

Efektivita chůze a běhu v evoluci člověka

Člověk byl po většinu své evoluční historie nucen kvůli zajištění obživy denně překonávat poměrně dlouhé vzdálenosti, náklady na pohyb tudíž tvořily podstatnou část jeho energetického výdeje. Jakákoli cesta, jak snížit nákladnost pohybu, byla pro naše předky lákavá, protože ušetřenou energii mohli investovat mnohem účelněji, kupř. na rozmnožování a následnou péči o potomstvo. Efektivita pohybu, obzvláště chůze a běhu, tak hrála významnou úlohu při osvojování bipedie prvními homininy, při vzniku moderních lidských proporcí těla u zástupců rodu *Homo* a snad i při vytlačování našich archaických bratranců neanderťalců moderními lidmi během jejich expanze v posledních 100 tisících letech.

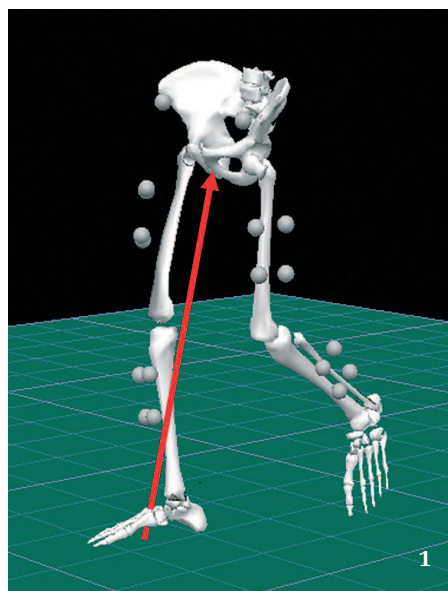
Lidský pohyb zajímá vědce z mnoha důvodů. Lékaři a fyzioterapeuti chtějí vědět, jak usnadnit pohyb svým pacientům, trenérům a sportovcům pak studium lidského pohybu naznačuje možnosti, jak zlepšit sportovní výkon. Lidskému pohybu, obzvláště chůzi a běhu, však věnují pozornost i evoluční antropologové, a to především pro jeho jedinečnost ve srovnání s pohybem všech ostatních žijících primátů. Badatelé si již více než 100 let lámou hlavu nad otázkami, co vedlo naše dávné předky k chůzi po dvou končetinách, jaké změny ve stavbě těla pohyb po dvou umožnily a posléze zefektivnily a jaké potřeby vedly k proměně dolních končetin a celého těla v následujících milionech let.

Při zkoumání pohybu a jeho významu v evoluci člověka se dnes využívá celá škála nejrůznějších přístupů a jejich kombinací. Zaznamenává se a následně analyzuje chůze a běh současných lidí a dalších primátů pomocí vícekamerových systémů, tlakoměrých vložek v obuvi nebo silových desek v kombinaci se softwarem pro modelování kostry a svalů (obr. 1). Využívají se analyzátoři dechových plynů, jež napovídají o spotřebě energie při zkoumaném pohybu. V neposlední řadě se studují také fosilizované kosti našich předků – zjišťuje se třeba, jaké zátěže mohly být kosti za života vystavovány, z čehož pak odvozujeme, jaký způsob pohybu jejich majitel používal. Pojďme se ale podívat na konkrétní příklady z naší evoluční historie, při nichž bylo důležité pohybovat se s nižšími výdaji a i v jiných ohledech co nejúčinněji, jak toho naši předci dosáhli, a případně jaké měli k zefektivňování pohybu důvody.

První kroky k efektivnější chůzi

Podle mnoha badatelů mohla stát snaha o ušetření energie už za vzpřímením dávných lidských předků a počátkem chůze po dvou končetinách. Tato myšlenka by nemusela být daleko od pravdy, neboť ze srovnávacích výzkumů víme, že člověk dokáže chůzí po dvou ušetřit až 20 % nákladů oproti průměrnému čtvernožci.

Za účelem ověření této hypotézy badatelé vytrénovali několik šimpanzů (*Pan troglodytes*), aby zvládli nejen chodit po dvou končetinách, ale také nést masku analyzátoru dechových plynů nutnou k měření spotřeby energie. Šimpanze poté nechali chodit na běžeckém pásu a z vydechovaných plynů zjišťovali míru náročnosti chůze po dvou pro jedince adaptované na úplně jiný způsob pohybu. Získali překvapující výsledky – náklady na chůzi po dvou byly pro šimpanze pouze o 10 % větší, než když chodili svým přirozeným způsobem po čtyřech končetinách (kvadrupedně, obr. 2). Mezi jedinci nicméně existovaly významné rozdíly a spotřeba energie se ukázala být silně ovlivněna schopností zvířete udržet při chůzi vzpřímené tělo. Jedince, kteří při chůzi udržovali zadní končetiny více natažené (extenzované) v kyčelním a kolenním kloubu, stála chůze po dvou méně energie (k obdobným závěrům vedly i experimenty s makaky). Šimpanzi nemohou plně natáhnout končetinu v kyčelním kloubu jako lidé kvůli odlišné orientaci sedací kosti, a při bipedním pohybu



tak působí příkrčeně. Někteří jsou nicméně schopni takové míry extenze, že pro ně bipední pohyb znamená stejné náklady jako kvadrupedie. Zdá se tedy, že prvními hominínům (termín hominín zahrnuje člověka a jeho nejbližší příbuzné, blíže Živa 2014, 2: 53–56) stačila pouze drobná přestavba pánve, jež by umožnila větší natažení kyčelního a kolenního kloubu, a bipedie by se pro ně stala energeticky výhodnější než kvadrupedie. Jakkoli tedy šetření energie pravděpodobně nepředstavovalo prvotní podnět pro homininy k chůzi po dvou (blíže také Živa 2014, 3: 103–106), po mírných anatomických úpravách mohla být účinnost pohybu ve smyslu minimalizace energetických nákladů na překonání určité vzdálenosti silným faktorem pro udržení a rozvinutí bipedního způsobu chůze. Po první fázi adaptace na chůzi po dvou, během níž došlo vedle změny tvaru pánve např. i k přímknutí palce nohy k ostatním prstům, zřejmě selekční tlak na další zvyšování efektivity zeslábl a znovu vyvstal až s příchodem prvních zástupců rodu *Homo* a obzvláště pak *H. ergaster* zhruba před dvěma miliony let.

Směrování k vyšší rychlosti a vytrvalosti

H. ergaster se od krku níže nápadně podobal dnešnímu člověku. Od časných hominínů bychom ho poznali podle dlouhých končetin, relativně užšího pasu nebo podle nožní klenby (obr. 2). Tyto a další charakteristicky lidské znaky včetně absence srsti vznikly jako adaptace na specifickou formu pohybu, jež našim předkům umožnila ve významnější míře obohatit jejich jídelníček o maso – s adaptací na běh.

Běh byl evolučními antropology dlouho přehlížen a není se příliš co divit. Na první pohled totiž nejde o způsob pohybu, v němž by člověk vynikal. I ti nejrychlejší sprinteři stěží dosahují rychlosti 40 km/hod. a jsou schopni ji udržet jen několik málo sekund. Pro srovnání mnozí čtvernozí běžci jako např. koně, antilopy či chrti mohou vyvinout rychlost 50–70 km/hod. a udržet ji ve stejné intenzitě po dobu několika minut. Běh pro člověka navíc znamená velkou spotřebu energie. Oproti savcům stejné hmotnosti těla vyžaduje běžící člověk přísun přibližně dvojnásobku energie. Člověk nicméně vyniká ve specifické disciplíně – ve vytrvalostním běhu. Schopnost běžet mnoho kilometrů máme jako jediní mezi primáty, nicméně výjimečná je i na úrovni savců kromě některých sociálních masožravců (hyeny, různé psovitě šelmy) a migrujících býložravců (koně). Nad důvody lidské excelence ve vytrvalostním běhu se poprvé hlouběji zamýšlel evoluční biolog David Carrier z univerzity v Utahu v r. 1984, ale až před 10 lety jeho myšlenky rozpracovali Dennis Bramble a David Lieberman do podoby tzv. hypotézy vytrvalostního běhu.

Carrier si nejprve položil otázku, proč vůbec zvířata běhají, a došel k odpovědi, že využívají běh při třech typech příležitostí – při hře, útěku před predátorem a při pronásledování kořisti. Těžko si představit, že běh při hře by zvyšoval reprodukční úspěšnost a mohl tak vést k selekci na zvyšování účinnosti běhu. Mohla by však naše schopnost vytrvalostního běhu vznik-

1 Model dolních končetin současného muže při chůzi vytvořený v softwaru Visual3D. Šedé koule představují pozice reflexních markerů sloužících k záznamu pohybu jednotlivých částí dolní končetiny v prostoru a čase. Červená šipka zobrazuje orientaci síly, kterou Země působí na naše tělo v odpovědi na působení našeho těla na Zemi. Proti této síle účinkují během pohybu natahovače (extenzory) kloubů dolní končetiny a udržují tak lidské tělo ve vzpřímené pozici.

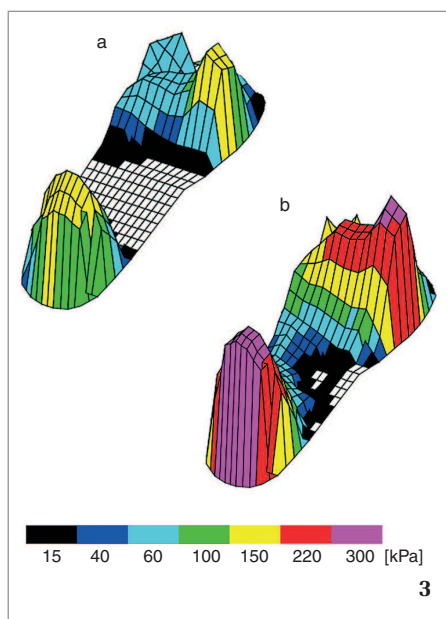
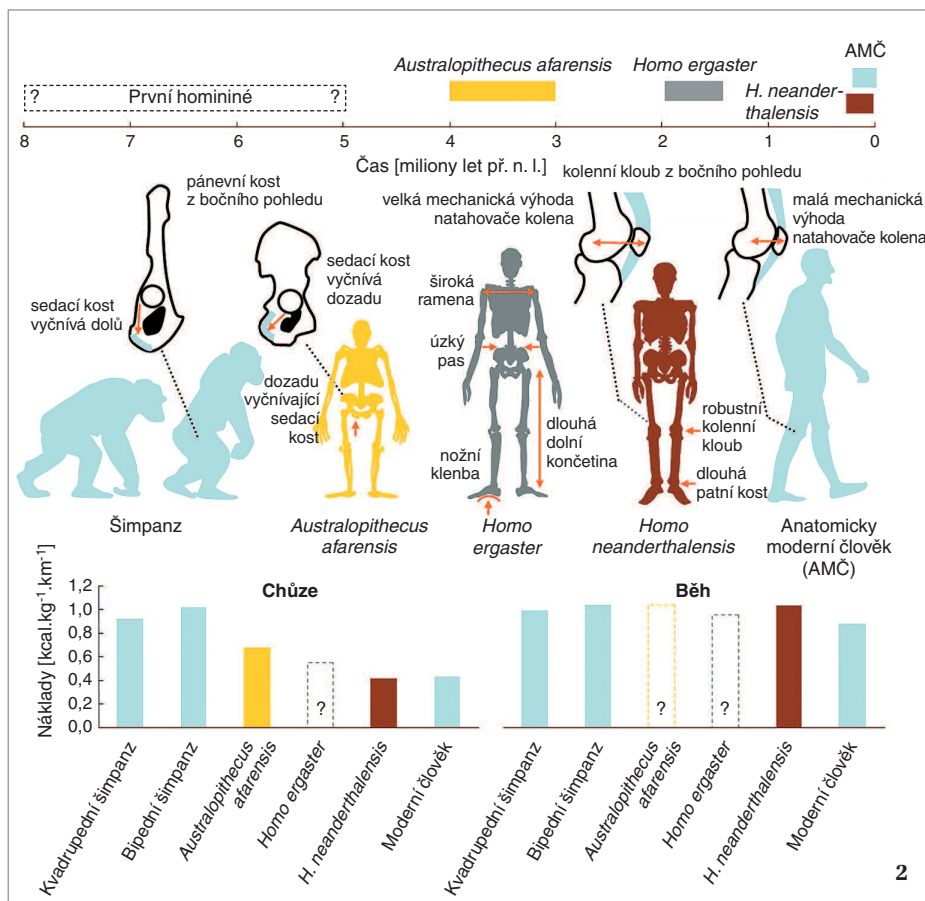
2 Příklady znaků zvyšujících efektivitu lokomoce vybraných vymřelých homininů (*Australopithecus afarensis*, *Homo ergaster*, neandertálců – *H. neanderthalensis*), jejich časové zařazení a odhadované či předpokládané náklady na chůzi a běh ve srovnání s měřenými náklady šimpanzů a současných lidí (*H. sapiens sapiens*, anatomicky moderní člověk – AMČ). Upraveno podle: D. M. Bramble a D. E. Lieberman (2004), M. Hora a V. Sládek (2014), H. Pontzer a kol. (2009, 2014), D. A. Raichlen a kol. (2011), J. Rubenson a kol. (2007), M. D. Sockol a kol. (2007)

3 Srovnání rozložení tlaku na chodidle levé nohy u ženy při chůzi (a) a běhu (b) zaznamenané pomocí tlakoměrných vložek v obuvi. Při běhu dosahuje tlak v oblasti paty a rozhraní palce a nártu až dvojnásobných hodnot oproti chůzi, což se projevuje i ve vyšší zátěži celého kosterního a svalového systému.

Orig. M. Hora a V. Sládek (obr. 1–3)

nout jako způsob ochrany před predátory? Vzhledem k tomu, že predátoři dokážou často vyvinout vysoké rychlosti, zatímco naše sprinterské kvality nejsou příliš velké, nezdá se být běh v tomto směru vhodnou ochranou. Běh tudíž museli homininé využívat spíše k opatření potravy, jakkoli nešlo hned nutně o stíhání kořisti. Slouží totiž některým druhům mrchožroutů, aby se dostali k mřšině dříve než jejich konkurenti. Např. hyeny identifikují vzdálené mřšiny podle kroužících supů, a pak rychle překonávají i několikakilometrovou vzdálenost, jež je od mřšiny dělí. Obdobnou strategii získávání živočišné potravy mohli uplatňovat i naši předci. Některé druhy (např. vlk obecný – *Canis lupus* a pes hyenový – *Lycan pictus*) nicméně využívají vytrvalostní běh i při vlastním lovu a máme etnografické záznamy dokládající, že s jeho pomocí loví také někteří současní lovci-sběrači. Mezi nejznámější příklady etnik příležitostně se uchylujících ke strategii stíhacího (nebo také vytrvalostního) lovu patří Sanové z pouště Kalahari, kteří tímto způsobem loví antilopy či pakoně. Existují i záznamy užívání vytrvalostního běhu při lovu klokanů Austrálci, a indiáni kmene Navaho ze severozápadu dnešních Spojených států amerických tak lovili dokonce vidlorohy (*Antilocapra americana*) patřící mezi nejrychlejší savce na světě. Jak je možné, že člověk je schopen doslova doběhnout několikrát rychlejšího kvadrupedního savce? Klíč našeho úspěchu spočívá především v účinné termoregulaci.

Při běhu se musí odvádět z těla teplo produkované aktivitou svalů. Pokud svaly vytvářejí tepla více, než je tělo schopno



odvést, tělesná teplota stoupá. Její zvýšení o pouhých několik málo °C může savce (včetně člověka) ohrozit na životě, a proto, pokud to jde, odmítá při překonání určitého teplotního limitu v běhu pokračovat. Většina savců odvádí teplo odpařováním ze sliznic v dýchacích cestách a plicích. Výjimku představují člověku blízcí primáti, koně a velbloudi, kteří jsou schopni regulovat tělesnou teplotu i pomocí pocení. Zbavování se tepla pocením umožňuje využívat větší plochu pro odpařování a navíc nezávisí na dýchacím cyklu, jenž je u kvadrupedů kontrolován pohyby zvířete. Běžící čtvernožec tak nemůže dýchací cyklus upravit podle potřeby termoregulace. Člověk má ale výhodu i oproti potčím se koním a velbloudům – absenci

srsti a vzpřímený pohyb po dvou končetinách. U kůže bez srsti dochází k vyššímu odvodu tepla konvekcí (prouděním) a vzpřímeným držením těla pak při pohybu vystavujeme větší plochu našeho povrchu ochlazujícímu proudění vzduchu. Díky této kombinaci znaků dokáže člověk běžet několik kilometrů i v žáru poledního rovníkového slunce a při stíhacím lovu toho patřičně využívá. Právě kolem poledne je výdrž ostatních savců – potenciálně kořisti – nejvíce termoregulačně omezena, a šance na úspěšný lov jsou tudíž nejvyšší. Nutno dodat, že k úspěšnému stíhacímu lovu není potřeba sofistikovaných zbraní, jelikož zvíře se po několika kilometrech úprku stane vlivem selhání termoregulačního systému nepohyblivým a v podstatě bezbranným. Tímto způsobem mohli homininé získávat maso dlouho před vynalezením luku, šípů nebo vrhače oštěpů.

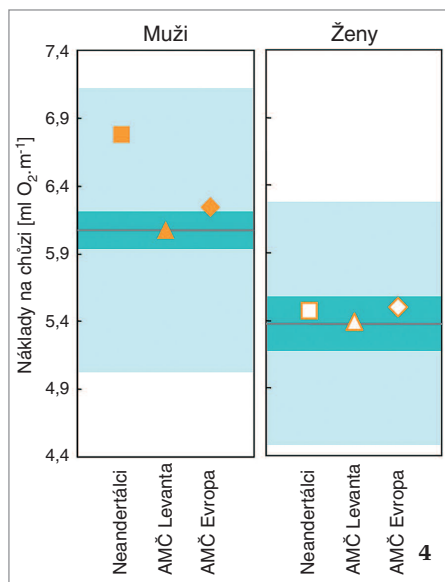
Selekci efektivnějšího běhu pravděpodobně vděčíme řadě typicky lidských znaků, jež přispívají ke snížení lokomočních nákladů (dlouhé dolní končetiny, klenba nohy, dlouhá šlacha trojhlavého lýtkového svalu), k účinnějšímu odvodu tepla (absence srsti), stabilizaci těla (úzký pas v kombinaci se širokými rameny, objemný velký hýžďový sval) a zvýšení odolnosti proti značné zátěži (obr. 3), které je tělo při běhu ve srovnání s chůzí vystaveno (velké kloubní plochy, mohutné kosti nohy).

Robustní klouby a zánik neandertálců
Vzhledem k důležitosti efektivnosti chůze při osvojení bipedie prvními homininy a běhu při vzniku moderních lidských porcí u *H. ergaster* nás nepřekvapí, že někteří badatelé studovali i význam efektivnosti chůze a běhu při rozmachu anatomicky

moderního člověka spojeného s vymizením všech ostatních zástupců rodu *Homo*. Nejslavnějšími homininy, jejichž vymizení bývá spojováno s rozšířením anatomicky moderního člověka, jsou nepochybně neandertálci (*H. neanderthalensis*). U nich máme díky množství fosilií poměrně dobrou představu o stavbě těla. Vedle rozdílů v proporcích končetin, zakřivení některých dlouhých kostí a odlišností na lebce měli neandertálci oproti anatomicky moderním lidem v průměru o 10 cm kratší dolní končetiny a o 8 kg vyšší tělesnou hmotnost.

Antropoložka Karen L. Steudel-Numbersová se svým výzkumným týmem z univerzity ve Wisconsinu (USA) se pokusila odhadnout, jak mohly rozdíly v délce dolní končetiny a hmotnosti těla ovlivnit účinnost pohybu neandertálců ve srovnání s anatomicky moderními lidmi. Proto nechala chodit dobrovolníky na běžecském pásu, přičemž jim pomocí analyzátoru dechových plynů měřila spotřebu energie. Zjistila, že vyšší tělesná hmotnost i kratší dolní končetiny jsou v jejím souboru spojeny s vyššími energetickými náklady na chůzi, a odhadla, že neandertálci by měli spotřebovat o 30 % více energie na překonání dané vzdálenosti než anatomicky moderní lidé (Steudel-Numbers a Tilkins 2004). Takový rozdíl v nákladech na chůzi by se projevil ve vyšší celkové spotřebě energie, následně i ve snížení množství energie, jež by neandertálcům zbývala na rozmnožování – a ve výsledku tak přispěl k jejich zániku.

Kromě tělesné hmotnosti a délky dolní končetiny však náklady na pohyb závisí i na dalších faktorech, mimo jiné na stavbě kloubů dolní končetiny, zjednodušeně na jejich mohutnosti. Robustní klouby poskytují svalům větší mechanickou výhodu a těm pak na potřebný efekt, např. udělaní jednoho kroku při chůzi či zvednutí se ze židle, stačí vyvinout menší sílu a tedy spotřebovat méně energie. Jelikož o neandertálcích víme, že měli velice robustní kolenní a hlezenní klouby (obr. 2), mimo jiné vlivem silné česky a dlouhé patní kosti, rozhodli jsme se podívat, zda a do jaké míry by jim mohly ušetřit energii při chůzi. Vyvinutím modelu dolní končetiny neandertálců a anatomicky moderních lidí z různých časových období a komplexní modelací nákladů na pohyb jsme dospěli k závěru, že efektivita chůze u neandertálců nebyla zdaleka tak nízká (Hora a Sládek 2014), jak jsme si původně mysleli. Jejich robustní koleno a dlouhá patní kost jim umožnily podstatnou část energie při chůzi ušetřit. Podle našich výsledků měli sice neandertálští muži náklady na chůzi vyšší než anatomicky moderní muži, nicméně pouze o 10 %, a vešli by se do rozpětí současných mužů. Pokud jste muž a vážíte přes 75 kg, stojí vás chůze s největší pravděpodobností více energie než průměrného neandertálce. Neandertálské ženy chůze stála v podstatě stejně jako průměrné dnešní ženy. Rozdíl mezi cenou chůze neandertálského a anatomicky moderního muže podle našich odhadů tvoří tak malou část celkového výdeje energie, že nemohl ovlivnit soupeření neandertálců s anatomicky moderními lidmi o zdroje potravy a životní prostor.



Přestože se tedy neandertálci náklady na chůzi příliš nelišili od moderních lidí, v běhu na tom byli zřejmě mnohem hůře. Dlouhá patní kost, jež jim šetřila energii při chůzi, podle antropologa Davida A. Raichlena z univerzity v Arizoně znamenala vyšší výdaje při běhu. Raichlen a jeho kolegové studovali spotřebu energie elitních dálkových běžců a dospěli ke zjištění, že čím delší má běžec patní kost, tím více námahy ho běh stojí. Delší patní kost totiž snižuje schopnost Achillovy šlachy ukládat a následně uvolňovat energii při každém kroku. Achillova šlacha funguje při běhu jako pružina, která doslova recykluje až polovinu energie potřebné na každý krok. Pokud je její recyklační schopnost nějakým způsobem omezena, např. delší patní kostí jako u neandertálců, přichází část energie nazmar a běh je náročnější. V poměrně chladné Evropě však zřejmě běh nehrál příliš důležitou roli a neandertálci proto nevyvířeli kvůli svým omezeným běžeckým schopnostem. Z důvodu nízké teploty totiž nelze využívat techniku stíhacího lovu – zvíře se nikdy nezahřeje tolik, aby nemohlo před lovcem dále utíkat. Neandertálci byli odkázáni na jiné taktiky lovu a během pravděpodobně trávili podstatně méně času než lovci v Africe. Podle našich současných znalostí proto



4 Srovnání odhadovaných nákladů na chůzi neandertálce a anatomicky moderního člověka z různých časových období a geografických oblastí. Výdaje na chůzi jsou vyjádřeny v objemu kyslíku spotřebovaného na překonání 1 m vzdálenosti (1 ml kyslíku odpovídá spotřebě 0,00483 kcal energie). Spotřeba kyslíku nebyla měřena přímo, ale odhadnuta pomocí biomechanického modelu založeného na znalosti stavby dolní končetiny a velikosti těla, a testovaného na nejrůznějších žijících zvířatech od krocana až po člověka. Neandertálští muži měli o 10 % vyšší výdaje než anatomicky moderní muži, zatímco u neandertálských a anatomicky moderních žen byly výdaje srovnatelné. Porovnání zahrnuje anatomicky moderní lidi žijící před ca 80–110 tisíci let v oblasti dnešního Izraele (AMČ Levanta), anatomicky moderní lidi žijící před 18–30 tisíci let v Evropě (AMČ Evropa) a nedávné obyvatele střední Evropy. Horizontální šedá linie znázorňuje průměrnou hodnotu a světle modrá plocha rozsah, do kterého spadá 95 % recentních mužů nebo žen. V grafu dále vidíme, že muže stojí chůze více energie než ženy, což je způsobeno především vyšší hmotností mužského těla. Podle: M. Hora a V. Sládek (2014)

5 Šimpanz má při chůzi po dvou neustále mírně pokrčené (flexované) končetiny v kyčelním a kolenním kloubu, což je důsledek odlišného tvaru pánve. Tento příkrčený způsob bipedie je nákladnější než bipedie člověka, jež je schopna plného natažení končetin v obou zmíněných kloubech. Foto V. Černá

nehrála účinnost lokomoce, ať už chůze nebo běhu, v zániku neandertálců významnější roli.

Závěr

Jak jsme v tomto textu pokusili naznačit, nutnost pohybovat se efektivně ovlivňovala podobu člověka po celou jeho evoluční historii. Přestavba pánve nejprve vedla u prvních hominidů k efektivní chůzi po dvou, prodloužení dolních končetin, ztráta srsti a další úpravy pak umožnily zástupcům rodu *Homo* dobře běhat a dostávat se tak k masité potravě. Úzký vztah mezi pohybovými potřebami a stavbou těla je však patrný i mnohem později v evoluci člověka, např. u neandertálců. Jelikož ti nepotřebovali ke své obživě překonávat dlouhé vzdálenosti během, mohli si dovolit robustní klouby a díky tomu s nízkými nároky na energii chodit. Současné technologie nám umožňují získávat obživu v podstatě bez pohybu, v sedě se přepravujeme do zaměstnání, v sedě pracujeme i odpočíváme. K získání dostatku kalorií k nasycení a rozmnožování dnes nemusíme být schopnými chodci ani běžci, což se projevuje např. poklesem robustnosti kloubů a nárůstem výskytu nadváhy. Pohyb tak i dnes, vedle dalších mechanismů, jako je např. pohlavní výběr, ovlivňuje podobu naší dolní končetiny a celého těla a nemáme důvod se domnívat, že tomu bude jinak.

Seznam použité literatury najdete na webových stránkách Živy.