



Fakulta
tělesné kultury

ŠKOLA DIAGNOSTIKY

Biomechanika běhu

Lucia Bizovská

Miroslav Janura

Jan Urbaczka

Zdeněk Svoboda

Tomáš Klein

Olomouc 2023

Tento studijní materiál vznikl za podpory projektu s názvem Digitalizácia a inovácia vzdelávania v diagnostike pohybového systému (č. p. 304011AYX7).



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Základní terminologie

Definice

Běh je pohybová aktivita, která se těší velké oblibě u rekreačních sportovců. Umožňuje nám **přesun z místa na místo s cílem pohybovat se co nejrychleji nebo na co nejděší vzdálenost**. Podobně jako chůze má charakteristické rysy, díky kterým je možné ho jednoduše odlišit od jiných aktivit. Můžeme ho definovat jako **komplexní a koordinovaný způsob pohybu těla z jednoho místa na druhé za střídané a opakující se výměny polohy dolních končetin**. Oproti chůzi dochází k potlačení obou fází dvojí opory ve prospěch **dvou letových fází**, tj. fází, během kterých nedochází k žádnému kontaktu nohou s podložkou.

Běžecý cyklus

Běžecý cyklus, tj. základní jednotku, která se v rámci běhu cyklicky opakuje, můžeme definovat obdobně jako u chůze. Začíná kontaktem části jednoho chodidla s podložkou a končí dalším kontaktem stejného chodidla.

Terminologie jednotlivých fází běžecého cyklu se mezi autory značně liší. Pro jednotnost proto budeme zachovávat terminologii obdobnou jako u chůzového cyklu¹. V běžecém cyklu rozpoznáváme **stojnou fázi**, tj. dobu, během které je noha v kontaktu s podložkou, a **švihovou (bezoporovou) fázi**. Poměr stojné a švihové fáze v průběhu běžecého cyklu je přibližně 35–40 ku 65–60 %. Se zvyšující se rychlostí dochází k prodloužení švihové a ke zkrácení stojné fáze.

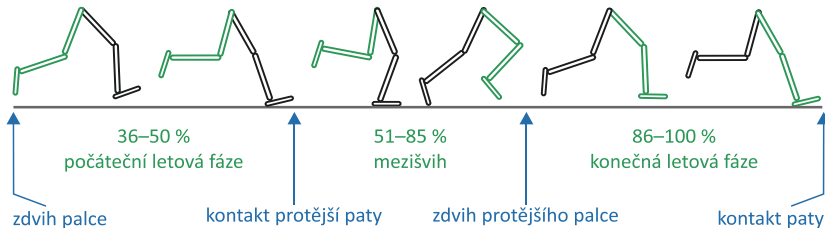
Stojnou fázi běžecého cyklu (obr. 1) je možné detailněji rozdělit na menší části – postupné zatěžování, mezistoj a konečný stoj. Během stojné fáze je hlavním úkolem dolních končetin **absorpce nárazu**, s nástupem konečného stoje dochází k **aktivnímu odrazu**.

¹ Viz studijní materiál Biomechanika chůze



Obr. 1 Schematické znázornění polohy segmentů dolních končetin ve stejné fázi běžeckého cyklu při počátečním kontaktu realizovaném zadonožím (zelená končetina).

Po stejné fázi následuje první část švihové fáze (obr. 2) nazývaná jako **počáteční letová fáze**. Tato končí dotykem kontralaterální končetiny s podložkou, po kterém nastává **mezišvih**. Po ukončení kontaktu kontralaterální končetiny s podložkou následuje závěrečná část švihové fáze – **konečná letová fáze**, která trvá až do opětovného počátečního kontaktu končetiny s podložkou.

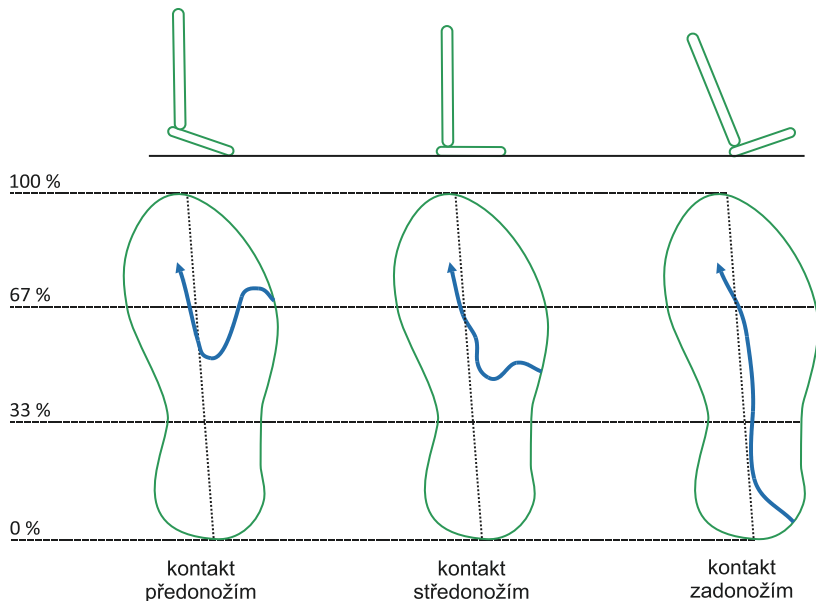


Obr. 2 Schematické znázornění polohy segmentů dolních končetin ve švihové fázi běžeckého cyklu při počátečním kontaktu realizovaném zadonožím (zelená končetina).

Dynamika běhu

U běhu zdravého dospělého člověka rozlišujeme tři **typy počátečního kontaktu nohy s podložkou** – kontakt **předonožím**, **středonožím** a **zadonožím** (patou). Toto rozdělení je možné určit na základě měření

vzdálenosti působíště reakční síly podložky (COP, *centre of pressure*) v okamžiku kontaktu chodidla s podložkou od zadní hrany paty. Tzv. *strike index* je definován jako poloha COP při kontaktu chodidla s podložkou vzhledem k podélné ose chodidla od paty k palci (obr. 3).



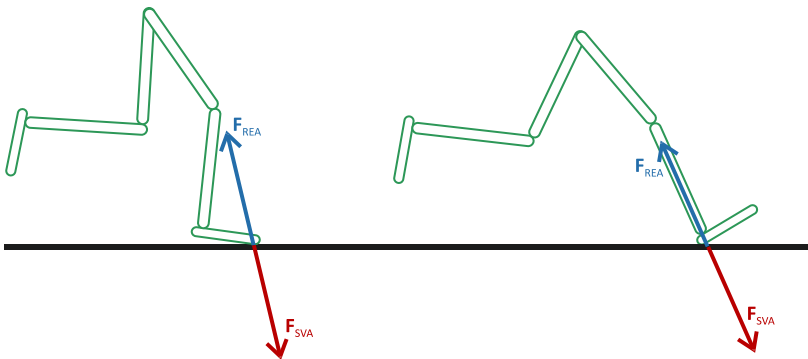
Obr. 3 Schematické znázornění trajektorie pohybu COP (modrá linie) během stojné fáze běžeckého cyklu vzhledem k velikosti *strike indexu* (hodnoty vlevo v procentech délky osy chodila) pro různé typy počátečního kontaktu. Upraveno podle Altman a Davis (2012) a Hoening et al. (2020).

Kontakt v oblasti předonoží je pozorován u běžců, u kterých *strike index* dosahuje hodnot v rozmezí 68–100 %, kontakt středonožím při hodnotách 34–67 % a kontakt zadonožím při hodnotách *strike indexu* v rozmezí 0–33 %.

Definice typu kontaktu na základě velikosti *strike indexu* je jen jednou z mnoha dostupných možností. Další možností je například dělení dle velikosti úhlu mezi osou nohy (spojnicí calcanea a hlavičky pátého metatarzu) a podložkou, tzv. *footstrike angle*. Na rozdíl od uvedeného dělení popisují některé zdroje pouze dva typy kontaktu – předonožím a zadonožím, přičemž v tomto dělení kontakt předonožím zahrnuje i kontakt středonožím.

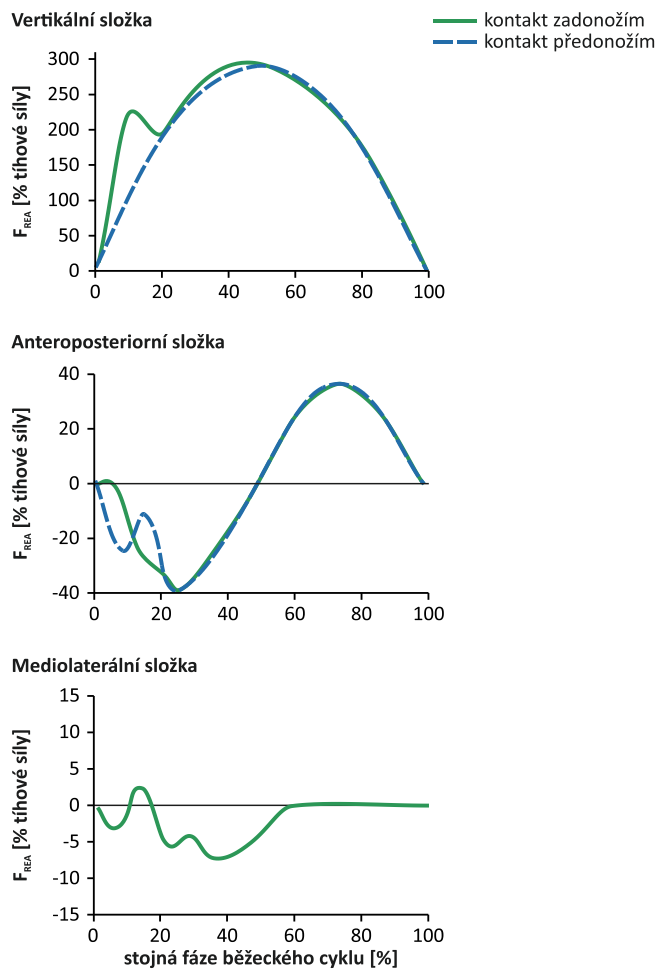
Typ kontaktu nohou s podložkou má zásadní vliv na kinematické a dynamické parametry běhu. Kontakt předonožím je typický pro krátké rychlé běhy, kontakt zadonožím pro běhy probíhající po delší dobu. Toto rozdělení však neplatí obecně, neboť existují značné rozdíly v individuální preferenci. Kontakt zadonožím se v současnosti stále považuje za nejvíce preferovaný, i když je na základě informací od trenérů nejméně doporučovaný. Dosud jsme však nenalezli studii, která by jednoznačně dokazovala, že došlap přes patu je méně výhodný než došlap přes středonoží nebo předonoží.

Zatížení pohybového aparátu je s ohledem na typ počátečního kontaktu rozdílné. Běžec působí na podložku svalovou silou F_{SVA} , ke které podle Newtonova zákona akce a reakce vzniká stejně velká opačně orientovaná reakční síla podložky F_{REA} působící na běžce (obr. 4). V případě kontaktu předonožím jsou pro absorpci energie při kontaktu s podložkou využívány svaly a šlachy dorzální strany bérce, především m. triceps surae a Achillova šlacha. Při jejich nadměrném zatěžování může docházet ke vzniku zdravotních komplikací, přičemž zánět Achillovy šlachy je jedním z nejčastějších běžeckých zranění. Při kontaktu zadonožím dochází ke změně orientace reakční síly podložky, což znamená zvýšené zatížení především kolenního, ale i kyčelního kloubu. U běžců preferujících tento typ kontaktu existuje vyšší riziko vzniku zdravotních indispozic a bolesti v oblasti kolenního kloubu. Je důležité si uvědomit, že způsob kontaktu může běžec v rámci jedné běžecské sekvence měnit, např. sportovec začne kontaktem předonožím, s nastupující únavou však přejde na kontakt zadonožím.



Obr. 4 Orientace svalové síly F_{SVA} a reakční síly podložky F_{REA} při počátečním kontaktu realizovaném předonožím (vlevo) a zadonožím (vpravo)

Reakční síla podložky (obr. 5) dosahuje ve vertikálním směru jediné maximum přibližně ve středu stojné fáze. Toto maximum nabývá hodnoty několika násobků tíhové síly působící na běžce. V závislosti na typu počátečního kontaktu může být v průběhu fáze postupného zatěžování viditelné další ostré maximum, které má však výrazně nižší amplitudu. Anteroposteriorní složka reakční síly podložky má průběh obdobný jako u chůze a vyznačuje se dvěma funkčními fázemi – decelerační a akcelerační. Tyto fáze souvisí s ději, které probíhají v první a druhé polovině stojné fáze, tj. absorpce nárazu = decelerace, a aktivní odraz = akcelerace. Někteří autoři proto ani terminologicky nedělí stojnou fázi na tři výše zmíněné části a rozlišují přímo akcelerační a decelerační část stojné fáze. Přechodový bod mezi těmito fázemi pozorovaný jako nulová hodnota síly nastává ve stejném okamžiku jako maximum vertikální složky reakční síly podložky. Mediolaterální složka reakční síly je podobně jako u chůze velmi variabilní, její možný průběh je zobrazený na obr. 5.



Obr. 5 Průběh reakční síly podložky F_{REA} během stojné fáze běžeckého cyklu. Upraveno podle van Oeveren et al. (2021) a Dicharry (2010).

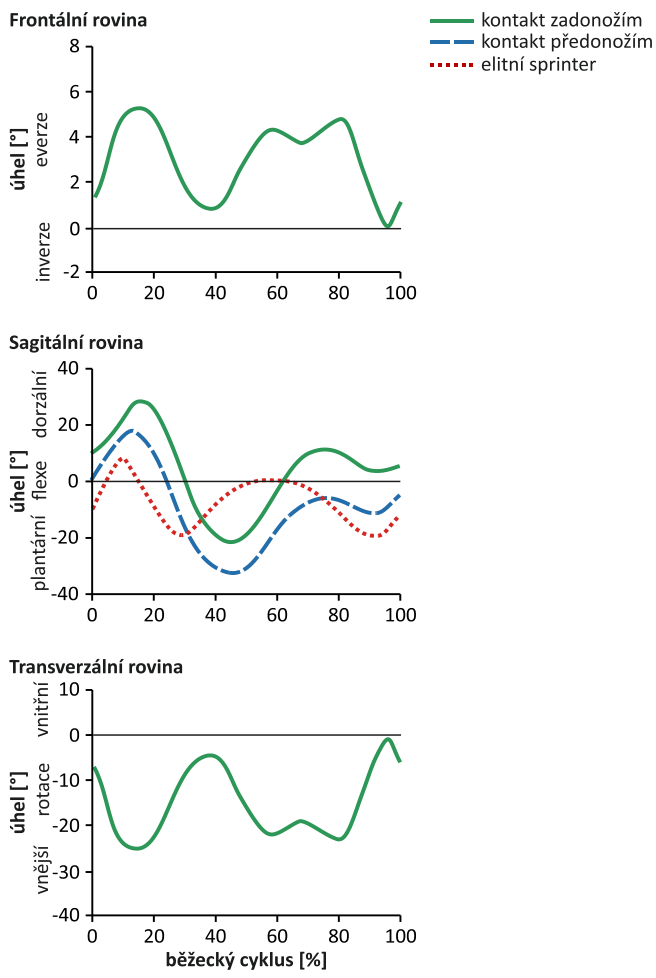
Kinematika kloubů dolních končetin

Hlezenní kloub

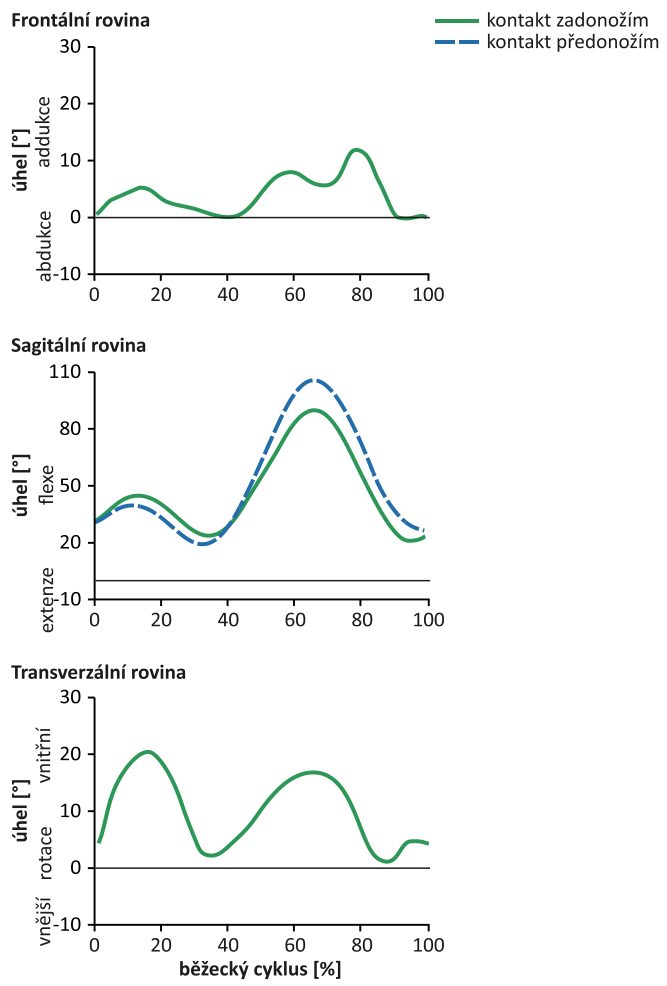
Kinematika hlezenního kloubu (obr. 6) je v sagitální rovině nejvíce ovlivněna typem kontaktu nohy s podložkou. Při počátečním kontaktu zadonožím je hlezenní kloub v sagitální rovině v neutrální poloze, přibližně v polovině stojné fáze nastává maximální dorzální flexe. Ve druhé polovině stojné fáze přechází hlezenní kloub do plantární flexe, která pokračuje i v počáteční letové fázi. Maximum plantární flexe nastává přibližně v polovině běžeckého cyklu. Ve fázi mezišvihů nastává druhé maximum dorzální flexe. V dorzální flexi hlezenní kloub setrvává až do konce běžeckého cyklu. Při počátečním kontaktu předonožím je hlezenní kloub v dorzální flexi. Maximum dorzální flexe nastává ve stojné fáze dříve a jeho velikost je nižší než při počátečním kontaktu realizovaném zadonožím. V mezišvihů zůstává hlezenní kloub v mírné plantární flexi a v pozdní letové fázi se vrací do neutrální polohy až mírné dorzální flexe. U elitních sprinterů je hlezenní kloub během počátečního kontaktu v plantární flexi, ve které setrvává po většinu běžeckého cyklu. V dalších rovinách není pohyb hlezenního kloubu výrazný, ve frontální rovině s rozsahem do 10° a v transverzální rovině kolem 20° .

Kolenní kloub

Pohyb v kolenním kloubu (obr. 7) je v sagitální rovině charakterizován dvojí flexí. Během počátečního kontaktu se velikost flexe pohybuje kolem 30° . První maximum flexe o velikosti přibližně 45° nastává v polovině stojné fáze, po které koleno přechází do mírné extenze končící před přechodem do švihové fáze. Druhé maximum flexe nastává kolem 70 % běžeckého cyklu a jeho velikost se v závislosti na rychlosti běhu může pohybovat mezi 85° a 130° , s vyššími hodnotami flexe dosaženými při vyšší rychlosti běhu. Ve frontální a transverzální rovině je rozsah pohybu pouze do 20° .



Obr. 6 Kinematika hlezenního kloubu v průběhu běžeckého cyklu.
 Upraveno podle Novacheck (1998) a Dicharry (2010).



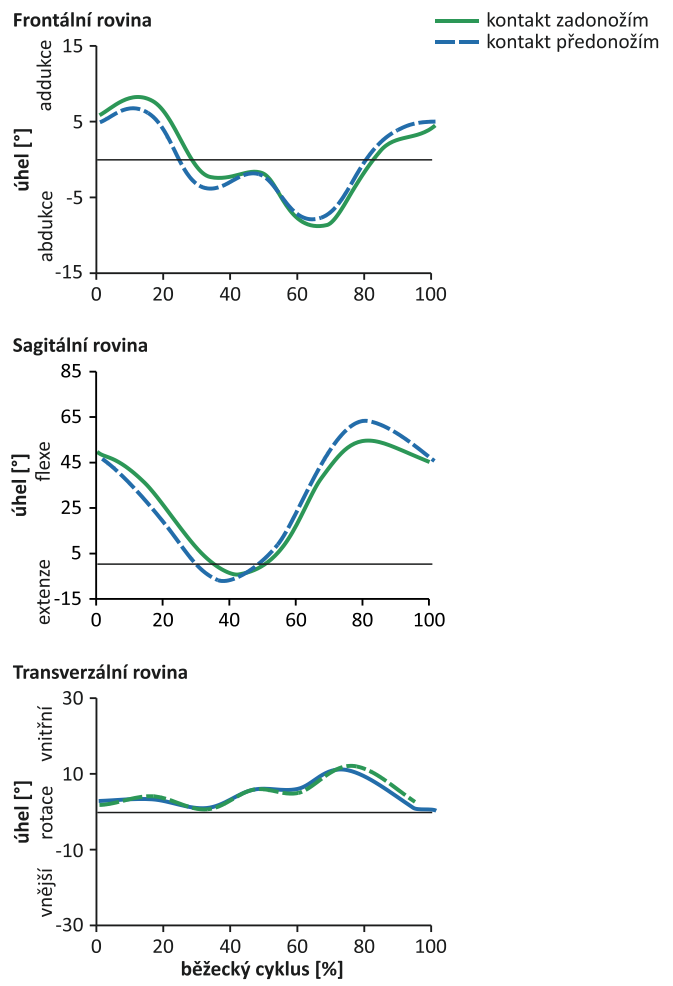
Obr. 7 Kinematika kolenního kloubu v průběhu běžecského cyklu.
Upraveno podle Novacheck (1998) a Dicharry (2010).

Kyčelní kloub

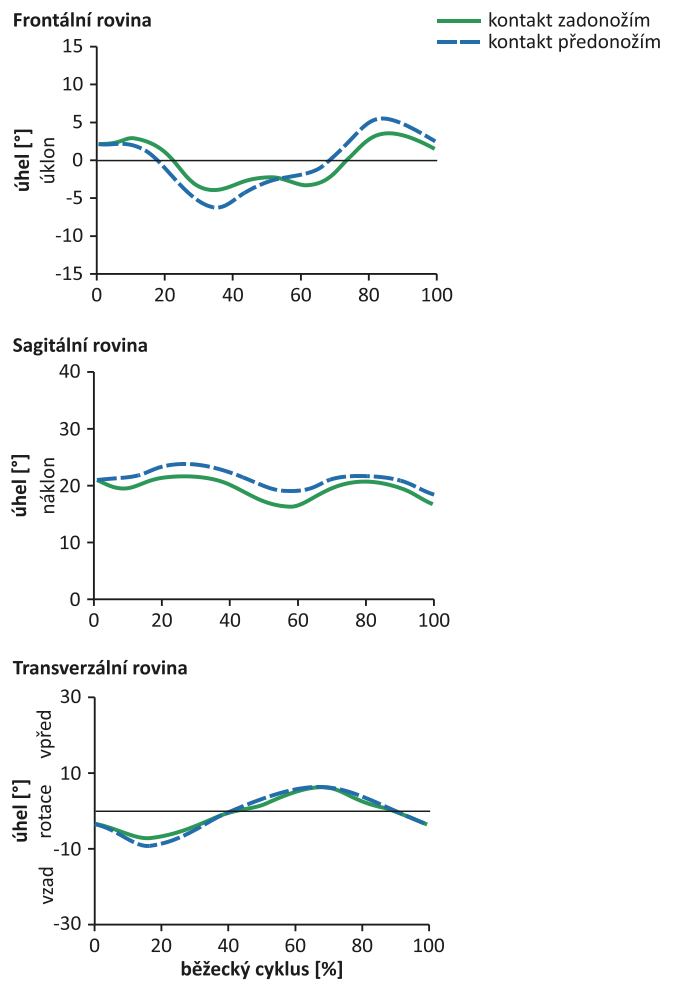
Pohyb v kyčelním kloubu (obr. 8) je v sagitální rovině obdobný jako u chůze. V okamžiku počátečního kontaktu se kyčelní kloub nachází ve flexi, během stojné fáze postupně přechází do extenze, jejíž maximum dosahuje na konci stojné fáze běžeckého cyklu. Ve švihové fázi opět postupně přechází do flexe s dosažením flekčního maxima kolem 80 % běžeckého cyklu. Na konci švihové fáze se mírnou extenzí kyčle končetina připravuje na kontakt nohy s podložkou. Pohyb v kyčelním kloubu ve frontální rovině reflektuje pohyb pánve. Ve stojné fázi běžeckého cyklu se kyčel nachází v addukci, ve švihové přechází do abdukce, ze které se vrací do addukce v konečné letové fázi. V transversální rovině je kyčelní kloub po celou dobu běžeckého cyklu ve vnitřní rotaci s mírným nárůstem a dosažením maximální hodnoty během švihové fáze.

Pánev

Pánev (obr. 9) se v sagitální rovině nachází po celou dobu trvání běžeckého cyklu v antevertzi a její pohyb je v této rovině pro úsporu energie minimalizován. Totéž platí i pro pohyb ve frontální rovině, ve které je možné pozorovat rozsah pohybu pouze kolem 10°. Pánev se na začátku běžeckého cyklu nachází v této rovině v mírném úklonu směrem ke kontralaterální končetině, resp. v neutrální poloze. Ve druhé polovině stojné fáze nastává pokles pánve směrem ke stojné dolní končetině, s maximem na konci stojné fáze. Během švihové fáze se pánev zdvíhá s končetinou, aby mohl být zabezpečen bezpečný přesun nohy nad podložkou. V průběhu konečné letové fáze se pánev opětovně vrací do neutrální pozice. Pohyb pánve a kyčle ve frontální rovině minimalizuje pohyb horní části těla. Díky tomu je dosažena stabilita horní části těla v průběhu celého běžeckého cyklu. V transversální rovině je průběh pohybu pánve podobný sinusoidě. Během počátečního kontaktu a celé stojné fáze se pánev nachází v rotaci vzad, ve švihové fázi dochází k rotaci vpřed, s maximem dosaženým v mezišvihů kvůli zabezpečení co největší délky kroku.



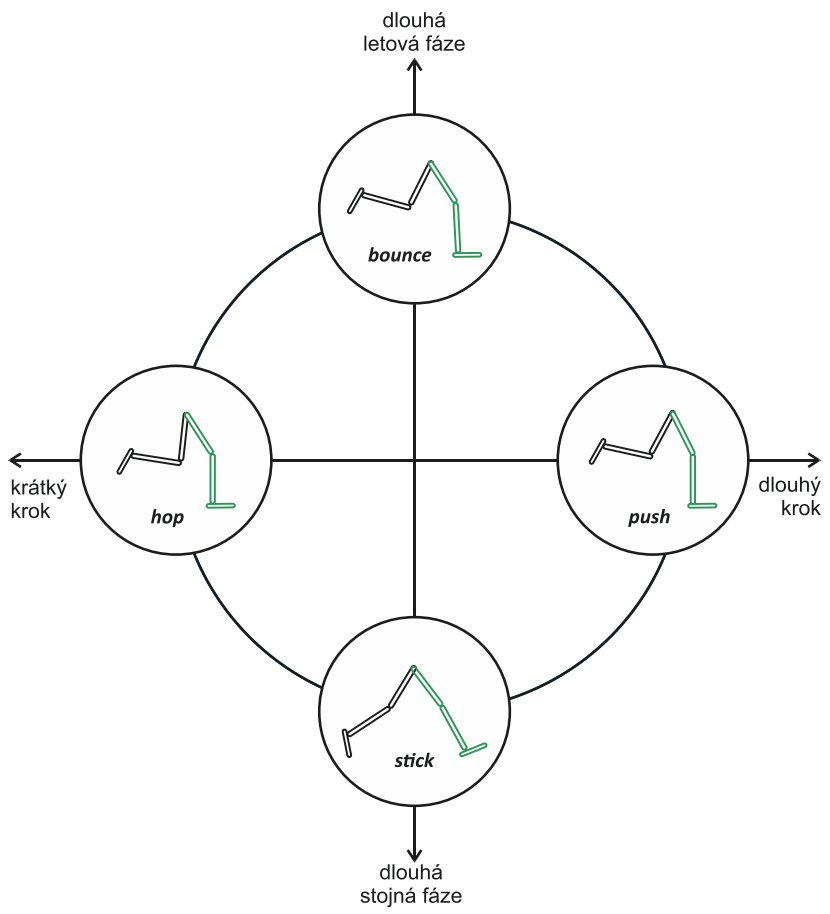
Obr. 8 Kinematika kyčelního kloubu v průběhu běžecského cyklu.
Upraveno podle Novacheck (1998) a Dicharry (2010).



Obr. 9 Kinematika pánve v průběhu běžeckého cyklu. Upraveno podle Novacheck (1998) a Dicharry (2010).

Běžecské styly

S ohledem na potřebu rychlého přesunu těžiště lidského těla (COM, *centre of mass*) jako základního požadavku běhu, je pohyb COM určujícím faktorem na rozlišení několika běžecských stylů. Pohyb COM je v sagitální rovině charakterizován pomocí sinusiody s minimální výškou nad podložkou v průběhu stojné fáze běžecského cyklu, nejvyšší polohy je dosaženo během švihové fáze. Dosažení určité rychlosti běhu souvisí se dvěma časoprostorovými charakteristikami – délkou kroku a délkou trvání letové fáze. Na základě jejich velikosti je možné uvažovat o celkem čtyřech charakteristických běžecských stylech (obr. 10). Tyto běžecské styly se vyznačují značnými rozdíly v kinematických i dynamických charakteristikách a na první pohled je možné nalézt rozdílné nastavení polohy jednotlivých segmentů končetin a trupu vůči sobě. Rozsah pohybu COM ve vertikálním směru v průběhu běžecského cyklu je u stylu „stick“ nejmenší, postupně se zvyšuje u stylů „hop“ a „push“ s nejvyšším rozsahem pozorovaným u stylu „bounce“.

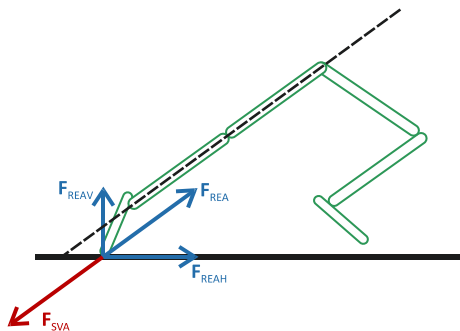


Obr. 10 Ilustrační zobrazení čtyř charakteristických běžeckých stylů.
Upraveno podle van Oeveren et al. (2021).

Sprint

V atletice se s ohledem na účel běžecké sekvence a z toho plynoucího nastavení segmentů celého těla rozlišují dva způsoby běhu – šlapavý a švihový. Z hlediska kinematiky a dynamiky pohybu jde o velmi rozdílné způsoby provedení, které je společně možné pozorovat například v průběhu sprintu. Cílem sprintera je v co nejkratším čase urazit definovanou vzdálenost, tzn. dosáhnout co nejvyšší rychlosti pohybu. Sprint je jako pohybová sekvence specifický kvůli přítomnosti dvou fází – akcelerační a udržovací. V **první fázi**, tzv. **akcelerační**, je cílem sprintera zrychlit z klidu na **nejvyšší rychlost v co nejkratším čase**. V této fázi se uplatňuje šlapavý způsob běhu.

Z pohledu biomechaniky sprinter vyvine šikmo dolů vzad svalovou sílu F_{SVA} do podložky (startovního bloku), reakční síla podložky F_{REA} má směr šikmo nahoru vpřed (obr. 11). Vektor reakční síly je možné rozložit na horizontální a vertikální složku.



Obr. 11 Orientace svalové síly F_{SVA} a reakční síly podložky F_{REA} během akcelerační fáze běžeckého cyklu. Přerušovaná linie zobrazuje osu trupu a odrazové dolní končetiny. Přitom platí, že osa trupu, bérce a stehna odrazové končetiny je rovnoběžná s osou bérce švihové dolní končetiny.

Horizontální složka reakční síly udává běžci jeho dopředné zrychlení. V průběhu akcelerační fáze sprintu je proto žádoucí maximalizovat horizontální složku reakční síly, což se děje náklonem celého těla směrem vpřed.

Je však nutné si uvědomit, že nedostatečná velikost vertikální složky reakční síly by mohla mít za následek zakopnutí a pád. Potenciálnímu pádu sprinter předchází přesunem dolních končetin těsně nad podložkou, což znamená, že jsou realizovány rychlé změny polohy končetin vzhledem k opěrné bázi, díky kterým je možné udržovat COM bezpečně nad opěrnou bází². Po dosažení maximální rychlosti pohybu nastává **druhá fáze sprintu**, tzv. **udržovací fáze**. V této fázi dochází k úpravě nastavení polohy jednotlivých segmentů těla a jeho napřímení tak, aby bylo možné dosáhnout **co největší délku kroku**. **V této fázi se uplatňuje švihový způsob běhu**. Kinematické a dynamické parametry běhu v průběhu udržovací fáze odpovídají charakteristikám popsaným v předešlých kapitolách pro počáteční kontakt chodidla s podložkou realizovaný předonožím.

² Pro detailní vysvětlení viz studijní materiál Posturální stabilita

Kontrolní otázky a úkoly

1. Vysvětlete základní rozdíl mezi chůzí a během.
2. Definujte běžecký cyklus a popište jeho fáze.
3. Popište možnosti dělení typu počátečního kontaktu nohy s podložkou.
4. Který kloub a ve které rovině je z hlediska kinematiky nejvíce ovlivněn typem počátečního kontaktu nohy s podložkou?
5. Jaký má vliv typ počátečního kontaktu nohy s podložkou na zatížení pohybového aparátu běžce?
6. Vysvětlete, jak je průběh reakční síly podložky ovlivněn typem počátečního kontaktu nohy s podložkou.
7. Jaké fáze pohybu rozeznáváme ve sprintu a co je jejich cílem?

Literatura

- Altman, A. R., & Davis, I. S. (2012). A kinematic method for footstrike pattern detection in barefoot and shod runners. *Gait and Posture*, 35(2), 298–300. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.09.104>
- Dicharry, J. (2010). Kinematics and kinetics of gait: From lab to clinic. *Clinics in Sports Medicine*, 29(3), 347–364. <https://doi.org/10.1016/j.csm.2010.03.013>
- Hoening, T., Rolvien, T., & Hollander, K. (2020). Footstrike patterns in runners: Concepts, classifications, techniques, and implications for running-related injuries. *German Journal of Sports Medicine*, 71(3), 55–61. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2020.424>
- Novacheck, T. F. (1998). The biomechanics of running. *Gait and Posture*, 7(1), 77–95. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(97\)00038-6](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(97)00038-6)
- van Oeveren, B. T., de Ruyter, C. J., Beek, P. J., & van Dieën, J. H. (2021). The biomechanics of running and running styles: A synthesis. *Sports Biomechanics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1873411>