

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní obor: Biologie

Studijní program: Biologie



Anežka Volejníková

Odhad hmotnosti podle ukazatelů na kostře u nedospělých jedinců

Body mass estimation by skeletal features in juvenile individuals

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. Mgr. Vladimír Sládek, Ph.D.

Praha, 2022

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze,

.....

Podpis

Poděkování:

Tímto děkuji doc. Mgr. Vladimíru Sládkovi, Ph.D., že souhlasil s vedením mé bakalářské práce, za jeho vždy upřímné a užitečné rady a ochotu diskutovat jakýkoli problém během našich konzultací. Děkuji všem členům Laboratoře antropologie kostní tkáně za to, že se mnou vždy rádi sdíleli své vlastní zkušenosti.

Abstrakt

Tělesná hmotnost jeden ze základní charakterizujících znaků člověka, který se využívá v mnoha antropologických odvětvích a pomocí něhož lze zkoumat chování a prostředí nejen současných, ale i minulých populací. Tato práce podává stručné shrnutí metod, kterými lze hmotnost zpětně zrekonstruovat z rozměrů kostry u nedospělých jedinců. Dále shrnuje významné faktory, kterými může být rekonstrukce hmotnosti ovlivněna, protože dětská kostra je na vlivy prostředí citlivější než kostra dospělého člověka. V práci jsou popsány vlivy výživy, genetiky, fyzické aktivity a ekogeografie.

Klíčová slova: odhad hmotnosti, tělesná hmotnost, ontogeneze, růst, postkraniální skelet

Abstract

Body mass is one of the basic human characteristics used in various anthropological disciplines and can be used in behavioral and environmental studies of present and past populations. This thesis provides a brief summary of methods by which the body mass can be retrospectively reconstructed from skeletal dimensions in juvenile individuals. It also summarizes the important factors which may affect the weight reconstruction, as the child skeleton is more sensitive to environmental influences than the adult skeleton. The effects of nutrition, genetics, physical activity and ecogeography are discussed.

Key words: body mass estimation, body mass, ontogeny, growth, postcranial skeleton

Seznam zkratek

- BMI *body mass index*; tělesný index hmotnosti (kg/m^2)
- BMD *bone mineral density*; hustota minerálů v kostní tkáni (g/cm^2)
- BMC *bone mineral content*; obsah minerálů v kostní tkáni (g)
- LS *least squares*
- RMA *reduced major axis*
- MA *major axis*
- FDB *femoral diaphyseal breadth*; šířka diafýzy kosti stehenní
- FHD *femoral head diameter*; průměr hlavice kosti stehenní
- A-P antero-posteriorní
- I *second moment of area*; kvadratický moment průřezu (mm^4)
- J *polar second moment of area*; polární moment průřezu (mm^4)

Obsah

1. Úvod.....	1
1.1 Cíl práce.....	2
2. Ontogeneze růstu výšky a hmotnosti	3
2.1 Faktory ovlivňující růst hmotnosti	7
2.1.1 Klima a zeměpisná šířka	8
2.1.2 Fyzická aktivita	8
2.1.3 Genetický vliv	10
2.1.4 Výživa	10
3. Metody odhadu hmotnosti	12
3.1 Mechanické metody.....	12
3.2 Morfometrické metody	14
3.3 Metody odhadu hmotnosti nedospělých jedinců	15
4. Závěr	19
5. Literatura.....	20

1. Úvod

Kosterní odhad tělesné hmotnosti hraje v biologické antropologii důležitou roli. Je klíčovým pro pochopení evoluční historie člověka a jiných homininů (McHenry, 1992; Grabowski et al., 2015). Je důležitý pro porozumění adaptivním strategiím homininů a pro přesné porovnání jejich charakteristik napříč fosilními skupinami (Wood & Collard, 1999; DeSilva, 2011). Odhady tělesné hmotnosti jsou rovněž nezbytné pro interpretaci charakteristik jedinců z recentních období, zejména z hlediska růstu, vývoje, a zdraví (Steckel et al., 2002). Tělesná hmotnost je nápadným individualizujícím rysem a má potenciální vliv na tafonomické procesy. Proto je odhad tělesné hmotnosti stále více využíván ve forenzním výzkumu (Agostini & Ross, 2011; Byard, 2012).

Hmotnost a výška postavy společně určují velikost a tvar těla (Ruff, 1994). Oba tyto tělesné parametry spolu úzce souvisí a nejpřesněji se odhadují pomocí rozměrů dlouhých kostí (Trotter & Gleser, 1952; Auerbach & Ruff, 2004, 2010). Odhadovat hmotnost a velikost těla z dlouhých kostí u nedospělých jedinců je však komplikované vzhledem k alometricky měnícímu se vztahu délky těla a hmotnosti během růstu člověka (Cowgill, 2018; Walker et al., 2018). Dětská kostra se v průběhu času vlivem růstu dynamicky proměňuje ve svých proporcích a je též mnohem více citlivá na změny vnějšího prostředí než kostra dospělého člověka (Pearson & Lieberman, 2004). Variabilitu růstu ovlivňují také další faktory, mezi které patří výživa, genetické predispozice, pohlaví, fyzická zátěž, etnická příslušnost, nadmořská výška, sekulární trendy, socio-ekonomický status aj. Nakonec je nutné zmínit, že během každého věkového období se proměňují nejen proporce kostry, ale také celkový poměr svaloviny a tělesného tuku. Právě proto alespoň část těchto faktorů by měla být při výběru metody pro odhad hmotnosti nedospělého jedince zvažena.

1.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce je shrnout dosavadní poznatky týkající se kosterního odhadu hmotnosti zaměřující se na nedospělé jedince. Práce se zaměřuje na odhad hmotnosti pomocí postkraniálního skeletu člověka. Úkolem první části je představit část základních faktorů, které významným způsobem ovlivňují růst kostry během ontogeneze. Druhá část má za úkol shrnout informace o základních typech metod pro odhad hmotnosti. Výsledným účelem práce je pak propojení obou jejích částí – tj. objasnit na základě kterých metod lze hmotnost odhadovat a jakými faktory může být definovaný vztah mezi kosterními parametry a hmotností ovlivněn z hlediska růstu skeletu.

2. Ontogeneze růstu výšky a hmotnosti

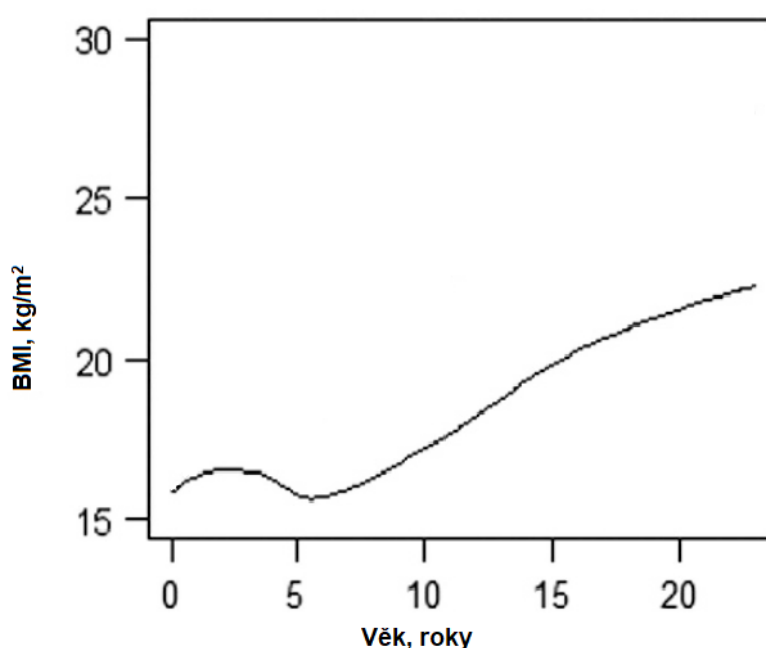
Období po narození do 3. let dítěte je charakteristické nejvyšší rychlostí růstu ze všech postnatálních období. Zároveň (viz Obrázek 3) je to také období charakteristické nejvyšší mírou zpomalení růstu (Tanner, 1990). Index tělesné hmotnosti (BMI) roste a dosahuje své maximální hodnoty přibližně ve věku 9. měsíců a poté postupně klesá (Johnson et al., 2013).

Mezi 3. až 6. rokem se zpomalení růstu se ustálí na hodnotě přírůstku 5–6 cm za rok. Mezi 6. až 8. rokem se objevuje první krátký interval zrychlení růstu, který se nazývá *mid-growth spurt* (Bogin, 2012).

Podle Rolland-Cachera et al. (2006) se zhruba mezi 5. a 7. rokem, kdy BMI postupným klesáním dosáhne nejnižší hodnoty (viz Obrázek 1), objevuje jev opětovného nárůstu tělesného tuku, který se nazývá *adiposity rebound*. Obvykle se měří právě pomocí indexu tělesné hmotnosti (BMI), který se vypočítá jako:

$$\text{BMI} = \text{hmotnost v kilogramech} / \text{výška v metrech}^2$$

Existují určité poznatky o tom, že pokud toto zvýšení tělesné adipozity nastane dříve, jedinec se potýká s vyšším rizikem nadváhy a obezity v pozdějším věku, či jinými zdravotními riziky (Rolland-Cachera et al., 2006).

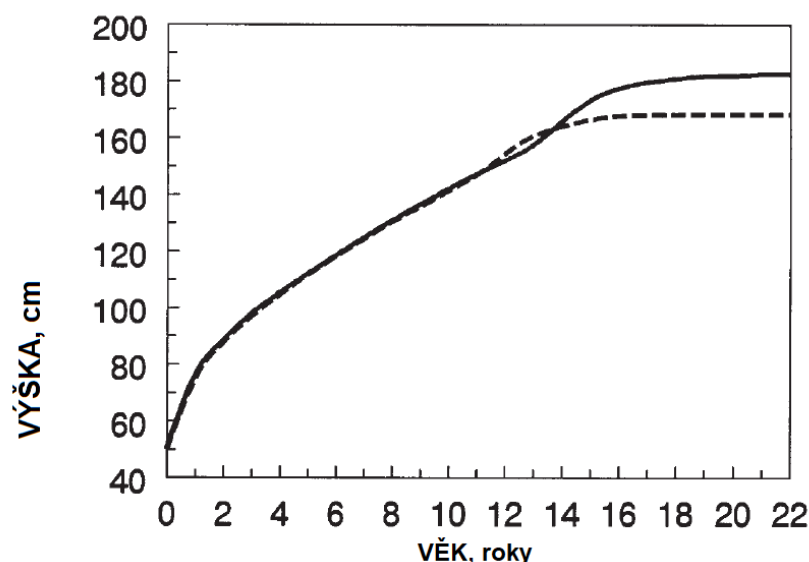


Obrázek 1. Graf průměrného růstu BMI v čase. Upraveno podle (Araújo et al., 2015).

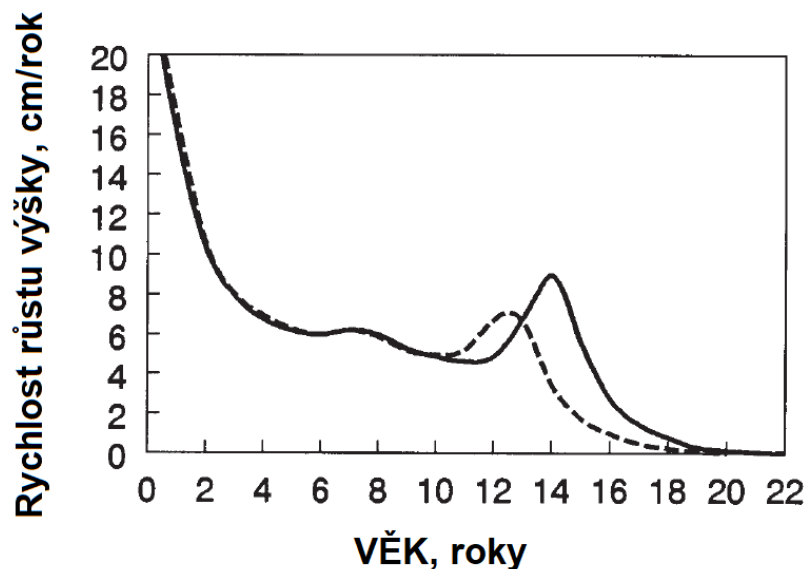
Další období charakteristické snížením rychlosti růstu začíná přibližně ve věku 7 let a je to také období s nejnižším růstovým přírůstkem od narození dítěte. U dívek toto období končí průměrně ve věku 10 let, což je o 2 roky dříve než u chlapců. Tento rozdíl odráží časnější počátek dospívání u dívek (Bogin, 2012).

Během dospívání se u chlapců i dívek objeví prudké zrychlení růstu týkající se téměř všech kosterních tkání, které se nazývá růstový spurt. Podobné průměrné hodnoty růstu se vyskytují v tomto období ve všech lidských populacích (Bogin, 2012). Průměrný výškový rozdíl mezi muži a ženami v dospělosti je 13 cm a je způsoben pozdějším nástupem růstového spurtu u chlapců společně s větší maximální rychlostí růstu do výšky (viz Obrázek 3.). Dospívání je také obdobím výrazného nárůstu tělesné hmotnosti, kdy 50 % tělesné hmotnosti dospělého člověka přibývá právě během tohoto období. U chlapců dochází k maximálnímu váhovému přírůstku přibližně ve stejnou dobu jako k maximálnímu výškovému přírůstku a v průměru dosahuje 9 kg/rok. U dívek se maximální přírůstek hmotnosti opoždí za maximální rychlostí růstu o 6 měsíců a dosahuje 8,3 kg/rok zhruba ve věku 12,5 roku (Tanner 1990).

Poté dochází ke zpomalování rychlosti růstu a zhruba ve věku 15 let u dívek a 17 let u chlapců se růst zastaví v důsledku epifyzární fúze (Tanner, 1990). Raná dospělost začíná s dokončením růstového spurtu. Růst do výšky se zastaví, když dlouhé kosti a obratle páteře ztratí schopnost růst do délky (Bogin, 2012).

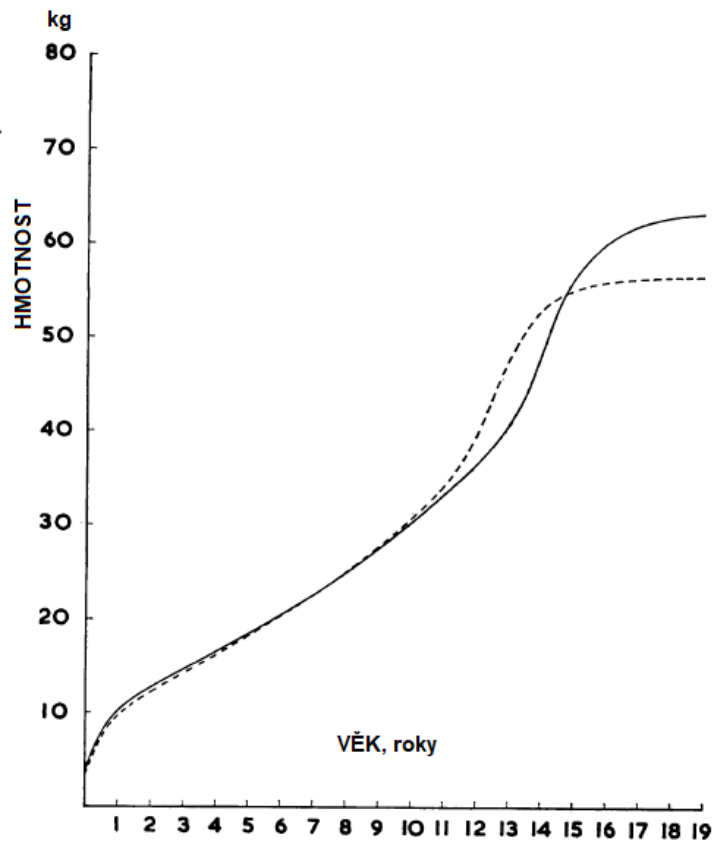


Obrázek 2. Graf průměrného růstu do výšky v čase pro zdravé dívky (přerušované křivky) a chlapce (plné křivky) v post-natálním období. Upraveno podle (Bogin, 1999). Údaje použité k sestavení křivek pocházejí od (Prader, 1984) a (Bock & Thissen, 1980).

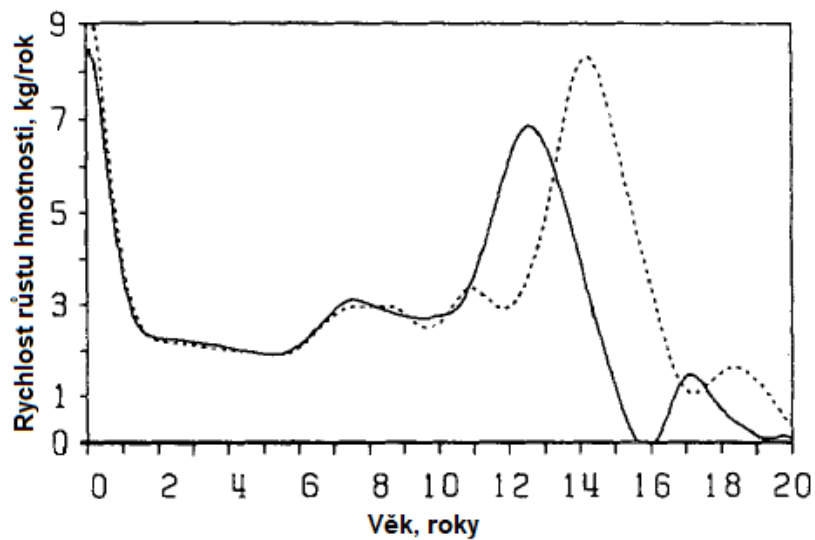


Obrázek 3. Graf průměrné rychlosti růstu v čase pro zdravé dívky (přerušované křivky) a chlapce (plné křivky) v post-natálním období. Upraveno podle (Bogin, 1999). Údaje použité k sestavení křivek pocházejí od (Prader, 1984) a (Bock & Thissen, 1980).

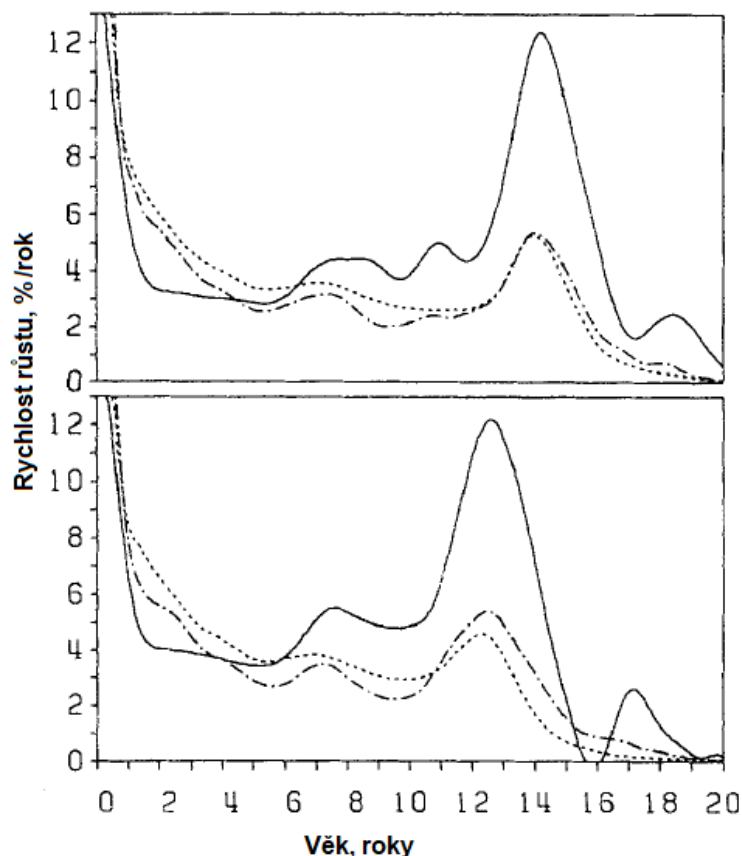
Jako průměrná hmotnost novorozenců se v našich zemích uvádí u chlapců 3,6 kg, u dívek 3,3 kg. Porodní hmotnost poklesne v prvních dnech života asi o 5–10 % a je znovu získána do 10. dne života. Dítě zdvojnásobí porodní hmotnost ve 4 měsících, ztrojnásobí s dokončením 1. roku věku, kdy hmotnost činí asi 10 kg. Průměrný přírůstek hmotnosti činí v prvním půlroce života 150–300 g týdně, ve druhém půlroce asi polovinu předchozích přírůstků. Po 1. roce dítě ročně přibývá o 2–3 kg, až do období pubertálního zrychlení, kdy roční přírůstky stoupají na 6–10 kg. Toto zrychlení po pubertě opět poklesá (Čihák, 2001).



Obrázek 4. Křivky růstu hmotnosti u chlapců a dívek. Křivky znázorňují růst hmotnosti v kilogramech pro chlapce (plná křivka) a dívky (přerušovaná křivka) pro daný věk. Upraveno podle (Tanner et al., 1966).



Obrázek 5. Křivky rychlosti růstu hmotnosti u chlapců a dívek. Křivky znázorňují změny rychlosti růstu hmotnosti pro chlapce (přerušovaná křivka) a dívky (plná křivka) pro daný věk. Upraveno podle (Gasser et al., 1993).



Obrázek 6. Křivky procentuální rychlosti růstu hmotnosti (plná křivka), výšky (tečkovaná křivka), biliakální šířky (čerchovaná křivka) u chlapců (graf nahoře) a dívek (graf dole) pro daný věk. Rychlost růstu udává přírůstek procentuálního podílu dané velikosti dospělého jedince za rok. Upraveno podle (Gasser et al., 1993).

2.1 Faktory ovlivňující růst hmotnosti

Výška postavy i tělesná hmotnost jsou ovlivněny významně nejen geneticky, ale také prostředím (Preece, 1996; Arden & Spector, 1997). Výška postavy se proměňuje během růstu a vývoje a tělesná hmotnost v průběhu celého života. Vzhledem ke své citlivosti vůči interakcím s prostředím se výška postavy používá jako ukazatel celkového zdravotního stavu u populací minulých i u populací žijících (Cairney & Wade, 1998; Steckel et al., 2002). Změny výšky a tělesné hmotnosti v populaci v průběhu času odrážejí změny na kostře, které lze interpretovat jako reakce na stresory prostředí (např. dostupnost zdrojů potravy, hustota obyvatelstva, onemocnění atd.) (Zakrzewski, 2003; Pfeiffer & Sealy, 2006).

Interpretace studií zkoumajících vliv raného období života na pozdější růst kostí je komplikovaná. Je obtížné odlišit vlivy prenatální a postnatální od vlivů současných na tělesnou hmotnost a velikost těla, jelikož antropometrická měření se zaznamenávají v průběhu celého

dětství a skeletální a tělesná velikost jsou důležitými faktory určujícími minerální hmotnost kostí v každém věkovém období (Cole, 2004).

2.1.1 Klima a zeměpisná šířka

V šedesátých letech 20. století byla provedena longitudinální studie amerických dětí v Brazílii, která zjišťovala vliv tamějšího horkého klimatu na růst (Eveleth, 1966). Pozorovala, že dobře vyživované americké děti vyrůstající v Brazílii vážily méně než dobře vyživované americké děti ze střední socioekonomické třídy z Iowy v USA. Děti, které vyrůstaly v Brazílii měly nižší poměr hmotnosti vůči výšce, což svědčí o lineárnějším tvaru těla v Brazílii. Také růst končetin byl lineárnější a méně robustní s větším poměrem plochy vůči objemu (Eveleth, 1966).

Roberts zkoumal údaje o tělesných rozměrech vzorků 116 mužů a 33 žen z celého světa a koreloval průměrné hodnoty vzorků s hodnotami místní teploty. Mezi tělesnou hmotností a průměrnou roční teplotou existuje významná negativní korelace (Roberts, 1953). O několik let později také demonstroval negativní vztah mezi výškou vsedě a teplotou (Roberts, 1973). Existuje tvrzení, že síla vztahu mezi hmotností a teplotou od 50. let poklesla. Slabší korelace a mírnější sklon regresní křivky jsou důsledkem sekulárních trendů hmotnosti zejména u tropických populací. Tento trend pravděpodobně reflektuje vliv změn životního stylu, který je spojen s lepší výživou a zdravotní péčí (Katzmarzyk & Leonard, 1998).

Populace, které žijí v chladném prostředí mají obvykle menší povrch těla vůči tělesné hmotnosti, relativně kratší končetiny a větší poměr velikosti hlavice femuru vůči délce kosti. Toto je zároveň konzistentní se zjištěním, že existuje signifikantní pozitivní vztah mezi hmotností a absolutními hodnotami zeměpisné šířky (Ruff, 1994). Dále Ruff (1994) uvádí negativní korelaci mezi teplotou bi-ilakální šířkou, která je zároveň parametrem pro odhad hmotnosti.

Je zřejmé, že u člověka existuje obecný vztah mezi klimatem a tělesnou velikostí, ale jak se tento vztah vyvíjí během růstu, nebylo však dosud intenzivně studováno (Schell et al., 2012).

2.1.2 Fyzická aktivita

Podle některých studií pravidelná fyzická aktivita zvyšuje nárůst kostního minerálu, ale neovlivňuje skeletální maturaci. Aktivní a neaktivní chlapci sledovaní longitudinálně od 13 do

18 let se nelišili ve kosterním věku. Maximální rychlost růstu výšky postavy a hmotnosti se během růstového spurtu mezi jednotlivými skupinami s rozdílnou aktivitou také nelišily. Stejně tak rozdíly v tělesné hmotnosti aktivních a méně aktivních chlapců a dívek byly obecně nepříliš významné (Beunen et al., 1992). Stejně tvrzení podává také jiná studie podle níž, běžná fyzická aktivita ani sportovní aktivita nemají vliv na dosaženou výšku, načasování maximální růstové rychlosti do výšky, ani na celkovou rychlost růstu výšky (Malina, 1994).

Zpoždění růstu a pohlavního dospívání je však dobře zdokumentováno u některých skupin elitních atletek, konkrétně gymnastek (Claessens et al., 1992; Baxter-Jones et al., 1994). Růst a načasování menarché řídí složitá interakce mnoha faktorů, včetně fyzických a metabolických nároků intenzivního sportovního tréninku (Rogol et al., 2000). Theintz et al. (1993) sledovali skupinu dospívajících gymnastek a plavkyň. Rychlost růstu gymnastek se výrazně lišila od kosterního věku 11–13 let. Vykazovaly maximální rychlost růstu pouze 5,48 cm/rok v porovnání s 8,0 cm/rok u plavkyň. Předpokládaná výška gymnastek s časem snižovala, ale u plavkyň se nezměnila. U gymnastek od 12 let věku kostí bylo pozorováno výrazné zpomalení růstu délky dolních končetin, což vedlo k výraznému rozdílu v celkovém poměru výšky vsedě a délky dolních končetin. Při zkoumání růstových parametrů u dospívajících gymnastek se ukázalo, že tyto dívky jsou nižší a lehčí a mají výrazně nižší procento tělesného tuku než plavkyně. Plavkyně byly obecně vyšší a dříve dospívali (Theintz et al., 1993).

Tělesné složení může být potenciálně ovlivněno pravidelnou aktivitou (Lazaar et al., 2007). Vyšší příznivý vliv fyzické aktivity na obezitu byl zjištěn ve studiích, které použili přesnější odhady tělesného složení – konkrétně odhady v procentech tuku pomocí DXA skenovací technologie na rozdíl od BMI, tloušťky kožních řas nebo procent tuku předpovídaného z tloušťky kožních řas (Strong et al., 2005; Malina, 2006)

V longitudinální studii Saskatchewan Pediatric Bone Mineral Accrual Study, která byla sledována v průběhu růstového spurtu adolescentů, došlo k maximální rychlosti růstu kostního minerálu v průměru po více než 6 měsících po dosažení maximální rychlosti růstu výšky (Baxter-Jones et al., 2008).

Fyzická aktivita vykazuje pozitivní roli při posílení pevnosti kostí nedospělých. Změny geometrie kostí naznačují podstatné zvýšení pevnosti kostí. Pevnost kostí měla souvislost s běžnou fyzickou aktivitou, ale krátké nárazy aktivity mohly být u nedospělých stejně účinné jako aktivita pravidelná (Bailey et al., 1999).

Příznivý vliv pravidelné fyzické aktivity na obsah minerálů v kostech má vliv na dlouhodobé zdraví kostry. Kostní minerály vytvořené v dětství a dospívání jsou určující pro stav kostních minerálů v dospělosti (Bailey et al., 1999).

2.1.3 Genetický vliv

Ačkoli faktory prostředí hrají významnou roli, je zřejmé, že regulace tělesné hmotnosti má velký genetický základ, který zahrnuje jemný vliv mnoha genů (Comuzzie & Allison, 1998). Předpokládá se, že znaky měkkých tkání se snáze mění vlivem měnící se výživy než znaky na kostře, které reagují na změny výživového stavu méně rychle. Proto větší část variability měkkých tkání lze vysvětlit spíše prostředím než genetickými faktory (Towne et al., 2012). Dědivost délky femuru (73 %) a tibie (65 %) se zdá být vysoká (Chinappen-Horsley et al., 2008). Dědivost bi-iliakální šířky se zdá být o trochu nižší a byla odhadnuta na hodnotu 55 % (Ikoma et al., 1988).

Dědivost BMI neoddeluje dědičnost tuku a beztukové hmoty a vzhledem k rozdílům ve složení těla mezi pohlavími je pravděpodobné, že genetický vliv na variabilitu BMI může působit odlišně u mužů a žen (Elks et al., 2012). Výška, hmotnost a BMI jsou více variabilní u bělošských než u východoasijských adolescentů. Genetická variabilita těchto tří tělesných parametrů je rovněž větší u bělochů než u východoasijských jedinců (Hur et al., 2008).

Ve studiích dvojčat s longitudinálními daty bylo prokázáno, že dědivost BMI se v dětství zvyšuje (Haworth et al., 2008) a s věkem u dospělých klesá (Korkeila et al., 1991). Studie kontrolované nadměrné výživy u jednovaječných dvojčat ukázala, že tendence k přibývání na váze je u každého páru dvojčat srovnatelná, což potvrzuje významnou roli genetických faktorů pro regulaci tělesné hmotnosti, která je zřejmá zejména při kontrole příjmu potravy a pohybu za účelem snížení variability prostředí (Bouchard et al., 1990).

Jiným modelem ke studii dvojčat je studie adopce. Adoptované děti sdílejí prostředí se svými adoptivními rodiči, zatímco genetickou výbavu sdílejí pouze se svými biologickými rodiči. Výsledky adopčních studií shodně ukázaly, že u adoptovaných dětí se projevuje vysoce statisticky významná souvislost jejich BMI s BMI jejich biologických rodičů, nikoli však s BMI jejich adoptivních rodičů (Stunkard et al., 1986; Sørensen et al., 1989)

Studie ukazují, že 60–70 % variability hustoty kostního minerálu (BMD) lze vysvětlit genetickou variabilitou. Analýzy naznačují, že část této variability odráží genetický vliv na velikost kostí, výšku a tělesnou hmotnost (Prentice, 2001).

2.1.4 Výživa

Tvorba kostí je proces vyžadující dostatečný přísun energie, aminokyselin, minerálů (např. vápník, fosfor, hořčík, zinek), iontů (např. měď, mangan, uhličitany, citráty) a vitamínů (např. vitaminy C, D, K), které se podílejí na tvorbě krystalů a kolagenu, metabolismu chrupavky a kostí a homeostáze vápníku a fosfátů (Prentice et al., 2006).

Nedostatečný příjem potravy má negativní vliv na růst a vývoj, což může vést k zpomalení růstu (de Onis & Blössner, 2003). Stejně tak nedostatečný příjem nebo špatné vstřebávání minerálních látek jako je vápník a zinek může způsobovat lineární růstovou retardaci (Prentice & Bates, 1994).

Bylo zjištěno, že příjem živin matky během těhotenství ovlivňuje hustotu a obsah kostního minerálu dítěte (Jones et al., 2000; Ganpule et al., 2006; Javaid et al., 2006). Javaid et al. (2006) uvedl, že nedostatečný příjem vitamínu D během těhotenství má vliv na nižší obsah kostního minerálu (BMC; *bone mineral content*) a tělesnou velikost dítěte v 9 letech, což může následně zvyšovat riziko zlomenin. Jones et al. (2000) asocioval sníženou hustotu kostního minerálu (BMD; *bone mineral density*) krčku kosti stehenní se sníženým příjmem P, Mg, K, a tuků. Ganpule et al. (2006) ve své studii indických dětí našel pozitivní souvislost BMC a BMD s výškou a váhou.

Vliv výživy na dětskou kostru také závisí na stupni jejího vývoje. Zdá se že kostra je citlivější na Ca, bílkoviny nebo fyzickou aktivitu před nástupem puberty (Davies et al., 2005). U dětí tělesná hmotnost více koreluje s velikostí kostí než s obsahem kostního minerálu (Seeman et al., 2000). V důsledku toho změny v pevnosti kostry nemusí odpovídat nárůstu hmotnosti a tělesného tuku, zejména při rychlém růstu v rané pubertě. Taková disproporce může také vést k dočasné křehkosti kostí (Skaggs et al., 2001).

Ve studii Cambridge bone study byla strava dospívajících dívek a chlapců ve věku 16–18 let suplementována 1000 mg vápníku ve formě $\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$ a placebem po dobu 13 a 15,5 měsíců (Stear et al., 2003; Prentice et al., 2005). U dívek bylo zjištěno, že doplňování vápníku vedlo ke zvýšení BMC a BMD na několika místech skeletu s téměř žádným vlivem na celkovou velikost skeletu (Stear et al., 2003). U chlapců však bylo zjištěno, že doplňování vápníku bylo spojeno nejen s vyšším BMC, ale také se změnou velikosti skeletu včetně výšky postavy (Prentice et al., 2005). Stear et al. (2003) upozorňuje, že je dále třeba zjistit, zda účinky suplementace vápníkem přetrvávají, nebo zda představují dočasný efekt remodelace kostí.

3. Metody odhadu hmotnosti

Odhad tělesné hmotnosti není tak přesný jako odhad výšky postavy (Sládek et al., 2018). Existuje více „rozměrů“ a mnohem více variací ve vztahu mezi hmotností měkkých tkání a velikostí skeletu mezi jedinci i populacemi (Niskanen et al., 2018). Hmotnost není jen jednoduchou funkcí výšky a je nutné zohlednit celkovou robusticitu skeletu. Robusticita epifýz a diafýz z části koreluje se svalovou hmotou (Ruff et al., 1991). Koncem 80. let se objevily studie odhadu hmotnosti provedené na fosilních hominidech (Conroy, 1987) a v průběhu 90. let byly dále rozpracovány na kostře moderního člověka (Ruff et al., 1989; McHenry, 1991, 1992; Hartwig - Scherer & Martin, 1992; Hartwig - Scherer, 1993).

Pro odhad hmotnosti se nejčastěji užívá postkraniálních elementů kostry. Panuje všeobecná shoda, že mají k hmotnosti a celkové velikosti těla přímý vztah, tudíž podávají přesnější odhad, než rozměry kraniální (Ruff et al., 1989; Aiello & Wood, 1994; Porter, 2002). Existují i další, méně populární metody, založené například na rozměrech pažní kosti (Ruff et al., 2020), obratlů (Korpinen et al., 2019) nebo kranio-dentálních rozměrů (Steudel, 1980; Aiello & Wood, 1994).

Odhad z postkraniálního skeletu se rozděluje do dvou základních kategorií metod - tzv. metody mechanické a metody morfometrické (Auerbach & Ruff, 2004). Mechanické metody vycházejí z funkčního vztahu mezi tělesnou hmotností a prvkem odrážejícím mechanické zatížení které na kostru, působí. Morfometrické metody rekonstruují hmotnost přímo z kosterních rozměrů odrážejících velikost těla (Ruff, 2002).

Nejčastěji využívá standardní regresní metody, jako jsou LS, RMA, a MA regrese, které jsou založeny na principu, kdy změna hodnoty nezávislé proměnné bude mít za následek odpovídající, měřitelnou změnu hodnoty závislé proměnné. Vycházejí tak z předpokladu, že vlastnosti, které nejlépe odrážejí funkční vztah mezi oběma proměnnými, mohou být nejspolehlivějšími prediktory hmotnosti (Aiello, 1992; Aiello & Wood, 1994).

3.1 Mechanické metody

Mechanické metody se zaměřují na vztah mezi hmotností a částmi kostry, které jsou hmotností těla přímo zatíženy (např. kloubní povrchy). Zatížení působící na člověka ovlivňuje dolní končetiny více než horní. Proto se většina výzkumu v oblasti odhadu hmotnosti zaměřuje na dolní končetinu. Dále lze rozdělit mechanické metody na ty, které používají rozměry

kloubního povrchu a metody, které používají šířky diafýz či průřezy dlouhých kostí (Auerbach & Ruff, 2004).

Výhoda rozměrů kloubních povrchů oproti průřezům diafýz spočívá v tom, že jsou méně ovlivněny rozdíly ve fyzické aktivitě a svalové zátěži v průběhu života (Lieberman et al., 2001). Často se používá šířka hlavice stehenní kosti, protože bývá dobře zachovalá a prokazatelně pozitivně koreluje s tělesnou hmotností (Ruff et al., 2012). Doposud tři různé studie poskytly regresní rovnice pro odhad tělesné hmotnosti recentních vzorků na základě šířky hlavice stehenní kosti (Ruff et al., 1991; McHenry, 1992; Grine et al., 1995).

Ruff et al. (2012) vytvořil hybridní přístup, ve kterém morfometrický odhad získaný pomocí výšky/bi-iliakální šířky pánve je metodou lineární regrese vztažen k šířce hlavice kosti stehenní. Výsledky Sládek et al. (2018) ukázaly, že hybridní přístup může zlepšit shodu v odhadech tělesné hmotnosti, pokud jsou hodnoceny výsledky podle pohlaví.

Auerbach a Ruff (2004) uvedli, že pro vzorek populace obsahující jedince s extrémně velkými či malými tělesnými rozměry je nejlepší použít buď rovnice od Ruff et al. (1991) nebo zprůměrovat hodnoty odhadu všech tří metod vytvořených na základě šířky hlavice stehenní kosti. Pokud se vzorek nachází v rozmezí velmi malých tělesných velikostí, lze místo toho použít rovnici McHenryho (1992). Pro vzorek nacházející se v širokém rozpětí tělesných velikostí lze použít rovnici od Grine et al. (1995).

Velikost hlavice femuru je v podstatě neměnná při dosažení dospělosti a nereaguje na následné změny mechanické zátěže. Více tedy koreluje s hmotností jedince ve věku 18 let než s jeho pozdější aktuální hmotností. Naopak diafýzární průřez u dospělého jedince více koreluje s jeho aktuální tělesnou hmotností. Stejně tak průměr krčku kosti stehenní ukázal mírně vyšší korelaci se aktuální tělesnou hmotností než s tělesnou hmotností jedince v 18 letech. Diafýzy totiž reagují na změny mechanické zátěže především změnami kortikální geometrie, zatímco kloubní hlavice reagují primárně změnami v subchondrální trabekulární architektuře, ale nikoli ve vnější velikosti kloubu (Ruff et al., 1991).

V situacích, kdy je potřebné znát tělesnou hmotnost v době smrti (např. ve forenzní antropologii), je vhodnější použít průřezové vlastnosti diafýz, které jsou plastičtější a dobře reagují na změny tělesné hmotnosti, čehož lze využít za předpokladu, že použijeme referenční vzorek se stejnou či podobnou úrovní aktivity. Pro zkoumání trendů ve velikosti těla, zdraví a růstu u minulých populací, je důležitá tělesná hmotnost v rané dospělosti před pozdější akumulací tělesného tuku v důsledku stárnutí, životního stylu a zdravotních faktorů. V těchto případech je vhodné využít toho, že změny tělesné hmotnosti dospělých se neprojevují změnou velikosti kloubních ploch (Pomeroy et al., 2018). Podle výsledků Pomeroy et al. (2018) lze

spolehlivě odhadovat pouze hmotnost tkáně neobsahující tuk. Odhad podílu složky tuku tělesné hmotnosti se zde ukázal jako výrazně nespolehlivý.

3.2 Morfometrické metody

Morfometrické metody používají k rekonstrukci hmotnosti jedince rozměry udávající velikost těla (Ruff, 2000a). Ruff (1994) ve své studii namodeloval lidské tělo do podoby válce. Výška a šířka takového válce pak odpovídá výšce a šířce postavy. Šířka jedince se vyjadřuje pomocí bi-iliakální šířky pánve (Ruff et al., 1991; Ruff, 1994, 2000a).

Hmotnost je pak odvozena jako kombinovaná funkce výšky postavy a bi-iliakální šířky. Má řadu výhod oproti jiným potenciálním rozměrům šířky těla (Ruff et al., 1991). Nejvýznamnější výhodou je, že je úzce srovnatelná mezi živými jedinci a kosterními pozůstatky pomocí drobných korekcí měkké tkáně (Ruff et al., 1997).

Tato metoda je ovlivněna značnými rozdíly v relativní šířce těla mezi žijícími a minulými populacemi, které významně přispívají k rozdílům v tělesné hmotnosti (Ruff, 1994, 2002). Vzhledem k rozdílům v proporcích šířky ramen a boků mužů a žen, je třeba použít rozdílné rovnice dle pohlaví. Nebo v případě, že pohlaví neznáme, zprůměrovat hodnoty mužského a ženského odhadu (Ruff, 2000a). Na tento problém upozornil také Sládek et al. (2018). Tělesná hmotnost je citlivější na rozdíly mezi pohlavími, a proto doporučují, aby se tělesná hmotnost odhadovala pomocí rovnic pro odhad tělesné hmotnosti podle pohlaví (Sládek et al., 2018).

Ruff (2000a) uvedl, že tuto metodu zohledňující výšku i šířku postavy lze aplikovat u běžných sedentárních ale i vysoce aktivních jedinců moderního člověka a byla také použita k odhadu tělesné hmotnosti u řady archeologických a paleontologických nálezů (Arsuaga et al., 1999; Trinkaus & Ruff, 1999). Avšak existují některé přístupy, kdy je tělesná hmotnost počítána pouze z předpokládaného vztahu mezi výškou postavy a tělesnou hmotností (Mathers & Henneberg, 1995; Porter, 1995).

Morfometrický přístup může mít oproti těm mechanickým určité výhody. Hlavní výhodou spočívá v tom, že nespolehá na předpoklad konstantního vztahu mezi tělesnou hmotností a velikostí kloubních ploch. V tomto vztahu totiž existuje alometrický efekt, což vedlo k doporučení používat odlišné vzorce odhadu v různých rozmezech tělesných velikostí (Auerbach & Ruff, 2004; Kurki et al., 2010). Dále také zatímco metoda založená na vztahu výšky a šířky těla byla vyzkoušena na širokém počtu populací zahrnujících velikost a tvar těla recentních populací, současné regresní rovnice odhadu z hlavice femuru byly odvozeny pouze z omezeného počtu vzorků populací moderního člověka (Ruff, 1994, 2000a; Ruff et al., 2005).

Naopak nevýhoda morfometrické metody spočívá v tom, že vyžaduje větší množství kosterních prvků a jejich dobrou zachovalost – tj. kompletní či rekonstruovatelnou pánev (Ruff et al., 2012).

3.3 Metody odhadu hmotnosti nedospělých jedinců

Existují dvě hlavní studie, které jako první vytvořily mechanické rovnice pro odhad hmotnosti specificky u nedospělých jedinců (Ruff, 2007; Robbins Schug et al., 2010). Ruff (2007) ve svých rovnicích vychází z velikosti hlavice stehenní kosti a rozměrů šířky distální metafýzy stehenní kosti. Robbins et al. (2010) použili měření odvozená z průřezové geometrie kosti. Obě rovnice byly vytvořeny s využitím longitudinální studie Denver Growth Study, která sledovala růst dětí v Denveru v polovině 20. století prostřednictvím shromážděných rentgenových snímků a osobních zdravotních informací (Maresh & Beal, 1970). Největším omezením této longitudinální studie však je, že její výsledky jsou založeny pouze na malém vzorku 20 jedinců (Ruff, 2007).

Bylo zjištěno, že existuje silný vztah mezi tělesnou hmotností a průřezovými parametry kostí (Ruff, 2000b). Tělesná hmotnost koreluje s velikostí průřezu kosti během růstu (Moro et al., 1996) a také s hustotou kostní hmoty (Miyabara et al., 2007). Vyšší tělesný index hmotnosti (BMI) je spojen s vyšší hustotou kostního minerálu (BMD) (Gibson et al., 2004; Miyabara et al., 2007). Kostí se během vývoje a růstu díky svým pružnějším vlastnostem chovají vůči silám působících při zatížení mnohem více plasticky (Cowgill, 2010). Tyto síly mění konečný tvar diafýzy a kloubních spojení. Zvětšení plochy kloubu a plochy průřezu kosti poskytuje větší odolnost vůči tomuto tlaku (Eckstein et al., 2002).

Průřezová geometrická analýza diafýz dlouhých kostí je založena na modelování kosti jako konstrukčního nosníku (Nordin & Frankel, 2001). V takové analýze jsou důležité dva typy parametrů: kvadratický moment průřezu (I ; *second moment of area*) představuje odhad ohybové tuhosti kolem dané roviny. Běžně se počítají jako maxima (I_{max}) a minima (I_{min}) v antero-posteriorní (I_x) a mediolaterální (I_y) rovině. Polární kvadratický moment (J ; *polar second moment of area*) představuje odhad torzní tuhosti diafýzy, který se vypočítá jako součet libovolných dvou na sebe kolmých druhých momentů plochy (I_{max} a I_{min} ; I_x a I_y). Poměry těchto ohybových tuhostí (I_{max}/I_{min} ; I_x/I_y) lze použít jako ukazatel tvaru průřezu diafýzy, který se odráží v rozložení kortikální kosti kolem jejího středu (Stock & Macintosh, 2016).

Průřez kosti může odrážet specifickou aktivitu (Ruff et al., 1984). Hmotnost i aktivita ovlivňují tvar průřezu kosti a rychlost tvorby kostní hmoty femuru už od raného dětství (van

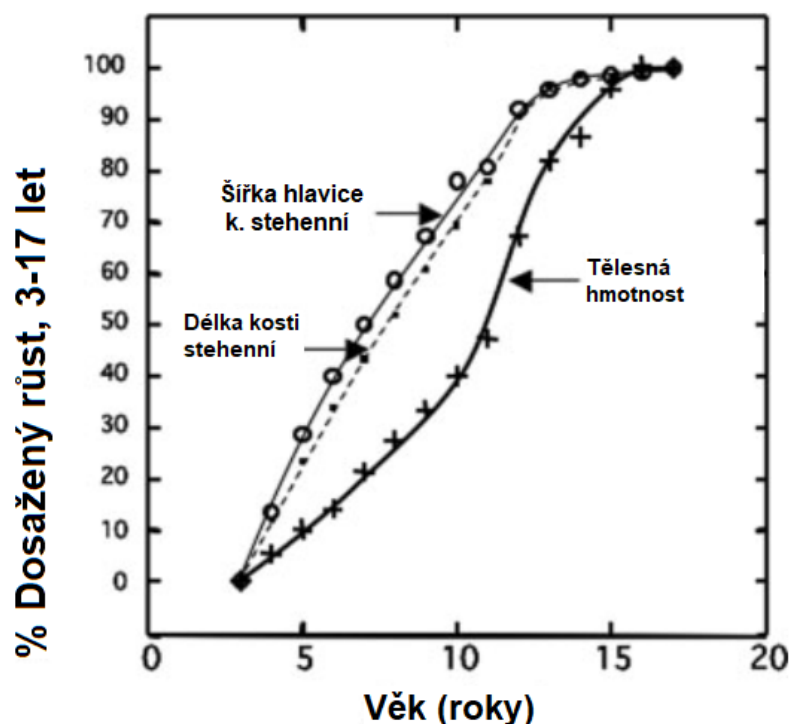
Der Meulen et al., 1993; Ruff, 2003). Diafýzy jsou silně ovlivněny aktivitou vykonávanou během života i u nedospělých jedinců (Cowgill, 2010), zatímco kloubní povrchy jsou méně citlivé na změny v zatížení (Lieberman et al., 2001). Předpokládá se, že vysoký poměr I_{max}/I_{min} silně koreluje s vyšší úrovní aktivity (Ruff et al., 1984). Jedinec zažívající zvýšenou zátěž v důsledku aktivity bude mít větší poměr I_{max}/I_{min} , protože předozadní (A-P) prodloužení je spojeno s vysokou flexí v kolenu (Lieberman et al., 2004). Byly porovnány průřezové vlastnosti kostí u žen trpících anorexií a žen se sníženým BMI (*body mass index*) bez poruchy příjmu potravy. Ženy bez poruchy příjmu potravy měli normální poměr tukové tkáně, menstruační cyklus, úroveň hormonů, a energetický metabolismus. Výsledky ukázaly, že tloušťka kortikální vrstvy kosti, celková plocha, a kvadratické momenty průřezu diafýz byly redukovány u obou skupin žen. Pravděpodobným vysvětlením redukované kostní hmoty u těchto jedinců bylo dle autorů nedostatečné zatížení skeletu (Galusca et al., 2008). Je také důležité poznamenat, že mechanická zátěž může mít různý vliv na modelování diafýz v závislosti na věku, ve kterém na kost působí (Ruff et al., 1994).

Ačkoli průzkumy naznačují, že metody pro nedospělé jedince založené na měření kloubního povrchu dobře fungují na jedincích odlišných tělesných typů (Cowgill, 2010), je potřeba další testování metod na jedincích se známou tělesnou hmotností pocházejících z různých populací s různými typy fyzické aktivity, klimatických podmínek, zeměpisných šířek, výživy a biokulturními úrovněmi stresu pro vyhodnocení jejich obecné využitelnosti (Pearson & Lieberman, 2004; Ruff et al., 2006). Je proto třeba opatrnosti při aplikaci obou mechanických metod na minulé populace kvůli vysokému vlivu aktivity v důsledku odlišných subsistenčních strategií (Cowgill, 2018).

Výsledky nejnovější studie Yim et al. (2021) ukázaly, že rovnice pro odhad tělesné hmotnosti nedospělých jedinců mohou fungovat napříč různými populacemi. Tato studie vyhodnotila několik dříve vypracovaných rovnic odhadu pro nedospělé s užitím současného průřezového vzorku 235 tchajwanských jedinců obou pohlaví ve věku 0–17 let narozdíl od předchozích studií přitom ve vzorku byli zastoupeni i jedinci s podváhou (8 % jedinců) i s nadváhou (16 % jedinců). Ve většině případů vyhodnocení proběhlo s podobnou přesností a zkreslením jako u těch, které byly zaznamenány v jiných studiích využívajících vzorky skládající se z Evropanů a (Sciulli & Blatt, 2008; Robbins Schug et al., 2013). Bylo zjištěno, že alometrické vztahy mezi J (*polar second moment of area*), FDB (*femoral diaphyseal breadth*), FHD (*femoral head diameter*) a tělesnou hmotností jsou zachovány v různých věkových kategoriích. Toto naznačuje, že je možné použít vzorek nejen longitudinální ale i průřezové studie k vytvoření univerzální rovnice pro odhad tělesné hmotnosti subadultních jedinců (Yim

et al., 2021). Autoři totiž uvádí, že mezi J a tělesnou hmotností, stejně jako vztahy mezi FHD a tělesnou hmotností byly do značné míry zachovány napříč věkovými kategoriemi. Avšak byl pozorován významný rozdíl ve vztahu mezi tělesnou hmotností a FDB napříč věkovými kategoriemi. Ukázalo se, že vztah mezi FDB a tělesnou hmotností se během věkového období od 2 měsíců až 3 let významně liší od všech ostatních věkových kategorií a jako pravděpodobný důvod této odlišnosti autoři uvádějí rychlou změnu tělesných proporcí a zrychlení růstu během tohoto období.

Podle Ruffa (2007) odhad kosterního věku může být lepším základem pro volbu rovnice pro predikci tělesné hmotnosti nebo výšky, jelikož změny v tělesných proporcích (např. v důsledku růstového spurtu) budou probíhat více paralelně s věkem kosterním než chronologickým. Robbins et al. (2013) odhadovali výšku pomocí panelové regrese, kdy nebrali ohled na věk jedince. Zjistili, že tato regrese odhadla výšku postavy stejně dobře jako rovnice Ruffa (2007), které závisely na stanovení věku, což naznačuje, že pokud není možné přesně stanovit věk v době smrti jedince, může být použití metody bez zohlednění věku nejlepším postupem odhadu.



Obrázek 7. Procentuální dosažený růst mezi 3. a 17. rokem života jedince pro délku stehenní kosti, šířku hlavičky kosti stehenní a tělesnou hmotnost. Každý bod představuje jedno longitudinální měření. Upraveno podle (Ruff, 2007)

V dětství a raném dospívání roste kost stehenní zřetelně rychleji než tělesná hmotnost (viz Obrázek 7), tudíž metoda hlavice stehenní kosti vyvinutá specificky pro dospělé jedince bude hmotnost u nedospělých jedinců nadhodnocovat.

Byl pozorován nárůst korelace mezi tělesnou hmotností a šířkou distální metafýzy femuru v období, kdy jedinec začíná chodit a síla této korelace v dalších obdobích vývoje klesá. To naznačuje, že velikost kloubu začíná postupně méně reagovat na změny mechanické zátěže, přestože růst epifýz a metafýz pokračuje rychlým tempem až do období adolescence (Ruff, 2007). V období pozdní adolescence bi-iliakální šířka společně s délkou dlouhých kostí podávají lepší odhad než šířka hlavice stehenní kosti. Chyba odhadu se s věkem zvyšuje a nejvyšší je právě během adolescence. Proto užití morfometrických parametrů může být alternativním řešením odhadu ve věku 15–16 let, kdy odhad hmotnosti z kloubních ploch nepodává příliš signifikantní výsledky (Ruff, 2007). Během normálního růstu stehenní kosti se velikost kloubu řídí růstovou křivkou podobnou křivce délky kostí a obecného lineárního růstu těla (tj. výšky postavy), která se prudce zvyšuje během časného dospívání a poté se do konce dospívání stabilizuje. Naproti tomu průřezové rozměry diafýz kopírují růstovou trajektorii, která se více podobá růstu tělesné hmotnosti, přičemž během dospívání nejprve zaostává za růstem délky kostí (a těla), ale poté se dále zvětšuje během rané dospělosti, a koncem třetího nebo začátkem čtvrtého desetiletí dosáhla "normální" velikosti dospělého člověka. V důsledku těchto rozdílných růstových trajektorií se neustále mění poměr kloubního a diafýzárního průřezu stehenní kosti s maximem v pozdním dětství až časně adolescenci (Ruff et al., 1994).

Ukázalo se, že morfometrické rovnice pro predikci tělesné hmotnosti dospělých lze aplikovat na nedospělé jedince (Walker et al., 2018). Autoři uvádějí, že rozdíly v tělesných proporcích a pravděpodobně i tělesném složení mezi dospělými a dětmi zvyšují chybu odhadu, zejména u malých dětí. Ontogenetické změny v tělesných proporcích pravděpodobně ovlivňují posun v chybě odhadu od podhodnocení k nadhodnocení, zejména pak poměr délky dolních končetin vůči postavě ovlivňuje přesnost odhadu. Budoucí výzkum by se dle Walkera et al. (2018) měl zaměřit na vytváření rovnic, které se nespolehají na predikované hodnoty (např. žijící bi-iliakální šířka a výška) jako na vstupní údaje. Nahrazení výšky postavy délkou dlouhých kostí by pomohlo snížit statistickou nejistotu kolem předpovídaných hodnot hmotnosti (Ruff, 2007).

Yappuncich et al. (2018) sestavil dvě nové rovnice odhadu tělesné hmotnosti podle výšky a šířky bi-iliakální kosti na základě velkého vzorku nedospělých jedinců shromážděných v rámci studie Harpenden Growth Study. Panelová regrese je méně využíváná, ale užitečný metodický přístup k vytváření rovnic predikce tělesné hmotnosti, které zohledňují sériovou

autokorelaci longitudinálních měření a nevyžadují tak stanovení věku jedince (Robbins Schug et al., 2013). Celkově by se zaznamenaná data představená pomocí panelové regrese v této studii měla ukázat jako užitečná v archeologických, forenzních a paleontologických kontextech, v nichž lze s jistotou odhadnout bi-iliakální šířku a výšku, zejména pokud se zdá, že cílový jedinec nebo populace mají menší tělo než moderní dospělí lidé (Yapuncich et al., 2018).

4. Závěr

Metod odhadu hmotnosti zaměřujících se na nedospělé jedince bylo doposud vytvořeno podstatně méně v porovnání s počtem metod věnujících se jedincům dospělým. Avšak během posledních deseti let začalo přibývat studií zabývajících se touto problematikou, protože aplikace metod vyvinutých pro dospělé jedince není vhodná v důsledku odlišných a proměnlivých poměrů délky těla a končetin. Změny tvaru těla a délky končetin se odehrávají nejvíce během období zrychlení růstu. Nejvýraznějším post-natálním obdobím zrychlení růstu je adolescence, které probíhá odlišně mezi pohlavími a je zároveň vysoce variabilní. Má za následek komplexní tělesnou přeměnu, která se uskutečňuje v jednotlivých tkáních s odlišným načasováním i v rámci jedince. Podmínky prostředí jako je výživa zvýšená fyzická aktivita mohou mít v tomto ohledu velice důležitý vliv na růst a formování kostry. Tento vliv lze pozorovat právě v období zvýšené rychlosti růstu a pravděpodobně se může lišit mezi pohlavími. Mnoho studií potvrzuje vliv fyzické aktivity ve vztahu k vlastnostem průřezů diafýz kostí dolních končetin, které se používají jako parametr odhadu hmotnosti. Také výsledky odhadu hmotnosti vykazují během dospívání nejvyšší chybovost.

Interpretace hmotnosti z kosterních pozůstatků u nedospělých jedinců je tedy stále komplikovaná. Doposud vytvořené regresní rovnice nebyly vytvořeny, ani testovány na širokém diverzifikovaném vzorku populace jako je tomu u rovnic pro dospělé jedince. Rovnice také nebyly testovány na vzorcích minulých populací, kde vlivy prostředí na růst a vývoj jsou výrazně odlišné od těch, které působí na populace současného moderního člověka na přelomu 20. a 21. století. Odhad tělesné hmotnosti z kosterních pozůstatků zahrnuje značnou nejistotu, vzhledem k variabilitě měkké tkáně ve vztahu ke kostře mezi jednotlivci a populacemi v průběhu života. Zatím neexistuje způsob, který by retrospektivně umožnil spolehlivě stanovit množství tělesného tuku. Z těchto důvodů by měly budoucí studie před výběrem konkrétní metody pečlivě zhodnotit svůj konečný cíl a kontext, se kterým bude tělesná hmotnosti odhadována.

5. Literatura¹

- Agostini, G. M., & Ross, A. H. (2011). The effect of weight on the femur: a cross-sectional analysis. *Journal of Forensic Sciences*, 56(2), 339–343.
- Aiello, L. C. (1992). Allometry and the analysis of size and shape in human evolution. *Journal of Human Evolution*, 22(2), 127–147.
- Aiello, L. C., & Wood, B. A. (1994). Cranial variables as predictors of hominine body mass. *American Journal of Physical Anthropology*, 95(4), 409–426.
- Araújo, J., Severo, M., Barros, H., Mishra, G. D., Guimarães, J. T., & Ramos, E. (2015). Developmental trajectories of adiposity from birth until early adulthood and association with cardiometabolic risk factors. *International Journal of Obesity*, 39(10), 1443–1449.
- Arden, N. K., & Spector, T. D. (1997). Genetic influences on muscle strength, lean body mass, and bone mineral density: A twin study. *Journal of Bone and Mineral Research*, 12(12), 2076–2081.
- Arsuaga, J. L., Lorenzo, C., Carretero, J. M., Gracia, A., Martínez, I., García, N., ... Carbonell, E. (1999). A complete human pelvis from the Middle Pleistocene of Spain. *Nature*, 399(6733), 255–258.
- 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.
- Auerbach, B. M., & Ruff, C. B. (2010). Stature estimation formulae for indigenous North American populations. *American Journal of Physical Anthropology*, 141(2), 190–207.
- Bailey, D. A., McKay, H. A., Mirwald, R. L., Crocker, P. R. E., & Faulkner, R. A. (1999). A six-year longitudinal study of the relationship of physical activity to bone mineral accrual in growing children: The University of Saskatchewan Bone Mineral Accrual Study. *Journal of Bone and Mineral Research*, 14(10), 1672–1679.
- Baxter-Jones, A. D. G., Eisenmann, J. C., Mirwald, R. L., Faulkner, R. A., & Bailey, D. A. (2008). The influence of physical activity on lean mass accrual during adolescence: A longitudinal analysis. *Journal of Applied Physiology*, 105(2), 734–741.
- Baxter-Jones, A. D. G., Helms, P., Baines-Preece, J., & Preece, M. (1994). Menarche in intensively trained gymnasts, swimmers and tennis players. *Annals of Human Biology*, 21(5), 407–415.
- Beunen, G. P., Malina, R. M., Renson, R., Simons, J., Ostyn, M., & Lefevre, J. (1992). Physical activity and growth, maturation and performance: a longitudinal study. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24(5).
- Bock, R. D., & Thissen, D. (1980). Statistical Problems of Fitting Individual Growth Curves. In F. E. Johnston, A. F. Roche, & C. Susanne (Eds.), *Human Physical Growth and Maturation: Methodologies and Factors* (pp. 265–290). Boston, MA: Springer US.
- Bogin, B. (1999). Evolutionary Perspective on Human Growth. *Annual Review of Anthropology*, 28(1), 109–153.

¹ Tři tečky (...) ve výčtu autorů daného zdroje v seznamu literatury označují počet autorů vyšší než 7.

- Bogin, B. (2012). Chapter 11 - The Evolution of Human Growth. In N. Cameron & B. Bogin (Eds.), *Human Growth and Development* (2nd ed., pp. 287–324). Boston: Academic Press.
- Bouchard, C., Tremblay, A., Després, J. P., Nadeau, A., Lupien, P. J., Thériault, G., ... Fournier, G. (1990). The Response to Long-Term Overfeeding in Identical Twins. *New England Journal of Medicine*, 322(21), 1477–1482.
- Byard, R. W. (2012). The complex spectrum of forensic issues arising from obesity. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 8(4), 402–413.
- Cairney, J., & Wade, T. J. (1998). Correlates of body weight in the 1994 National Population Health Survey. *International Journal of Obesity*, 22(6), 584–591.
- Chinappen-Horsley, U., Blake, G. M., Fogelman, I., Kato, B., Ahmadi, K. R., & Spector, T. D. (2008). Quantitative Trait Loci for Bone Lengths on Chromosome 5 Using Dual Energy X-Ray Absorptiometry Imaging in the Twins UK Cohort. *PLOS ONE*, 3(3), e1752.
- Čihák, R. (2001). *Anatomie I* (2nd ed.). Praha: Grada Publishing.
- Claessens, A. L., Malina, R. M., Lefevre, J., Beunen, G. P., Stijnen, V., Maes, H., & Veer, F. M. (1992). Growth and menarcheal status of elite female gymnasts. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(7), 755–763.
- Cole, T. J. (2004). Modeling Postnatal Exposures and Their Interactions with Birth Size. *The Journal of Nutrition*, 134(1), 201–204.
- Comuzzie, A. G., & Allison, D. B. (1998). The search for human obesity genes. *Science*, 280(5368), 1374–1377.
- Conroy, G. C. (1987). Problems of body-weight estimation in fossil primates. *International Journal of Primatology*, 8(2), 115–137.
- Cowgill, L. W. (2010). The ontogeny of Holocene and late Pleistocene human postcranial strength. *American Journal of Physical Anthropology*, 141(1), 16–37.
- Cowgill, L. W. (2018). Juvenile body mass estimation: A methodological evaluation. *Journal of Human Evolution*, 115, 78–84.
- Davies, J. H., Evans, B. A. J., & Gregory, J. W. (2005). Bone mass acquisition in healthy children. *Archives of Disease in Childhood*, 90(4), 373–378.
- de Onis, M., & Blössner, M. (2003). The World Health Organization Global Database on Child Growth and Malnutrition: Methodology and applications. *International Journal of Epidemiology*, 32(4), 518–526.
- DeSilva, J. M. (2011). A shift toward birthing relatively large infants early in human evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(3), 1022–1027.
- Eckstein, F., Faber, S., Mühlbauer, R., Hohe, J., Englmeier, K. H., Reiser, M., & Putz, R. (2002). Functional adaptation of human joints to mechanical stimuli. *Osteoarthritis and Cartilage*, 10(1), 44–50.
- Elks, C., Den Hoed, M., Zhao, J. H., Sharp, S., Wareham, N., Loos, R., & Ong, K. (2012). Variability in the Heritability of Body Mass Index: A Systematic Review and Meta-Regression. *Frontiers in Endocrinology*, 3, 29.

- Eveleth, P. B. (1966). The Effects of Climate on Growth. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 134(2), 750–759.
- Galusca, B., Zouch, M., Germain, N., Bossu, C., Frere, D., Lang, F., ... Estour, B. (2008). Constitutional Thinness: Unusual Human Phenotype of Low Bone Quality. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 93(1), 110–117.
- Ganpule, A., Yajnik, C. S., Fall, C. H. D., Rao, S., Fisher, D. J., Kanade, A., ... Joglekar, C. (2006). Bone mass in Indian children - Relationships to maternal nutritional status and diet during pregnancy: The Pune maternal nutrition study. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*, 91(8), 2994–3001.
- Gasser, T., Ziegler, P., Kneip, A., Prader, A., Molinari, L., & Largo, R. H. (1993). The dynamics of growth of weight, circumferences and skinfolds in distance, velocity and acceleration. *Annals of Human Biology*, 20(3), 239–259.
- Gibson, J. H., Mitchell, A., Harries, M. G., & Reeve, J. (2004). Nutritional and exercise-related determinants of bone density in elite female runners. *Osteoporosis International*, 15(8), 611–618.
- 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.
- Grine, F. E., Jungers, W. L., Tobias, P. V., & Pearson, O. M. (1995). Fossil Homo femur from Berg Aukas, northern Namibia. *American Journal of Physical Anthropology*, 97(2), 151–185.
- Hartwig-Scherer, S. (1993). Body weight prediction in early fossil hominids: Towards a taxon-“independent” approach. *American Journal of Physical Anthropology*, 92(1), 17–36.
- Hartwig-Scherer, S., & Martin, R. D. (1992). Allometry and prediction in Hominoids: A solution to the problem of intervening variables. *American Journal of Physical Anthropology*, 88(1), 37–57.
- Haworth, C. M. A., Carnell, S., Meaburn, E. L., Davis, O. S. P., Plomin, R., & Wardle, J. (2008). Increasing Heritability of BMI and Stronger Associations With the FTO Gene Over Childhood. *Obesity*, 16(12), 2663–2668.
- Hur, Y. M., Kaprio, J., Iacono, W. G., Boomsma, D. I., McGue, M., Silventoinen, K., ... Mitchell, K. (2008). Genetic influences on the difference in variability of height, weight and body mass index between Caucasian and East Asian adolescent twins. *International Journal of Obesity*, 32(10), 1455–1467.
- Ikoma, E., Kanda, S., Nakata, S., Wada, Y., & Yamazaki, K. (1988). Quantitative genetic analysis of bi-iliac breadth. *American Journal of Physical Anthropology*, 77(3), 295–301.
- Javaid, M. K., Crozier, S. R., Harvey, N. C., Gale, C. R., Dennison, E. M., Boucher, B. J., ... Cooper, C. (2006). Maternal vitamin D status during pregnancy and childhood bone mass at age 9 years: a longitudinal study. *The Lancet*, 367(9504), 36–43.
- Johnson, W., Choh, A. C., Lee, M., Towne, B., Czerwinski, S. A., & Demerath, E. W. (2013). Characterization of the infant BMI peak: Sex differences, birth year cohort effects, association with concurrent adiposity, and heritability. *American Journal of Human Biology*, 25(3), 378–388.

- Jones, G., Riley, M. D., & Dwyer, T. (2000). Maternal diet during pregnancy is associated with bone mineral density in children: a longitudinal study. *European Journal of Clinical Nutrition*, 54(10), 749–756.
- Katzmarzyk, P. T., & Leonard, W. R. (1998). Climatic influences on human body size and proportions: Ecological adaptations and secular trends. *American Journal of Physical Anthropology*, 106(4), 483–503.
- Korkeila, M., Kaprio, J., Rissanen, A., & Koskenvuo, M. (1991). Effects of gender and age on the heritability of body mass index. *International Journal of Obesity*, 15(10), 647–654.
- Korpinen, N., Keisu, A., Niinimäki, J., Karppinen, J., Niskanen, M., Junno, J. A., & Oura, P. (2019). Body mass estimation from dimensions of the fourth lumbar vertebra in middle-aged Finns. *Legal Medicine*, 40, 5–16.
- Kurki, H. K., Ginter, J. K., Stock, J. T., & Pfeiffer, S. (2010). Body size estimation of small-bodied humans: Applicability of current methods. *American Journal of Physical Anthropology*, 141(2), 169–180.
- Lazaar, N., Aucouturier, J., Ratel, S., Rance, M., Meyer, M., & Duché, P. (2007). Effect of physical activity intervention on body composition in young children: influence of body mass index status and gender. *Acta Paediatrica (Oslo, Norway : 1992)*, 96(9), 1315–1320.
- 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.
- Lieberman, D. E., Polk, J. D., & Demes, B. (2004). Predicting Long Bone Loading from Cross-Sectional Geometry. *American Journal of Physical Anthropology*, 123(2), 156–171.
- Malina, R. M. (1994). Physical activity and training: effects on stature and the adolescent growth spurt. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 26(6), 759–766.
- Malina, R. M. (2006). Weight training in youth-growth, maturation, and safety: An evidence-based review. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 16(6), 478–487.
- Maresh, M. M., & Beal, V. A. (1970). A Longitudinal Survey of Nutrition Intake, Body Size, and Tissue Measurements in Healthy Subjects during Growth. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 35(7), 33–39.
- Mathers, K., & Henneberg, M. (1995). Were we ever that big? Gradual increase in hominid body size over time. *Homo*, 46(2), 141–173.
- McHenry, H. M. (1991). Sexual dimorphism in *Australopithecus afarensis*. *Journal of Human Evolution*, 20(1), 21–32.
- McHenry, H. M. (1992). Body size and proportions in early hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 87(4), 407–431.
- Miyabara, Y., Onoe, Y., Harada, A., Kuroda, T., Sasaki, S., & Ohta, H. (2007). Effect of physical activity and nutrition on bone mineral density in young Japanese women. *Journal of Bone and Mineral Metabolism*, 25(6), 414–418.
- Moro, M., van der Meulen, M. C. H., Kiratli, B. J., Marcus, R., Bachrach, L. K., & Carter, D. R. (1996). Body mass is the primary determinant of midfemoral bone acquisition during

- adolescent growth. *Bone*, 19(5), 519–526.
- Niskanen, M., Junno, J. A., Maijanen, H., Holt, B., Sládek, V., & Berner, M. (2018). Can we refine body mass estimations based on femoral head breadth? *Journal of Human Evolution*, 115, 112–121.
- Nordin, M., & Frankel, V. H. (2001). *Basic biomechanics of the musculoskeletal system*. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Pearson, O. M., & Lieberman, D. E. (2004). The aging of Wolff's "law": Ontogeny and responses to mechanical loading in cortical bone. *Yearbook of Physical Anthropology*, 47, 63–99.
- Pfeiffer, S., & Sealy, J. (2006). Body size among holocene foragers of the Cape Ecozone, southern Africa. *American Journal of Physical Anthropology*, 129(1), 1–11.
- Pomeroy, E., Macintosh, A., Wells, J. C. K., Cole, T. J., & Stock, J. T. (2018). Relationship between body mass, lean mass, fat mass, and limb bone cross-sectional geometry: Implications for estimating body mass and physique from the skeleton. *American Journal of Physical Anthropology*, 166(1), 56–69.
- Porter, A. M. W. (1995). The body weight of AL 288-1 ('Lucy'): A new approach using estimates of skeletal length and the body mass index. *International Journal of Osteoarchaeology*, 5(3), 203–212.
- Porter, A. M. W. (2002). Estimation of body size and physique from hominin skeletal remains. *Homo*, 53(1), 17–38.
- Prader, A. (1984). Biomedical and Endocrinological Aspects of Normal Growth and Development. In J. Borms, R. Hauspie, E. A. Sand, C. Susanne, & M. Hebbelinck (Eds.), *Human Growth and Development* (pp. 1–22). Boston, MA: Springer US.
- Preece, M. (1996). The Genetic Contribution to Stature. *Hormone Research in Paediatrics*, 45(Suppl. 2), 56–58.
- Prentice, A. (2001). The relative contribution of diet and genotype to bone development. *Proceedings of the Nutrition Society*, 60(1), 45–52.
- Prentice, A., & Bates, C. J. (1994). Adequacy of dietary mineral supply for human bone growth and mineralisation. *European Journal of Clinical Nutrition*, 48 Suppl 1, S161-76; discussion S177.
- Prentice, A., Ginty, F., Stear, S. J., Jones, S. C., Laskey, M. A., & Cole, T. J. (2005). Calcium Supplementation Increases Stature and Bone Mineral Mass of 16- to 18-Year-Old Boys. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism*, 90(6), 3153–3161.
- Prentice, A., Schoenmakers, I., Ann Laskey, M., de Bono, S., Ginty, F., & Goldberg, G. R. (2006). Symposium on 'Nutrition and health in children and adolescents' Session 1: Nutrition in growth and development Nutrition and bone growth and development. *Proceedings of the Nutrition Society*, 65(04), 348–360.
- Robbins Schug, G., Gupta, S., Cowgill, L. W., Sciulli, P. W., & Blatt, S. H. (2013). Panel regression formulas for estimating stature and body mass from immature human skeletons: A statistical approach without reference to specific age estimates. *Journal of Archaeological Science*, 40(7), 3076–3086.
- Robbins Schug, G., Sciulli, P. W., & Blatt, S. H. (2010). Estimating body mass in subadult

- human skeletons. *American Journal of Physical Anthropology*, 143(1), 146–150.
- Roberts, D. F. (1953). Body weight, race and climate. *American Journal of Physical Anthropology*, 11(4), 533–558.
- Roberts, D. F. (1973). *Climate and human variability*. Reading MA: Addison-Wesley Pub. Co.
- Rogol, A. D., Clark, P. A., & Roemmich, J. N. (2000). Growth and pubertal development in children and adolescents: effects of diet and physical activity. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 72(2 Suppl), 521S-8S.
- Rolland-Cachera, M. F., Deheeger, M., Maillot, M., & Bellisle, F. (2006). Early adiposity rebound: Causes and consequences for obesity in children and adults. *International Journal of Obesity*, 30, S11–S17.
- Ruff, C. B. (1994). Morphological adaptation to climate in modern and fossil hominids. *American Journal of Physical Anthropology*, 37(19 S), 65–107.
- Ruff, C. B. (2000a). Body mass prediction from skeletal frame size in elite athletes. *American Journal of Physical Anthropology*, 113(4), 507–517.
- Ruff, C. B. (2000b). Body size, body shape, and long bone strength in modern humans. *Journal of Human Evolution*, 38(2), 269–290.
- Ruff, C. B. (2002). Variation in human body size and shape. *Annual Review of Anthropology*, 31(1), 211–232.
- Ruff, C. B. (2003). Growth in bone strength, body size, and muscle size in a juvenile longitudinal sample. *Bone*, 33(3), 317–329.
- Ruff, C. B. (2007). Body size prediction from juvenile skeletal remains. *American Journal of Physical Anthropology*, 133(1), 698–716.
- Ruff, C. B., Holt, B. M., Niskanen, M., Sládek, V., Berner, M., Garofalo, 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.
- 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.
- Ruff, C. B., Larsen, C. S., & Hayes, W. C. (1984). Structural changes in the femur with the transition to agriculture on the Georgia coast. *American Journal of Physical Anthropology*, 64(2), 125–136.
- 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.
- 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.
- Ruff, C. B., Squyres, N., & Junno, J. A. (2020). Body mass estimation in hominins from humeral articular dimensions. *American Journal of Physical Anthropology*, 173(3), 480–499.

- Ruff, C. B., Trinkaus, E., & Holliday, T. W. (1997). Body mass and encephalization in Pleistocene Homo. *Nature*, 387(6629), 173–176.
- Ruff, C. B., Walker, A., & Teaford, M. F. (1989). Body mass, sexual dimorphism and femoral proportions of Proconsul from Rusinga and Mfangano Islands, Kenya. *Journal of Human Evolution*, 18(6), 515–536.
- Ruff, C. B., Walker, A., & Trinkaus, E. (1994). Postcranial robusticity in Homo. III: Ontogeny. *American Journal of Physical Anthropology*, 93(1), 35–54.
- Schell, L. M., Knutson, K. L., & Bailey, S. (2012). Chapter 10 - Environmental Effects on Growth. In N. Cameron & B. Bogin (Eds.), *Human Growth and Development* (2nd ed., pp. 245–286). Boston: Academic Press.
- Sciulli, P. W., & Blatt, S. H. (2008). Evaluation of juvenile stature and body mass prediction. *American Journal of Physical Anthropology*, 136(4), 387–393.
- Seeman, E., Karlsson, M. K., & Duan, Y. (2000). On Exposure to Anorexia Nervosa, the Temporal Variation in Axial and Appendicular Skeletal Development Predisposes to Site-Specific Deficits in Bone Size and Density: A Cross-Sectional Study. *Journal of Bone and Mineral Research*, 15(11), 2259–2265.
- Skaggs, D. L., Loro, M. L., Pitukcheewanont, P., Tolo, V., & Gilsanz, V. (2001). Increased Body Weight and Decreased Radial Cross-Sectional Dimensions in Girls with Forearm Fractures. *Journal of Bone and Mineral Research*, 16(7), 1337–1342.
- 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.
- Sørensen, T. I. A., Price, R. A., Stunkard, A. J., & Schulsinger, F. (1989). Genetics of obesity in adult adoptees and their biological siblings. *BMJ*, 298(6666), 87–90.
- Stear, S. J., Prentice, A., Jones, S. C., & Cole, T. J. (2003). Effect of a calcium and exercise intervention on the bone mineral status of 16–18-y-old adolescent girls. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 77(4), 985–992.
- Steckel, R. H., Rose, J. C., Spencer Larsen, C., & Walker, P. L. (2002). Skeletal health in the Western Hemisphere from 4000 B.C. to the present. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 11(4), 142–155.
- Studel, K. (1980). New estimates of early hominid body size. *American Journal of Physical Anthropology*, 52(1), 63–70.
- Stock, J. T., & Macintosh, A. A. (2016). Lower limb biomechanics and habitual mobility among mid-Holocene populations of the Cis-Baikal. *Quaternary International*, 405, 200–209.
- Strong, W. B., Malina, R. M., Blimkie, C. J. R., Daniels, S. R., Dishman, R. K., Gutin, B., ... Trudeau, F. (2005). Evidence based physical activity for school-age youth. *Journal of Pediatrics*, 146(6), 732–737.
- Stunkard, A. J., Sørensen, T. I. A., Hanis, C., Teasdale, T. W., Chakraborty, R., Schull, W. J., & Schulsinger, F. (1986). An Adoption Study of Human Obesity. *New England Journal of Medicine*, 314(4), 193–198.

- Tanner, J. M. (1990). *Foetus into man: Physical growth from conception to maturity*. Harvard University Press.
- Tanner, J. M., Whitehouse, R. H., & Takaishi, M. (1966). Standards from birth to maturity for height, weight, height velocity, and weight velocity: British children, 1965 part II. *Archives of Disease in Childhood*, 41(220), 613–635.
- Theintz, G. E., Howald, H., Weiss, U., & Sizonenko, P. C. (1993). Evidence for a reduction of growth potential in adolescent female gymnasts. *Journal of Pediatrics*, 122(2), 306–313.
- Towne, B., Demerath, E. W., & Czerwinski, S. A. (2012). Chapter 8 - The Genetic Epidemiology of Growth and Development. In N. Cameron & B. Bogin (Eds.), *Human Growth and Development* (2nd ed., pp. 173–223). Boston: Academic Press.
- Trinkaus, E., & Ruff, C. B. (1999). Diaphyseal cross-sectional geometry of Near Eastern Middle Palaeolithic humans: The femur. *Journal of Archaeological Science*, 26(4), 409–424.
- 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.
- van Der Meulen, M. C. H., Beaupré, G. S., & Carter, D. R. (1993). Mechanobiologic influences in long bone cross-sectional growth. *Bone*, 14(4), 635–642.
- Walker, C. S., Yapuncich, G. S., Sridhar, S., Cameron, N., & Churchill, S. E. (2018). Evaluating morphometric body mass prediction equations with a juvenile human test sample: accuracy and applicability to small-bodied hominins. *Journal of Human Evolution*, 115, 65–77.
- Wood, B., & Collard, M. (1999). The changing face of genus *Homo*. *Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews*, 8(6), 195–207.
- Yapuncich, G. S., Churchill, S. E., Cameron, N., & Walker, C. S. (2018). Morphometric panel regression equations for predicting body mass in immature humans. *American Journal of Physical Anthropology*, 166(1), 179–195.
- Yim, A. Di, Konigsberg, L. W., Hwa, H. L., Chang, C. C., Chen, J. Y., & Liu, H. M. (2021). Allometric scaling and growth: Evaluation and applications in subadult body mass estimation. *American Journal of Physical Anthropology*, 175(3), 577–588.
- Zakrzewski, S. R. (2003). Variation in ancient Egyptian stature and body proportions. *American Journal of Physical Anthropology*, 121(3), 219–229.

