D. (2012). Stature and body mass estimation from skeletal remains in the European Holocene. *American Journal of Physical Anthropology*, 148(4), 601–617. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22087>
- Ruff, C. B., Holt, B., & Trinkaus, E. (2006). Who’s afraid of the big bad Wolff?: “Wolff’s law” and bone functional adaptation. *American Journal of Physical Anthropology*, 129(4), 484–498. <https://doi.org/10.1002/ajpa.20371>
- Ruff, C. B., Niskanen, M., Junno, J.-A., & Jamison, P. (2005). Body mass prediction from stature and bi-iliac breadth in two high latitude populations, with application to earlier higher latitude humans. *Journal of Human Evolution*, 48(4), 381–392. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2004.11.009>
- Ruff, C. B., Scott, W. W., & Liu, A. Y.-C. (1991). Articular and diaphyseal remodeling of the proximal femur with changes in body mass in adults. *American Journal of Physical Anthropology*, 86(3), 397–413. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330860306>
- Ruff, C. B., Squyres, N., & Junno, J. (2020). Body mass estimation in hominins from humeral articular dimensions. *American Journal of Physical Anthropology*, 173(3), 480–499. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24090>
- Ruff, C. B., Sylvester, A. D., Rahmawati, N. T., Suriyanto, R. A., Storm, P., Aubert, M., Joannes-Boyau, R., Berghuis, H., Pop, E., Batenburg, K. J., Coban, S. B., Kostenko, A., Noerwidi, S., Renema, W., Adhityatama, S., & Joordens, J. C. (2022). Two Late Pleistocene human femora from Trinil, Indonesia: Implications for body size and behavior in Southeast Asia. *Journal of Human Evolution*, 172, 103252. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2022.103252>

- Ruff, C. B., Trinkaus, E., & Holliday, T. W. (1997). Body mass and encephalization in Pleistocene Homo. *Nature*, 387(6629), 173–176. <https://doi.org/10.1038/387173a0>
- Ruff, C. B., Wallace, I. J., Abeyta-Brown, A., Butler, M., & Busby, T. (2024). Technical note: Prediction of body mass from stature and pelvic breadth. *American Journal of Biological Anthropology*, 185(2), e25004. <https://doi.org/10.1002/ajpa.25004>
- Ruff, C. B., & Wood, B. A. (2023). The estimation and evolution of hominin body mass. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 32(4), 223–237. <https://doi.org/10.1002/evan.21988>
- Ruff, C. B., Wunderlich, R. E., Hatala, K. G., Tuttle, R. H., Hilton, C. E., D’Août, K., Webb, D. M., Hallgrímsson, B., Musiba, C., & Baksh, M. (2021). Body mass estimation from footprint size in hominins. *Journal of Human Evolution*, 156, 102997. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2021.102997>
- Sedlak, P., Pařízková, J., Samešová, D., Musálek, M., Dvořáková, H., & Novák, J. (2020). Secular Changes in Body Build and Body Composition in Czech Preschool Children in the Context of Latent Obesity. *Children*, 8(1), 18. <https://doi.org/10.3390/children8010018>
- Segal, K. R., Dunaif, A., Gutin, B., Albu, J., Nyman, A., & Pi-Sunyer, F. X. (1987). Body composition, not body weight, is related to cardiovascular disease risk factors and sex hormone levels in men. *Journal of Clinical Investigation*, 80(4), 1050–1055. <https://doi.org/10.1172/JCI113159>
- Seidell, J., & Visscher, T. (2000). Body weight and weight change and their health implications for the elderly. *European Journal of Clinical Nutrition*, 54(S3), S33–S39. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601023>
- Semanick, L. M., Beck, T. J., Cauley, J. A., Wheeler, V. W., Patrick, A. L., Bunker, C. H., & Zmuda, J. M. (2005). Association of Body Composition and Physical Activity with Proximal Femur Geometry in Middle-Aged and Elderly Afro-Caribbean Men: The Tobago Bone Health Study. *Calcified Tissue International*, 77(3), 160–166. <https://doi.org/10.1007/s00223-005-0037-4>
- Shibata, Y., Ohsawa, I., Watanabe, T., Miura, T., & Sato, Y. (2003). Effects of Physical Training on Bone Mineral Density and Bone Metabolism. *Journal of PHYSIOLOGICAL ANTHROPOLOGY and Applied Human Science*, 22(4), 203–208. <https://doi.org/10.2114/jpa.22.203>
- Schaffer, W. C. (2016). Total Body Mass Estimation from Anthropometric Measurements in Modern Young Adult U.S. Populations with Healthy Body Fat Percentages ( NHANES

- III ). *Journal of Forensic Sciences*, 61(6), 1431–1439. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13145>
- Schaffer, W. C., & Dunn, T. E. (2018). Accuracy and Reliability of Total Body Mass Estimation Techniques from Stature and Bi-iliac Breadth in Non-Hispanic U.S. Whites from the Bass Donated Skeletal Collection. *Journal of Forensic Sciences*, 63(5), 1486–1491. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13720>
- Sibly, R. M., & Brown, J. H. (2007). Effects of body size and lifestyle on evolution of mammal life histories. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(45), 17707–17712. <https://doi.org/10.1073/pnas.0707725104>
- Silva, A. M., Shen, W., Wang, Z., Aloia, J. F., Nelson, M. E., Heymsfield, S. B., Sardinha, L. B., & Heshka, S. (2004). Three-compartment model: Critical evaluation based on neutron activation analysis. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 287(5), E962–E969. <https://doi.org/10.1152/ajpendo.00104.2004>
- Siri, W. E. (1956). The Gross Composition of the Body. In *Advances in Biological and Medical Physics* (Roč. 4, s. 239–280). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-3110-5.50011-X>
- Siri, W. E. (1961). Body composition from fluid spaces and density: Analysis of methods. 1961. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 9(5), 480–491; discussion 480, 492.
- Sjøvold, T. (1990). Estimation of stature from long bones utilizing the line of organic correlation. *Human Evolution*, 5(5), 431–447. <https://doi.org/10.1007/BF02435593>
- Sládek, V., Macháček, J., Makajevová, E., Přichystalová, R., & Hora, M. (2018). Body mass estimation in skeletal samples using the hybrid approach: The effect of population-specific variations and sexual dimorphism. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 10(4), 833–847. <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0400-6>
- Squyres, N., & Ruff, C. B. (2015). Body mass estimation from knee breadth, with application to early hominins: Body Mass Estimation In Early Hominins. *American Journal of Physical Anthropology*, 158(2), 198–208. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22789>
- Steudel-Numbers, K. L. (2006). Energetics in Homo erectus and other early hominins: The consequences of increased lower-limb length. *Journal of Human Evolution*, 51(5), 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2006.05.001>
- Stloukal, M. (Ed.). (1999). *Antropologie: Příručka pro studium kostry* (1. vyd). Národní muzeum.
- St-Onge, M.-P., Wang, J., Shen, W., Wang, Z., Allison, D. B., Heshka, S., Pierson, R. N., & Heymsfield, S. B. (2004). Dual-Energy X-Ray Absorptiometry-Measured Lean Soft

- Tissue Mass: Differing Relation to Body Cell Mass Across the Adult Life Span. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 59(8), B796–B800. <https://doi.org/10.1093/gerona/59.8.B796>
- Tan, V. P., Macdonald, H. M., Kim, S., Nettlefold, L., Gabel, L., Ashe, M. C., & McKay, H. A. (2014). Influence of Physical Activity on Bone Strength in Children and Adolescents: A Systematic Review and Narrative Synthesis: INFLUENCE OF PA ON BONE STRENGTH IN CHILDREN AND ADOLESCENTS. *Journal of Bone and Mineral Research*, 29(10), 2161–2181. <https://doi.org/10.1002/jbmr.2254>
- Thomson, R., Brinkworth, G. D., Buckley, J. D., Noakes, M., & Clifton, P. M. (2007). Good agreement between bioelectrical impedance and dual-energy X-ray absorptiometry for estimating changes in body composition during weight loss in overweight young women. *Clinical Nutrition*, 26(6), 771–777. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2007.08.003>
- Thune, I., Njølstad, I., Løchen, M.-L., & Førde, O. H. (1998). Physical Activity Improves the Metabolic Risk Profiles in Men and Women: The Tromsø Study. *Archives of Internal Medicine*, 158(15), 1633. <https://doi.org/10.1001/archinte.158.15.1633>
- Trotter, M., & Gleser, G. C. (1952). Estimation of stature from long bones of American Whites and Negroes. *American Journal of Physical Anthropology*, 10(4), 463–514. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330100407>
- Trotter, M., & Gleser, G. C. (1958). A re-evaluation of estimation of stature based on measurements of stature taken during life and of long bones after death. *American Journal of Physical Anthropology*, 16(1), 79–123. <https://doi.org/10.1002/ajpa.1330160106>
- Tucker, M. A., Ord, T. J., & Rogers, T. L. (2014). Evolutionary predictors of mammalian home range size: Body mass, diet and the environment. *Global Ecology and Biogeography*, 23(10), 1105–1114. <https://doi.org/10.1111/geb.12194>
- Vercellotti, G., Agnew, A. M., Justus, H. M., & Sciulli, P. W. (2009). Stature estimation in an early medieval (XI-XII c.) Polish population: Testing the accuracy of regression equations in a bioarcheological sample. *American Journal of Physical Anthropology*, 140(1), 135–142. <https://doi.org/10.1002/ajpa.21055>
- Wagner, D. R., & Heyward, V. H. (2000). Measures of body composition in blacks and whites: A comparative review. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 71(6), 1392–1402. <https://doi.org/10.1093/ajcn/71.6.1392>
- Wahner, H. (1989). Technical aspects and clinical interpretation of bone mineral measurements. *Public Health Reports (Washington, D.C.: 1974)*, 104 Suppl(Suppl), 27–30.

- Wang, Z., Heo, M., Lee, R. C., Kotler, D. P., Withers, R. T., & Heymsfield, S. B. (2001). Muscularity in adult humans: Proportion of adipose tissue-free body mass as skeletal muscle. *American Journal of Human Biology*, 13(5), 612–619. <https://doi.org/10.1002/ajhb.1099>
- Wang, Z., Heshka, S., Pierson, R., & Heymsfield, S. (1995). Systematic organization of body-composition methodology: An overview with emphasis on component-based methods. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 61(3), 457–465. <https://doi.org/10.1093/ajcn/61.3.457>
- Wang, Z., Pierson, R., & Heymsfield, S. (1992). The five-level model: A new approach to organizing body-composition research. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 56(1), 19–28. <https://doi.org/10.1093/ajcn/56.1.19>
- Wang, Z., Pi-Sunyer, F. X., Kotler, D. P., Wielopolski, L., Withers, R. T., Pierson, R. N., & Heymsfield, S. B. (2002). Multicomponent methods: Evaluation of new and traditional soft tissue mineral models by in vivo neutron activation analysis,. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 76(5), 968–974. <https://doi.org/10.1093/ajcn/76.5.968>
- Webber, C. E. (2006). Photon absorptiometry, bone densitometry and the challenge of osteoporosis. *Physics in Medicine and Biology*, 51(13), R169–R185. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R11>
- Wheeler, P. E. (1993). The influence of stature and body form on hominid energy and water budgets; a comparison of Australopithecus and early Homo physiques. *Journal of Human Evolution*, 24(1), 13–28. <https://doi.org/10.1006/jhev.1993.1003>
- White, C. R., Alton, L. A., Bywater, C. L., Lombardi, E. J., & Marshall, D. J. (2022). Metabolic scaling is the product of life-history optimization. *Science*, 377(6608), 834–839. <https://doi.org/10.1126/science.abm7649>
- Will, M., Krapp, M., Stock, J. T., & Manica, A. (2021). Different environmental variables predict body and brain size evolution in Homo. *Nature Communications*, 12(1), 4116. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24290-7>
- Will, M., Pablos, A., & Stock, J. T. (2017). Long-term patterns of body mass and stature evolution within the hominin lineage. *Royal Society Open Science*, 4(11), 171339. <https://doi.org/10.1098/rsos.171339>
- Will, M., & Stock, J. T. (2015). Spatial and temporal variation of body size among early Homo. *Journal of Human Evolution*, 82, 15–33. <https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2015.02.009>
- Williams, J. E., Wells, J. C., Wilson, C. M., Haroun, D., Lucas, A., & Fewtrell, M. S. (2006). Evaluation of Lunar Prodigy dual-energy X-ray absorptiometry for assessing body

- composition in healthy persons and patients by comparison with the criterion 4-component model. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 83(5), 1047–1054. <https://doi.org/10.1093/ajcn/83.5.1047>
- Withers, R. T., LaForgia, J., Pillans, R. K., Shipp, N. J., Chatterton, B. E., Schultz, C. G., & Leaney, F. (1998). Comparisons of two-, three-, and four-compartment models of body composition analysis in men and women. *Journal of Applied Physiology*, 85(1), 238–245. <https://doi.org/10.1152/jappl.1998.85.1.238>
- Wolff, J. (1986). *The Law of Bone Remodelling*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-71031-5>
- Xi, B., Liang, Y., He, T., Reilly, K. H., Hu, Y., Wang, Q., Yan, Y., & Mi, J. (2012). Secular trends in the prevalence of general and abdominal obesity among Chinese adults, 1993–2009. *Obesity Reviews*, 13(3), 287–296. <https://doi.org/10.1111/j.1467-789X.2011.00944.x>
- Young, E. Y., Gebhart, J., Cooperman, D., & Ahn, N. U. (2013). Are the Left and Right Proximal Femurs Symmetric? *Clinical Orthopaedics & Related Research*, 471(5), 1593–1601. <https://doi.org/10.1007/s11999-012-2704-x>

## 7.2. Internetové zdroje

- (1) Světová zdravotnická organizace (WHO), (bez data) *Obesity*. World Health Organization. Online. Dostupné z: [https://www.who.int/health-topics/obesity#tab= tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/obesity#tab=tab_1) [citováno 18-11-2024].
- (2) MRC Epidemiology Unit, (bez data). *Multi-component models*. Measure Toolkit. Dostupné z: <https://www.measurement-toolkit.org/anthropometry/objective-methods/multi-component-models>. [citováno 4-7-2024].
- (3) Světová zdravotnická organizace (WHO), (2024, 1. března). *Obesity and overweight*. World Health Organization. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight> [citováno 4-7-2024].
- (4) Dattani, S., Rodés-Guirao, L., Ritchie, H., Ortiz-Ospina, E., & Roser, M., (2023). *Life expectancy*. Our World in Data. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/life-expectancy> [citováno 4-7-2024].
- (5) Hologic, Inc., (bez data). *Horizon DXA System: Product Brochure*. Hologic. Dostupné z: [https://www.hologic.com/sites/default/files/horizon\\_dxa\\_system\\_product\\_brochure.pdf](https://www.hologic.com/sites/default/files/horizon_dxa_system_product_brochure.pdf) [citováno 23-4-2025].