Fyzika a sport*

LEOPOLD MATHELITSCH

Karl-Franzens-Universität Graz, Rakousko

Úvod

Začněme výčtem několika důvodů, proč by téma sport mohlo/mělo být zařazeno do výuky na různých typech škol včetně univerzity.

První z nich je **mezioborovost**. Myslím si, že neexistuje na celém světě jediný vzdělávací program, který by neměl ve svém obsahu zařazen **mezipředmětové vztahy**. V nejjednodušším případě se jedná alespoň o propojení dvou předmětů v rámci jednoho tématu. Fyzika a sport mohou být dobrým příkladem tohoto přístupu. Důvodem je také to, že v některých případech výuka fyziky probíhá na bazéně a učitel fyziky nesmí sám vykonávat dozor při této výuce.

Motivace: Pokud se žáků zeptáme, který předmět je u nich oblíbený a který méně, leží sport na jedné straně vah a fyzika na straně opačné. Proč tedy nevyužít sport jako motivaci ve výuce fyziky.

Aktivita: Nejvíce atraktivní je ve sportu aktivita. Mládež chce být aktivní, pohybovat se, běhat. Příležitostí k takovýmto aktivitám je během výuky fyziky velmi málo. Nejvíce aktivní jsou žáci během experimentů. Ve výuce lze realizovat sportovní aktivity ve formě experimentů s vlastním tělem a provádět příslušná měření.

Modelování: Modelování je důležité ve všech přírodních vědách. Ve fyzice pracujeme vždy s modely, ale žáci prezentovanou látku takto nevnímají. Sportovní aktivity, pokud uvažujeme také lidské tělo, jsou velmi komplexní. Chceme-li je popsat a vysvětlit, musíme pracovat se zjednodušením, s více či méně sofistikovanými modely. Práce s takovými příklady žákům umožní pochopit, proč je důležité používat modely.

Multimédia: Pro žáky je jednoduchá pořídit videozáznamy sportovních aktivit na svých mobilních zařízeních. Mobilní telefon je experimentální zařízení, které umožňuje měřit např. zrychlení. Různé aplikace umožňují graficky zobrazit naměřená data a provést jejich analýzu.

---

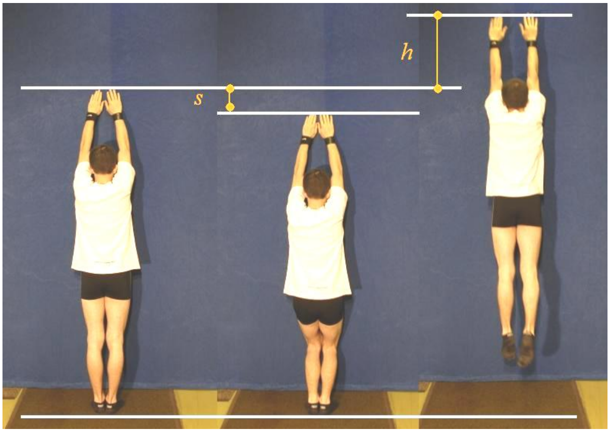
* Z originálu příspěvku Physics and Sport přeložila Renata Holubová.

Dále ukážu různé příklady využití mezipředmětových vztahů mezi sportem a fyzikou. Jedná se o skok vysoký, optimální úhel pro vrh míče, popř. koule a rekordy.

Skok vysoký

Položíme-li si otázku, které parametry ovlivní výšku skoku, dostaneme různé odpovědi – podle toho, koho se zeptáme. Dítě odpoví, že je to výška, kam dosáhne rukou. Fyzik bude přemýšlet o těžišti. A ve sportu bude atlet mít za cíl přeskočit např. laťku.

Uvažujme nejprve spojení odpovědí dítěte a fyzika. Přímo ve třídě můžeme realizovat jednoduché měření síly našich nohou.



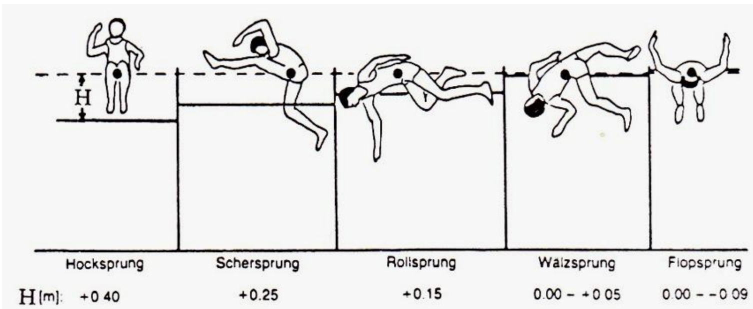
Obr. 1 Stanovení síly nohou při skoku do výšky
(L. Mathelitsch, S. Thaller, Sport und Physik, Aulis Verlag, Köln, 2008.)

Žák o hmotnosti m stojí proti stěně a udělá značku tam, kam dosáhnou konečky jeho prstů u natažených rukou (obr. 1). Potom pokrčí kolena, opět udělá značku a vyskočí co nejvýše, aby opět udělal značku. Nyní máme tři hodnoty, tzn. dva rozdíly – pokles (pokrčení) s a výšku výskoku h, a můžeme vypočítat hledanou sílu. Síla F_L působí po dráze s, energie se spotřebuje na změnu polohy těla z nejnižší po nejvyšší polohu, tzn. na vzdálenosti $s + h$. Odtud lze vyjádřit sílu nohou ve tvaru

$$F_L = \frac{s+h}{s} mg \,. \qquad (1)$$

Žáci při provádění tohoto experimentu mohou vidět, že není jednoduché stanovit správně parametr *s*. Jak hluboko máme skrčit kolena? Pokud hloubka není dostatečná nebo je naopak příliš velká, výška skoku bude malá. Jako první musí žáci stanovit optimální pokrčení kolen.

Pojďme nyní spojit fyziku a sport. Obr. 2 ukazuje historický vývoj různých technik skoku vysokého. Z fyzikálního hlediska je cílem zmenšení výšky těžiště skokana nad laťkou. Tato hodnota je uvedena v posledním řádku na obr. 2. Lze vidět, že hodnota je záporná pro flop (Fosbury). Jak je to možné? Těžiště může ležet mimo tělo a koordinací pohybu horní a dolní části těla se těžiště dostane nad laťku, přičemž tělo skokana se laťky nedotkne.



Obr. 2 Různé techniky skoku do výšky, postupně skrčka, nůžky, valivý bočný (*horine*), obkročný (*straddle*), flop. Poslední řádek udává vzdálenost těžiště a laťky. (K. Willimczig, Biomechanik der Sportarten, Rowohlt, Hamburg, 1989.)

Je otázkou, zda by mohla existovat ještě lepší technika skoku, kdy by (záporný) rozdíl měl větší hodnotu. Byl by to způsob “břicho dolů”, protože tento způsob ohybu je mnohem snazší a těžiště leží ještě dál mimo tělo. Atleti tuto techniku nepoužívají. Pro skok vysoký je třeba rozběh. Při flopu Fosbury lze dosáhnout hladkého přechodu z běhu do skoku. Při technice “břicho dolů” by tento způsob skoku byl méně efektivní. Existuje ale jeden druh sportu, kde je tato technika používána – skok o tyči. Zde jsou běh a skok oddělené a atlet skáče břichem dolů.

Uvažujme nyní skok na Měsíci. Jak vysoko lze vyskočit na Měsíci? Pokusíme se odpovědět na tuto otázku pomocí tří různých modelů.

Stejná rychlost znamená, že skok na Zemi i na Měsíci je realizován stejnou počáteční rychlostí *v*. Zákon zachování energie, jinými slovy přeměna kinetické energie na potenciální

$$\frac{mv^2}{2} = mgh \tag{2}$$

vede ke vztahu

$$h = \frac{v^2}{2g}. \tag{3}$$

Pokud víme, že gravitační zrychlení na Zemi je šestkrát větší než na Měsíci, dostaneme výsledek, že skok na Měsíci musí být šestkrát vyšší než na Zemi.

Stejná síla. Proč by měla být počáteční rychlost stejná? Předpokládejme, že síla nohou se během cesty na Měsíc nezmění. Nechť F_{L} je síla nohou. Potom síla F_1 udělující tělu zrychlení a je dána rovnicí

$$ma = F_{\mathrm{L}} - mg = F_1 . \tag{4}$$

Předpokládáme-li, že $F_{\mathrm{L}} = 2mg$ (můžeme si posadit na ramena druhou osobu), síla na Zemi je odlišná od síly na Měsíci

$$F_{1\,(\mathrm{Země})} = mg \qquad F_{1\,(\mathrm{Měsíc})} = \frac{11}{6} mg . \tag{5}$$

Odtud plyne, že velikosti rychlostí před skokem jsou různé na Zemi a na Měsíci

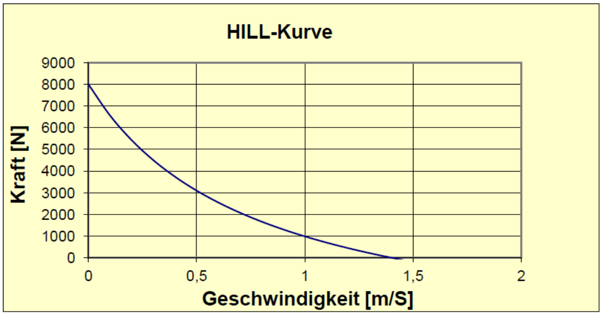
$$v_{\mathrm{Měsíc}} = \sqrt{\frac{11}{6}} \cdot v_{\mathrm{Země}} . \tag{6}$$

Dosadíme-li tento vztah do rovnice (3), dostaneme zcela odlišný výsledek – skok na Měsíci je 11krát vyšší než na Zemi. Který z obou modelů je správný?

Dynamický model. Položíme tuto otázku odborníkům, kteří se věnují dynamickému modelování. Důležitou součástí biologického pohybu jsou svaly. Svaly nepracují jako pružina nebo guma. Nesplňují zákony analogické Hookeovu zákonu, ale řídí se odlišným zákonem, který pro vyjádření síly svalu zapíšeme ve tvaru

$$f = \frac{c}{v + b} - a . \tag{7}$$

Síla svalu f je nepřímo úměrná jeho rychlosti v (a, b, c jsou konstanty závislé na svalu a dané osobě). Čím pomaleji sval pracuje, tím větší sílu sval vyvine. Na obr. 3 je tato závislost zobrazena ve tvaru tzv. Hillovy křivky.



Obr. 3 Vztah mezi rychlostí a silou svalu, tzv. Hillova křivka
(L. Mathelitsch, S. Thaller, Sport und Physik, Aulis Verlag, Köln, 2008.)

Dosadíme-li vztah (7) do pohybové rovnice spolu s výrazy pro aktivaci svalů a geometrie těla, dostaneme následující výsledek – skok na Měsíci bude 10,5krát vyšší než na Zemi. Tzn., že druhý model byl mnohem přesnější.

Proč nebyly skoky lidí, kteří přistáli na Měsíci, tak vysoké? Astronauti byli oblečeni do skafandrů. Stěží mohli pohybovat končetinami a ohýbat kolena. A také se báli, aby neupadli a nepoškodili si skafandr.

Optimální úhel vrhu

Existuje řada sportovních disciplín, kdy je vrháno sportovní náčiní, např. míč nebo disk. Někdy se snažíme dohodit co nejdále, někdy se potřebujeme strefit do nějakého terče.

Každý fyzik ví, že pro dosažení maximální délky vrhu, je třeba zvolit počáteční úhel vrhu roven 45 stupňům.

Délka vrhu je dána vztahem

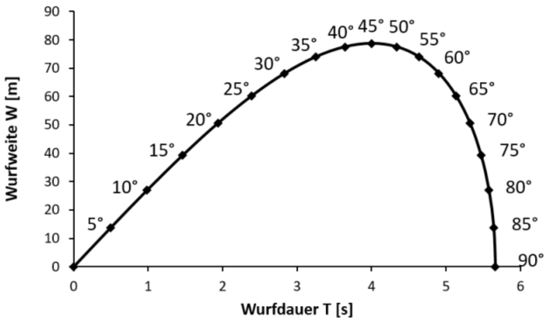
$$W = \frac{v^2}{g} \cdot \sin(2\alpha), \qquad (8)$$

kde v je počáteční rychlost a α je počáteční úhel vrhu. Pro maximální hodnotu W je třeba volit α = 45°. Zajímavé je, že tento úhel není využíván v žádném sportovním odvětví. Následující příklady ukážou, proč tomu tak je.

Americký fotbal. Při výkopu nebo přechodu z útoku do obrany je míč vykopnut do co možná největší vzdálenosti. Je tu ale ještě jiný požadavek. Členové vlastního týmu běží ve stejném směru jako letící míč a chtějí doběhnout co nejdále. Uražená vzdálenost závisí na tom, jak dlouho je míč ve vzduchu. Odpovídající čas T je dán vztahem

$$T = \frac{2v}{g}\sin\alpha \,. \tag{9}$$

Ale čas T je maximální pro úhel 90° (přesně to platí ve vzduchu). Proto musíme najít kompromis. Vztah mezi T a W není symetrický (obr. 4). V poslední části grafu vidíme prudký pokles křivky pro malou změnu času. Proto kompromisem bude úhel přibližně 60°, a to je úhel, pod kterým se hráč snaží vykopnout míč.



Obr. 4 Vztah mezi délkou doletu W a časem T při fotbalovém výkopu. Čísla na křivce udávají počáteční úhel vrhu. (L. Mathelitsch, S. Thaller, Der Ball ist unrund, Physik in unserer Zeit 48/2, 2017, 78.)

Uvažovali jsme, že výkop se uskutečňuje ze země a míč dopadá také na zem. Velmi často však hod začíná v určité výšce H nad zemí. Proto musíme náš vztah pro délku doletu rozšířit na tvar

$$W = \frac{v^2}{g}\cos\alpha\left(\sin\alpha + \sqrt{\sin^2\alpha + \frac{2gH}{v^2}}\right). \tag{10}$$

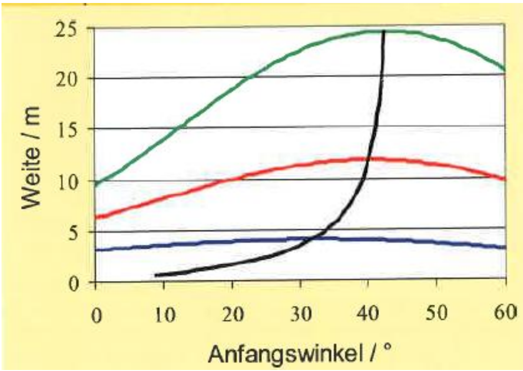
Maximální délka doletu

$$W_{\max} = \frac{v^2}{g}\sqrt{1 + \frac{2gH}{v^2}}\,, \tag{11}$$

dosažená při optimálním úhlu

$$\cos\alpha_{\max} = \frac{gH}{v^2 + gH}\,. \tag{11}$$

Průběh závislosti je zobrazen na obr. 5.



Obr. 5 Vztah mezi počátečním úhlem α (vodorovná osa) a dosaženou délkou doletu W při počáteční výšce H = 2 m. Modrá křivka odpovídá počáteční rychlosti v = 5 m·s^{-1}. Černá křivka spojuje maximální hodnoty. (S. Thaller, L. Mathelitsch, Steiler oder flacher, Physik in unserer Zeit 42/1, 2011, 40.)

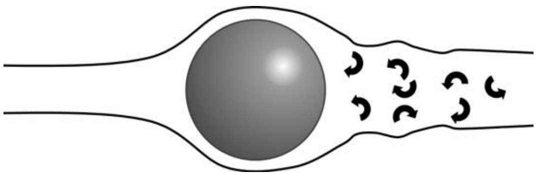
Nejblíže k optimálnímu úhlu se dostává sportovní disciplína **hod kladivem.** Kladivo je, vzhledem ke své vysoké rychlosti 25–30 m·s^{-1}, vrženo pod optimálním úhlem 44°.

Vrh koulí - rychlost koule je menší 14–15 m·s^{-1}, což vede k optimálnímu úhlu vrhu 42°. Ale vzhledem ke geometrii těla a vynaloženým silám je optimální úhel asi 35°. Atlet tak musí volit kompromis a skutečný počáteční úhel vrhu leží v intervalu 38–42°.

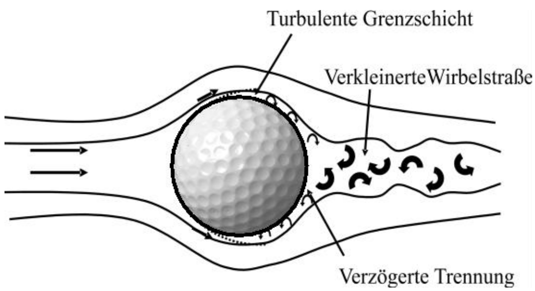
Skok do dálky je vrh vlastního těla. Rychlost skokana je velká, stejná jako při sprintu na 100 m. Jaký je optimální úhel výskoku? Pokud předpokládáme počáteční rychlost 9 m·s^{-1} a počáteční úhel 45°, skok bude mít délku 8,3 m. To je reálné. Ale maximální výška takového skoku bude 2,1 m. To je podobné jako u skoku do výšky a tudíž v tomto případě neuskutečnitelné. Co je špatně? Pro dosažení počátečního úhlu 45° musí být horizontální a vertikální složka rychlosti stejná. Tzn., že atlet by musel dosáhnout počáteční rychlosti 9 m·s^{-1} také ve vertikálním směru. Toto však není možné. Ve vertikálním směru lze dosáhnout rychlosti 3 m·s^{-1}, pokud se horizontální rychlost zmenší na hodnotu 8,5 m·s^{-1}. To vede k počátečnímu úhlu skoku asi 20°. Dosažená výška skoku 1 m je reálná, ale skok o délce 5,3 m je příliš krátký. Jak může atlet dosáhnout délky skoku 8 metrů?

Jeden z důležitých momentů je následující. Atlet uprostřed skoku zvedne ruce a na konci skoku je dá opět co možná nejníže. Tím změní polohu těžiště svého těla, nejdříve je posune výše, potom je sníží. Trajektorie skoku odpovídá poloze těžiště. Pokud je poloha těžiště těla na konci skoku níže, znamená to, že tělo se nachází ve větší výšce oproti těžišti. Proto tělo dopadne do větší vzdálenosti.

Také u **golfu** zkušenosti ukazují na to, že optimální úhel je 20°, ale ze zcela odlišného důvodu. Při golfu hraje významnou roli odpor vzduchu. To je dáno vznikem turbulence za míčem (obr. 6a). Je zajímavé, že pokud povrch míčku není hladký, ale má důlky, plocha turbulence je menší a je menší také odpor vzduchu (obr. 6b). Výsledkem jsou velmi malé turbulence kolem těchto důlků, a tím se proud vzduchu kolem míče udrží delší dobu.



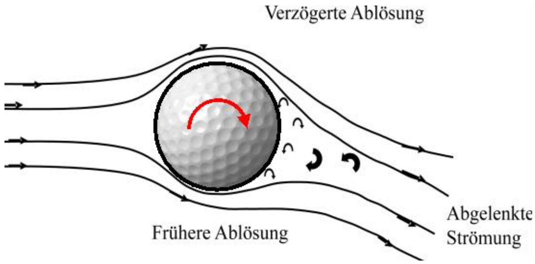
a)



b)

Obr. 6 a) Turbulence za hladkým míčem. b) Méně turbulencí za míčkem s důlky. (L. Mathelitsch, S. Thaller, Tückisches Einlochen, Physik in unserer Zeit 40/5, 2009, 252.)

Pokud míč rotuje (a rotuje velmi rychle, více než 3 000 otáček za minutu), mění se směr pohybu míče (obr. 7). Proud vzduchu za míčem je závislý na směru rotace, má směr dolů nebo nahoru. Toto chování je tzv. *Magnusův efekt*, v důsledku čehož míč zatáčející během letu (*slice*) se pohybuje déle než míč s topspinem (horní rotací).



Obr. 7 Turbulence za rotujícím míčem (L. Mathelitsch, S. Thaller, Tückisches Einlochen, Physik in unserer Zeit 40/5, 2009, 252.)

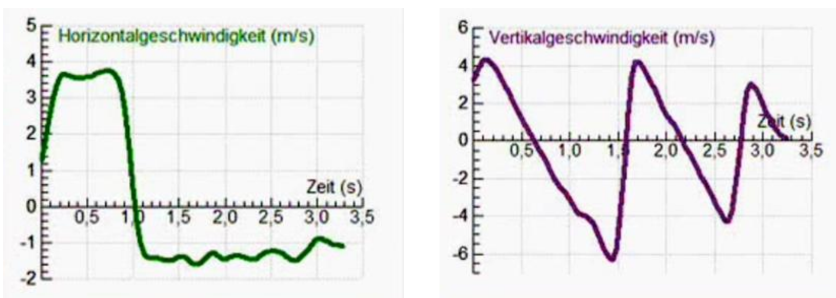
Tento efekt byl objeven již v roce 1910 J. J. Thompsonem. Tento vědec je dobře znám všem fyzikům, je „otcem" elektronu. V rozmluvě „Dynamika golfového míče", kterou Thompson předal Královské akademii, uvádí: „… je to spin, který je odpovědný za chování míče s rotací … golfový míč zná jen jedno pravidlo … vždy následovat svůj nos".

Míč pohybující se rychlostí 60 $m \cdot s^{-1}$ pod počátečním úhlem 45° by bez odporu vzduchu letěl do vzdálenosti více než 300 m. S odporem vzduchu je tato vzdálenost asi 150 m. Použijeme-li slice efekt u míče rotujícího rychlostí 60 otáček za sekundu, vzdálenost bude více než 200 m při počátečním úhlu vrhu asi 20°.

Košíková. Výzkum v oblasti fyzikálního vzdělávání ukázal, že žáci mají problémy s grafy. Tzn., že grafickému znázorňování musíme věnovat zvýšenou pozornost. V následující úloze žáci mají za úkol reálný děj převést do grafické podoby. Sledují video – úspěšný hod míče do koše (obr. 8 vlevo). Poté žáci mají nakreslit, co pozorovali. Mají narýsovat závislost $x(t)$ (graf pohybu ve vodorovném směru v závislosti na čase) a $y(t)$ (graf pohybu ve svislém směru v závislosti na čase). Zkušenosti ukazují, že vytvoření grafu $y(t)$ je pro žáky jednodušší, než vykreslení závislosti $x(t)$.

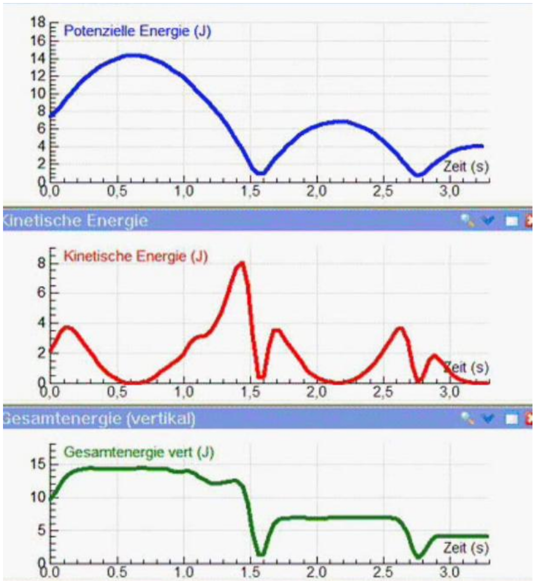
Obr. 8 Vlevo – hod míče do koše. Vpravo nahoře – pohyb ve vodorovném směru v závislosti na čase. Vpravo dole – pohyb ve svislém směru

Ve druhém kroku mohou žáci nakreslit graf rychlosti *v* ve směru horizontálním a vertikálním (obr. 9). Na základě zkušeností víme, že větší problémy působí kresba vertikálního grafu.



Obr. 9 Vlevo – rychlost míče v horizontálním směru (míč z obr. 8); vpravo – vertikální rychlost míče

Lze zakreslit také průběh kinetické a potenciální energie míče, stejně jako celkovou energii, viz obr. 10. Jak lze vidět, míč ztrácí energii jen během kontaktu s podložkou nebo s košem.

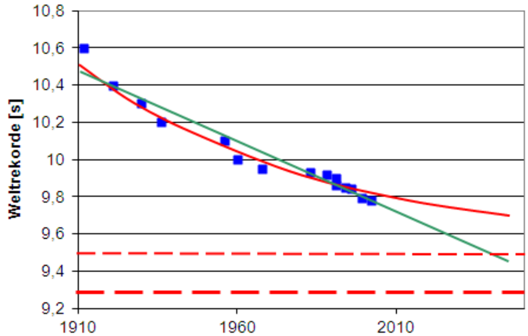


Obr. 10 Potenciální energie míče (nahoře), kinetická energie (uprostřed), celková energie (dole)

Rekordy

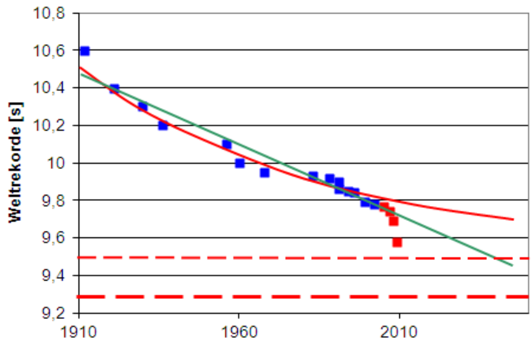
Překonat nějaký rekord je cílem mnoha atletů, ať už se jedná o překonání rekordu vlastního, rekordu země či v nejlepším případě rekordu světového. Ve většině sportů existují světové rekordy. I když všechny vstupní parametry zůstávají stejné – trénink, vybavení, lékařská péče, dosažené výsledky jsou rozdílné, velmi často kopírují Gaussovo rozdělení. Tzn., že vždy existuje sportovec s výsledky ležícími v hraniční oblasti, který vykazuje o něco lepší předpoklady k překonání rekordu, než mají ostatní. Je však třeba vyčkat na správný okamžik. K tomuto dochází zřejmě stále méně často. Na druhé se neustále rozvíjejí tréninkové metody, sportovní vybavení, lékařská péče. Proto lze v některých odvětvích sportu sledovat stálé vylepšování světových rekordů. Zde se naskýtá otázka, jestli existuje nějaká hranice dosažitelného výkonu. Samozřejmě, že člověk nevyskočí do výšky 5 metrů, ale jaké výšky lze reálně dosáhnout?

Jak přistupovat k řešení této otázku ukážu na příkladu sprintu mužů na 100 m. Obr. 11 ukazuje vývoj světového rekordu.



Obr. 11 Světový rekord v běhu mužů na 100 metrů. Zelená a červená křivka jsou lineární a logistická extrapolace. Čárkované křivky jsou limity, viz text. (L. Mathelitsch, S. Thaller, Physik des Sports, Wiley/VCH, Weinheim, 2015.)

Pokud se ptáme na hraniční hodnotu, můžeme provést extrapolaci. Lineární extrapolace (zelená křivka v obr. 11) nemá význam, protože končí u hodnoty času 0 sekund. Červená křivka se zdá být správnější, jedná se o interpolaci logistické rovnice. Směřuje k hodnotě 9,5 s (červená čárkovaná linie). Matematikové vyhodnotili, že světové rekordy jsou málo časté události. Proto je třeba aplikovat speciální statistické výpočty, podobné jako v případě studia hurikánů nebo zemětřesení. Jako výsledek těchto výpočtů dostaneme hodnotu 9,3 s (tučné delší čáry v čárkované křivce na obr. 11).



Obr. 12 Upravený obr. 11. se započítáním světových rekordů Usaina Bolta

Obr. 11 nebral v úvahu časy atleta Usaina Bolta. Započítáme-li do našich výpočtů jeho rekordy, graf bude vypadat odlišně (obr. 12). Nyní uběhlo již několik let od dosažení těchto rekordních časů a zdá se, že v dohledu není žádný nový světový rekord. Tzn., že další bod grafu je „vcelku" správný a pokud v dalších letech nebude dosaženo světového rekordu, bude ležet dále mimo křivku. Potom můžeme prodloužit sled modrých bodů v dlouholetém trendu z předchozího období. A Usain Bolt byl pouze jakási „odchylka".

Literatura

V seznamu jsou uvedeny knihy v angličtině, které se věnují vztahu sportu a fyziky.

Adair R. K.: The Physics of Baseball. New York: Harper Perennial (2002), ISBN 978-0060084363.

Cross R.: Physics of Baseball and Softball. New York: Springer (2011), ISBN 978-1-4419-8113-4.

Fontanella J. J.: The Physics of Basketball. Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press (2006), ISBN 978-0801885136.

Laws K.: Physics and the Art of Dance. New York: Oxford Univ. Press (2002), ISBN 978-0195341010.

Jorgensen P. T.: The Physics of Golf. New York: Springer (1999), ISBN 978-0387986913

Haché A.: Physics of Hockey. Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press (2002), ISBN 978-0801870712

Kimball J.: The Physics of Sailing. Boca Raton: CRC Press (2010), ISBN 978-1420073768.

Lind D., Sanders S. P.: The Physics of Skiing: Skiing at the Triple Point. New York: Springer (1996), ISBN 978-1441918345.

Wesson J.: The Science of Soccer. Oxon: Taylor & Francis (2002), ISBN 978-0750308137.

Wilson D. G.: Bicycling Science. Cambridge: MIT Univ. Press (2004), ISBN 0-262-73154-1.

Denny M.: Gliding for Gold. The Physics of Winter Sports. Baltimore: The Johns Hopkins Univ. Press (2011), ISBN 978-1-4214-0215-4.

Armenti A. (Ed.): The Physics of Sports. New York: American Inst. of Physics (1992), ISBN 9780883189467.

Spathopoulos V.: An Introduction to the Physics of Sports. CreateSpace Independent Pub. (2013), ISBN 9781483930077.

Griffing D. F.: The Dynamics of Sports: Why That´s the Way the Ball Bounces. Dubuque: Kendall Hunt Pub. Comp. (2000), ISBN 978-0787271299.

Goff J. E.: Gold Medal Physics: The Science of Sports. Baltimore: Johns Hopkins Univ. Press (2010), ISBN: 978-0-8018-9322-9.