



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## CENTRUM SPORTOVNÍCH AKTIVIT

CENTRE OF SPORTS ACTIVITIES

### VYUŽITÍ BĚŽECKÉHO WATTMETRU STRYD PRO STANOVENÍ ÚROVNĚ VO<sub>2</sub>MAX U VYTRVALOSTNÍCH BĚŽCŮ

#### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

#### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Bekr

#### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Jan Pavelka, Ph.D.

BRNO 2023

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Sportovní technologie**

Centrum sportovních aktivit

**Student:** Ondřej Bekr

**ID:** 226378

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2022/23

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Využití běžeckého wattmetru STRYD pro stanovení úrovně VO<sub>2</sub>max u vytrvalostních běžců**

**POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:**

- 1) Analýza dostupných odborných článků a prací na dané téma (WoS, Google Scholar) - teoretická východiska
- 2) Stanovení metodologického postupu zpracování semestrální práce (postup měření, technické a organizační nároky, předpokládané výstupy a analýza dat)
- 3) Pilotní ověření stanoveného postupu měření (2-3 probandů), vyhodnocení a následná úprava designu práce
- 4) Zpracování teoretické části Bc. práce a finalizace designu metodologie
- 5) Organizace a provádění samotného měření u vybraných probandů
- 6) Analýza dat a jejich interpretace

Možné výzkumné otázky a hypotézy:

- Jaký je vztah úrovně běžeckého výkonu (získaného za pomoci běžeckého wattmetru) a úrovně VO<sub>2</sub>max u běžců vytrvalců
- Je možné za pomoci běžeckého wattmetru vypočítat maximální spotřebu kyslíku VO<sub>2</sub>max?
- Jak přesný bude tento výpočet (jak se bude vypočtená hodnota lišit od reálné spotřeby VO<sub>2</sub>max, která bude naměřena v laboratoři a ve venkovním prostředí)?

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Snyder, K. L., Mohrman, W. P., Williamson, J. A., & Li, K. (2018). Methodological Flaws in Aubry, RL, Power, GA, and Burr, JF. An Assessment of Running Power as a Training Metric for Elite and Recreational Runners. J Strength Cond Res 32: 2258–2264, 2018. The Journal of Strength & Conditioning Research, 32(12), e61.

Aubry, R. L., Power, G. A., & Burr, J. F. (2018). An assessment of running power as a training metric for elite and recreational runners. The Journal of Strength & Conditioning Research, 32(8), 2258-2264.

Pardo Albiach, J., Mir-Jimenez, M., Hueso Moreno, V., Nacher Moltó, I., & Martínez-Gramage, J. (2021). The relationship between VO<sub>2</sub>max, power management, and increased running speed: towards gait pattern recognition through clustering analysis. Sensors, 21(7), 2422.

**Termín zadání:** 13.2.2023

**Termín odevzdání:** 2.6.2023

**Vedoucí práce:** Mgr. Jan Pavelka, Ph.D.

předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## Abstrakt

Určování hranice obecné vytrvalosti, kritického výkonu a maximální spotřeby kyslíku je dnes běžnou součástí tréninkového procesu profesionálních sportovců a jejich přípravy pro dosahování nejlepších možných sportovních výsledků. Výkon je velmi užitečnou metrikou v cyklistice, ale jeho potenciál se v posledních letech snaží využívat také běžci. Běžecský výkon je funkční pouze pokud dobře reprezentuje metabolickou zátěž organismu. Tato práce zkoumá vztah mezi běžecským výkonem PO a spotřebou kyslíku VO<sub>2</sub>, reprezentantem metabolické zátěže organismu, ve vnitřním a vnějším prostředí. Dále práce ověřuje možnost určování úrovně VO<sub>2max</sub> běžců pomocí běžecského výkonu.

Vztah PO a VO<sub>2</sub> je lineární, pro jednotlivé subjekty nabývá R<sup>2</sup> ve vnitřním prostředí hodnotu  $0,95 \pm 0,07$  a ve vnějším prostředí hodnotu  $0,97 \pm 0,02$ . Pro všechny testované osoby (TO) ve vnitřním prostředí nabývá R<sup>2</sup> hodnotu 0,67 a ve vnějším prostředí 0,79. Mezi hodnotami změřenými v různých prostředích byl pozorován rozdíl 1,2 % (PO) a 3,7 % (VO<sub>2max</sub>). Predikce modelem ze všech TO ve vnitřním prostředí má chybu 3,5 %.

## Klíčová slova

Stryd, wattmetr, běh, běžecský výkon, VO<sub>2max</sub>, predikce

## Abstract

Determining the limits of general endurance, critical power and maximal oxygen consumption is now a common part of the training process of professional athletes and their preparation to achieve the best possible sports results. Power is a very useful metric in cycling, but in recent years runners have also been trying to exploit its potential. Running power is only functional if it represents well the metabolic load of the organism. This thesis investigates the relationship between running power PO and oxygen consumption VO<sub>2</sub>, a representative of the metabolic load of the organism, in indoor and outdoor environments. Furthermore, thesis verifies the possibility of determining the VO<sub>2max</sub> level of runners using running power.

The relationship between PO and VO<sub>2</sub> is linear, for individual subjects the R<sup>2</sup> is  $0,95 \pm 0,07$  in the indoor and  $0,97 \pm 0,02$  in the outdoor. For all subjects (TO) in the indoor the R<sup>2</sup> takes the value of 0,67 and in the outdoor the value of 0,79. There was a difference of 1,2% (PO) and 3,7% (VO<sub>2max</sub>) between the values measured in the different environments. The model prediction from all TO in the indoor environment has an error of 3,5%.

## Keywords

Stryd, wattmeter, running, running power, VO<sub>2max</sub>, prediction

## **Bibliografická citace**

BEKR, Ondřej. Využití běžeckého wattmetru STRYD pro stanovení úrovně VO<sub>2</sub>max u vytrvalostních běžců [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-06-01]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/151596>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Centrum sportovních aktivit, Centrum sportovních aktivit. Vedoucí práce Jan Pavelka.

# Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	<i>Ondřej Bekr</i>
<b>VUT ID studenta:</b>	226378
<b>Typ práce:</b>	<i>Bakalářská práce</i>
<b>Akademický rok:</b>	2022/23
<b>Téma závěrečné práce:</b>	<i>Využití běžeckého wattmetru STRYD pro stanovení úrovně <math>VO_{2max}</math> u vytrvalostních běžců</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 1. června 2023

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Mgr. Janu Pavelkovi, Ph.D. za jeho cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále také děkuji všem účastníkům praktické části a konzultantům za jejich čas a ochotu.

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1. MOTIVACE PRÁCE A JEJÍ CÍLE .....</b>	<b>12</b>
1.1 VÝZKUMNÉ OTÁZKY A CÍLE PRÁCE .....	12
<b>2. BIOMECHANIKA BĚHU.....</b>	<b>14</b>
2.1 CYKLUS BĚHU .....	14
2.2 POHYBOVÝ APARÁT .....	15
2.3 PRAKTICKÉ VYUŽITÍ BIOMECHANIKY PŘI BĚHU .....	15
<b>3. VELIČINY SLEDOVANÉ PŘI BĚHU .....</b>	<b>17</b>
3.1 SRDEČNÍ FREKVENCE A TEMPO/Rychlost BĚHU .....	17
3.2 BĚŽECKÝ VÝKON .....	18
3.2.1 <i>Mechanický výkon</i> .....	19
3.2.2 <i>Metabolický výkon</i> .....	19
3.2.3 <i>Vztah mezi mechanickým a metabolickým výkonem</i> .....	20
3.2.4 <i>Kritický výkon</i> .....	22
<b>4. BĚŽECKÉ WATTMETRY.....</b>	<b>23</b>
4.1 STRYD.....	23
4.1.1 <i>Princip výpočtu výkonu</i> .....	24
4.1.2 <i>Metriky poskytované wattmetrem Stryd</i> .....	25
4.1.3 <i>Použití wattmetru Stryd</i> .....	26
4.1 RUNSCRIBE .....	27
4.2 GARMIN TECHNOLOGIE PRO MĚŘENÍ BĚŽECKÉ DYNAMIKY .....	28
<b>5. METODIKA MĚŘENÍ.....</b>	<b>29</b>
5.1 TESTOVÝ PROTOKOL .....	29
5.1.1 <i>Testované osoby</i> .....	30
5.1.2 <i>Sledované parametry</i> .....	31
5.1.3 <i>Použité přístroje</i> .....	31
5.2 SBĚR DAT .....	31
<b>6. ZPRACOVÁNÍ DAT .....</b>	<b>33</b>
6.1 EXPORT DAT.....	33
6.2 PŘEDZPRACOVÁNÍ DAT.....	33
6.3 ANALÝZA DAT.....	34
<b>7. VÝSLEDKY.....</b>	<b>36</b>
7.1 MODEL BEZ DĚLENÍ.....	36
7.2 MODEL ROZDĚLENÍ DLE POHLAVÍ.....	38
7.3 MODEL ROZDĚLENÍ DLE MAXIMÁLNÍ HODNOTY BĚŽECKÉHO VÝKONU .....	40
7.4 MODEL VYUŽÍVAJÍCÍ DALŠÍ VELIČINY WATTMETRU STRYD .....	42



7.5	POROVNÁNÍ MĚŘENÍ VE VNITŘNÍM A VNĚJŠÍM PROSTŘEDÍ.....	43
<b>8.</b>	<b>DISKUSE .....</b>	<b>47</b>
8.1	VZTAH ÚROVNĚ BĚŽECKÉHO VÝKONU A SPOTŘEBY KYSLÍKU .....	47
8.2	PREDIKCE $VO_{2MAX}$ POMOCÍ BĚŽECKÉHO VÝKONU .....	49
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>51</b>
	<b>LIMITY PRÁCE .....</b>	<b>52</b>
	<b>REFERENCE.....</b>	<b>53</b>
	<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>63</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Odhadované časy běhu na určité vzdálenosti vycházející z $VO_{2max}$ a CP60min, převzato z [8] .....	13
Obr. 2 Cyklus běhu: IC - počáteční kontakt, TO - odraz, Stance – stojné fáze, Swing - letová fáze, převzato z [11].....	14
Obr. 3 EMG svalová aktivita svalů dolních končetin aktivovaných při běhu v různých částech cyklu běhu, převzato z [11].....	16
Obr. 4 Wattmetr Stryd [55].....	24
Obr. 5 Připevnění wattmetru Stryd na obuv [57].....	27
Obr. 6 Záznam jednoho testu v prostředí webové aplikace Power Centre.....	27
Obr. 7 Systém RunScribe [59; 60].....	28
Obr. 8 Running Dynamics Pod [61].....	28
Obr. 9 Grafické znázornění průběhu testů .....	30
Obr. 10 Proces práce s daty v programovacím jazyku Python.....	34
Obr. 11 Závislost $VO_2$ na běžeckém výkonu jedné testované osoby .....	35
Obr. 12 Regresní model bez dělení, vnitřní měření .....	37
Obr. 13 Predikce hodnot $VO_{2max}$ modelem z vnitřního prostředí pro vnější prostředí, model bez dělení...37	
Obr. 14 Regresní model pro muže a ženy odděleně, vnitřní měření .....	39
Obr. 15 Predikce hodnot $VO_{2max}$ pro vnitřní prostředí na základě dělení na muže a ženy.....39	
Obr. 16 Regresní model pro vysoký a nízký maximální dosažený PO, vnitřní měření .....	41
Obr. 17 Predikce hodnot $VO_{2max}$ na základě dělení dle maximálního dosaženého PO.....41	
Obr. 18 Predikce hodnot $VO_{2max}$ modelem rozšířeným o další veličiny měřené wattmetrem Stryd z dat z vnitřního prostředí pro vnější prostředí (nahore) a pro vnitřní prostředí (dole).....43	
Obr. 19 Porovnání rozsahu hodnot PO a $VO_{2max}$ ve vnitřním a vnějším prostředí .....	45
Obr. 20 Kolísání $VO_2$ a PO ve vnějším prostředí vlivem větru .....	49

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení běžeckých výkonových zón dle procent z CP, převzato z [37] .....	18
Tab. 2 Veličiny měřené wattmetrem Stryd .....	25
Tab. 3 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou $VO_{2max}$ , modely bez dělení.....	37
Tab. 4 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou $VO_{2max}$ , dělení muži a ženy .....	38
Tab. 5 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou $VO_{2max}$ , dělení na vysoký a nízký PO .....	40
Tab. 6 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou $VO_{2max}$ , veličiny CD, GCT a PO z wattmetru Stryd .....	42
Tab. 7 Porovnání dat z vnitřního a vnějšího prostředí a jejich odchylka .....	45
Tab. 8 Průměrné hodnoty a směrodatné odchylky PO a $VO_2$ v různých prostředích .....	46

# ÚVOD

V současnosti je dostupných mnoho přístrojů umožňujících sportovcům kvantifikovat jejich výkon. Na základě těchto dat mohou sportovci vhodně sestavit svůj tréninkový plán. Nejrozšířenější systém pro určování tempa a rychlosti běhu ve vytrvalostním sportu je GPS. Signál GPS však může být ovlivněn překážkami mezi sportovcem a satelity GPS, jako jsou stromy, budovy nebo atmosférické podmínky [1]. Alternativou odolnou vůči těmto překážkám jsou inerciální senzory, akcelerometry a gyroskopy, které se osvědčily jako vhodný prostředek pro měření ve sportu a tvoří základ wattmetrů.

Výkon hraje již několik let významnou roli v cyklistice a pomáhá cyklistům a jejich trenérům stanovit ideální tempo, tréninkovou zátěž a rychlost jízdy pro dosažení optimálního tréninkového nebo závodního výsledku. Metrika výkonu v cyklistice toto umožňuje díky své vysoké korelaci s metabolickým výdejem organismu [2].

V oblasti běhu je poměrně náročné stanovit optimální tréninkovou zátěž a skladbu tréninku vedoucí k nejlepším výsledkům pomocí jednoduchých a jednoznačných údajů. K těmto účelům jsou zde běžně využívány základní metriky jako jsou srdeční tep nebo tempo běhu. Nicméně tyto údaje mohou být zatíženy různými okolními vlivy (počasí, teplota, nadmořská výška) a stavy organismu (únava, stres nebo kvalita spánku). Proto může být poměrně složité tyto údaje správně interpretovat. Zařízení umožňující měřit běžecký výkon může tento problém zjednodušit. Pomocí běžeckého wattmetru Stryd můžeme měřit aktuální běžecký výkon, dobu kontaktu se zemí a vertikální oscilaci a sledovat tak vývoj kondice a techniky běhu. Tyto údaje již nejsou závislé na vlivech okolního prostředí a stavu organismu [3]. Wattmetr Stryd navíc umožňuje díky svému softwaru výpočet kritického výkonu (CP), jenž při vytrvalostní aktivitě o určité intenzitě predikuje hranici mezi aerobním a anaerobním metabolismem. Díky CP mohou běžci rozdělit tempa běhu do několika výkonnostních zón, s jejichž pomocí lze poměrně přesně stanovit, po jakou dobu bude běžec schopen dané tempo udržovat.

Tato práce se bude zabývat zkoumáním vztahu mezi běžeckým výkonem a spotřebou kyslíku a také možnostmi určit maximální spotřebu kyslíku pomocí běžeckého výkonu. Práce je rozdělena do několika částí, z nichž první tři jsou teoretické a zabývají se mechanikou běhu a jeho monitoringem. Čtvrtá část je zaměřena na běžecké wattmetry a princip jejich funkce. Následuje metodická část práce a zpracování dat. V další části jsou prezentovány výsledky práce. Následuje jejich diskuse hodnotící přínosy práce a další možnosti bádání. Nakonec jsou zmíněny limity práce.

# 1. MOTIVACE PRÁCE A JEJÍ CÍLE

Práce se snaží poukázat na potenciál a větší využití běžeckých wattmetrů. Dobře mohou běžcům sloužit coby alternativa k základním sledovaným parametrům vytrvalostního výkonu, jako jsou srdeční frekvence nebo běžecké tempo [4; 5; 6]. Skrytý potenciál mají také v možnosti stanovení úrovně trénovanosti jedince [7], což je předmětem řešení předkládané bakalářské práce.

Možnost stanovit za pomoci využití běžeckého wattmetru Stryd přibližnou hodnotu maximální spotřeby kyslíku ( $VO_{2max}$ ) by byla velmi praktická. Jednalo by se o poměrně levnou a nenáročnou alternativu k běžně využívaným analyzátorům při laboratorních měřeních (analýza vdechovaného a vydechovaného vzduchu při zátěžových testech). Běžci by mohli pravidelně kontrolovat vývoj a stav své výkonnosti v jejich přirozeném prostředí a na základě těchto údajů případně upravovat tréninkový plán. Tím by také mohlo dojít k eliminaci chyb vzniklých během laboratorního testu, jako je nepodání výkonu odpovídajícího aktuální formě jedince kvůli nervozitě nebo podobným jevům.

Pokud by běžec absolvoval například jednou ročně laboratorní test, při kterém by došlo k odbornému a správnému stanovení hodnoty  $VO_{2max}$  a dalších potřebných parametrů, mohl by v souladu s těmito laboratorními hodnotami pravidelně provádět měření své výkonnosti pouze za pomoci wattmetru. Faktická znalost aktuálního stavu těchto veličin může běžci velmi pomoci k dosažení jeho cíle bez vynaložení velkého množství finančních prostředků.

Autoři knihy *The fastest way to your next personal best: running power* [8], a přední odborníci na wattmetr Stryd, ve své knize sami uvádějí tabulku (Obr. 1) predikce času běhů na určité vzdálenosti, které se odvíjejí od hodnoty  $VO_{2max}$  anebo hodnoty 60minutového CP testu. Hodnota  $VO_{2max}$  je totiž stále využívána jako prediktor výkonnosti sportovce.

## 1.1 Výzkumné otázky a cíle práce

Hlavním cílem této práce je popsání vztahu mezi běžeckým výkonem (PO) měřeným wattmetrem Stryd a spotřebou kyslíku ( $VO_2$ ). Pro splnění tohoto cíle je důležité dobře pochopit princip a význam měření běžeckého výkonu a jeho fyzikální podstatu. Základem proto je rešerše vhodné odborné literatury.

Druhým cílem je, na základě vztahu PO a  $VO_2$ , zjistit, zda je možné pomocí běžeckého výkonu určit úroveň  $VO_{2max}$  běžce. Pokud se ukáže, že je tato možnost funkční, bude dalším cílem určit přesnost stanovení  $VO_{2max}$  na základě PO. Ke splnění těchto cílů je třeba provést simultánní měření PO a  $VO_2$  na testovacím souboru běžců a na základě těchto dat vytvořit predikční modely.

Pro tyto účely byly stanoveny následující výzkumné otázky.

1. Jaký je vztah úrovně běžeckého výkonu a úrovně  $VO_2$ ?
2. Je možné za pomoci běžeckého wattmetru odhadovat maximální spotřebu kyslíku  $VO_{2max}$ ?
3. Jak přesný bude tento výpočet (jak se bude vypočtená hodnota lišit od reálné spotřeby  $VO_{2max}$ , která bude naměřena v laboratoři a ve venkovním prostředí)?

ACHIEVABLE TIMES BY DISTANCE BASED ON CP60 AND $VO_2$ MAX							
CP60 watt/kg	ACHIEVABLE RESULT						$VO_2$ MAX ml/kg/min
	3000 m	5000 m	10.000 m	21,1 km	42,195 km	Distance for one hour	
2.00	0:23:16	0:40:12	1:24:24	3:07:38	6:33:51	7.27	28.0
2.25	0:20:36	0:35:34	1:14:41	2:44:02	5:48:32	8.15	31.5
2.50	0:18:27	0:31:53	1:06:55	2:28:47	5:12:19	9.03	35.0
2.75	0:16:43	0:28:53	1:00:39	2:14:50	4:43:03	9.90	38.5
3.00	0:15:14	0:26:19	0:55:15	2:02:51	4:17:53	10.80	42.0
3.25	0:14:05	0:24:20	0:51:06	1:53:36	3:58:27	11.62	45.5
3.50	0:13:04	0:22:34	0:47:23	1:45:20	3:41:06	12.47	49.0
3.75	0:12:12	0:21:04	0:44:13	1:38:19	3:26:23	13.30	52.4
4.00	0:11:26	0:19:45	0:41:27	1:32:09	3:13:26	14.13	55.9
4.25	0:10:46	0:18:35	0:39:01	1:26:45	3:02:06	14.95	59.4
4.50	0:10:10	0:17:34	0:36:53	1:21:59	2:52:06	15.76	62.9
4.75	0:09:39	0:16:40	0:34:58	1:17:45	2:43:13	16.56	66.4
5.00	0:09:11	0:15:52	0:33:18	1:14:01	2:35:23	17.34	69.9
5.25	0:08:46	0:15:08	0:31:46	1:10:37	2:28:14	18.12	73.4
5.50	0:08:23	0:14:29	0:30:24	1:07:35	2:21:52	18.88	76.9
5.75	0:08:02	0:13:53	0:29:08	1:04:47	2:16:00	19.64	80.4
6.00	0:07:43	0:13:20	0:28:01	1:02:16	2:10:43	20.38	83.9
6.25	0:07:26	0:12:51	0:26:58	0:59:56	2:05:49	21.12	87.4
6.50	0:07:10	0:12:23	0:26:01	0:57:50	2:02:23	21.84	90.9

Obr. 1 Odhadované časy běhu na určité vzdálenosti vycházející z  $VO_{2max}$  a CP60min, převzato z [8]

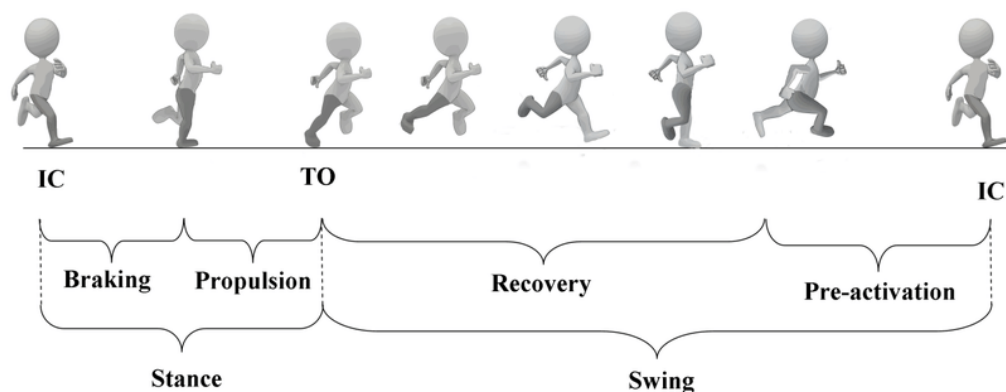
## 2. BIOMECHANIKA BĚHU

Biomechanika ve sportu si klade za cíl zkoumat danou sportovní aktivitu a na základě těchto poznatků zlepšit sportovní výkon a také minimalizovat riziko zranění sportovce [9].

Běh je pro člověka, podobně jako chůze, přirozený pohyb. Jde o pohyb odehrávající se především v sagitální rovině a od chůze se liší rychlostí pohybu a jeho biomechanikou [10].

### 2.1 Cyklus běhu

Chůzi lze popsat stále se opakujícími cykly. Jeden cyklus lze rozdělit na fázi stoje a fázi švihů. Stojná fáze je charakterizovaná dotykem chodidla s podložkou, zatímco švihová fáze začíná odlepením chodidla od podložky a končí opětovným kontaktem s podložkou [9]. Při chůzi je fáze stoje delší než 50 % celkové délky jednoho cyklu chůze. V cyklu chůze se tedy vyskytuje fáze stoje, při které se dotýkají země obě chodidla zároveň. Jeden chůzový cyklus začíná při počátečním kontaktu jedné nohy se zemí a končí ve chvíli, kdy se tatáž noha dotkne země podruhé. Tyto body jsou nazývány jako iniciační kontakt. Při běhu je počátek a konec cyklu, teď již hovoříme o cyklu běžeckém, stejný, ale odraz nastane během jeho první poloviny [12]. Proto se při běhu již neobjevuje dvojporová fáze, tedy fáze dotyku obou noh se zemí. Místo ní se v cyklu vyskytne letová fáze, tedy fáze, při které nedochází ke kontaktu se zemí žádnou částí těla. Tento jev nastane na začátku a na konci švihové fáze běžeckého cyklu, tedy v části od odrazu iniciační končetiny až po její dopad na zem. Jednotlivé fáze běhu zobrazuje Obr. 2. Část cyklu běhu, při kterém dojde k odrazu, je závislá na rychlosti běhu. Čím je běh rychlejší, tím dříve odraz nastane. [9]



Obr. 2 Cyklus běhu: IC - počáteční kontakt, TO - odraz, Stance – stojné fáze, Swing - letová fáze, převzato z [11]

## 2.2 Pohybový aparát

Světová zdravotnická organizace (WHO) definuje pohybovou aktivitu jako pohyb těla zapříčiněný svalovou aktivitou vyžadující energetický výdej [13]. Svalová aktivita může být koncentrická, izometrická nebo excentrická. Sval se při vytváření síly zpravidla nemusí zkracovat, aktivita koncentrická, ale může si také zachovat stejnou délku, aktivita izometrická, nebo se prodloužit, aktivita excentrická [14]. Pokud vlivem této aktivity dojde k pohybu, jde o aktivitu dynamickou, pokud nikoliv, jde o aktivitu statickou. Ta je důležitá pro posturální stabilitu a funkci celého organismu jako celku. Běh je tedy dynamická pohybová aktivita. Svaly potřebují k vykonávání své funkce energii, která je extrahována ze základních substrátů stravy jako jsou sacharidy, tuky a bílkoviny. Díky biochemickým procesům v organismu dojde na základě dodaných substrátů k syntéze ATP (AdenosineTriphosphate), základní energetické jednotce potřebné k svalové aktivitě, a jejím derivátům. [14]

Při běhu se do aktivity zapojuje velké množství svalových skupin. Svalová aktivita jednotlivých svalů, při běhu především dolních končetin, je měřena pomocí elektromyografie. Míra zapojení jednotlivých svalů určuje velikost vytvořené nebo absorbované síly při interakci dolních končetin s podložkou. Při dopadu na podložku dochází k absorpci elastické energie do svalů a šlach, která je při odrazu znovu využita spolu se silou vytvořenou svaly dolních končetin [15]. Svaly dolních končetin, které se nejvíce zapojují při běhu jsou flexory a extenzory kyčle, hýžd'ové svaly, svaly stehenní a lýtkové. Zapojení některých svalů během cyklu běhu je zobrazeno na Obr. 3.

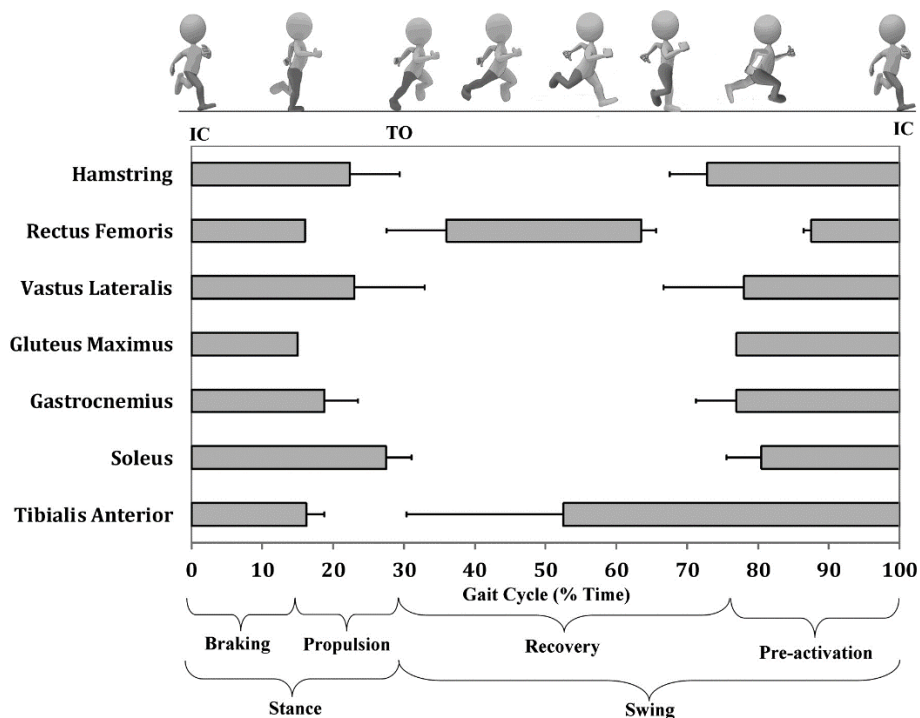
## 2.3 Praktické využití biomechaniky při běhu

Díky znalostem o funkci jednotlivých částí pohybového aparátu při běhu je možné vytvářet běžecké vybavení, které zlepšuje sportovní výkon a podporuje správný pohybový stereotyp sportovce [16; 17]. Kromě verbální intervence s běžci, která je subjektivně zabarvena, lze využít moderní technologie, jako je například EMG, 3D scannery, tlakové vložky nebo systém RunScribe, které jsou již objektivní (nejsou zkresleny pocity běžce a poskytují přesné informace o stavu zkoumaného problému) a nabízejí obecný vhled do dané problematiky [18]. Díky těmto technologiím můžeme analyzovat interakci běžce s obuví a okolním prostředím. V případě vytrvalostního běhu jsou tyto informace využívány ke zlepšení běžecké ekonomiky (RE – running economy), protože se ukazuje, že zásadně ovlivňuje výsledky běžců stejné výkonnostní kategorie [19; 20]. Jednou z možností vedoucích ke zlepšení RE je tvorba vhodné běžecké obuvi [21; 22], která pomáhá běžci minimalizovat energii ztracenou při dopadu a následně ji co nejefektivněji využít při odrazu [23; 24]. Tato možnost je v současnosti nejspíše jediným možným řešením pro další zlepšování výsledků u elitních vytrvalců [25; 26; 27]. Další možností je pak trénink sportovce vedoucí k optimalizaci běžeckého pohybu snížením energetického výdeje a zlepšením biomechanické a/nebo neuromuskulární efektivity



pohybu [28]. Jednoznačný vliv na RE má silový trénink [29]. Existuje mnoho druhů posilování, z nichž mají na RE největší vliv silový trénink s vlastní vahou nebo se zátěží, plyometrická a explozivní cvičení [30].

Dále jsme díky těmto technologiím schopni personalizovat obuv „na míru“ pro každého jedince. Tohoto se často využívá při úpravách a korekcích určitých poruch pohybových stereotypů chůze či běhu, protože můžeme vytvářet vložky tvaru odpovídajícího potřebám daného jedince [31].



Obr. 3 EMG svalová aktivita svalů dolních končetin aktivovaných při běhu v různých částech cyklu běhu, převzato z [11]

### **3. VELIČINY SLEDOVANÉ PŘI BĚHU**

Monitoring běhu nám poskytuje informace potřebné ke sledování vývoje kondice běžce. Pro běžnou populaci může být běh především dobrým relaxačním nástrojem a formou cvičení podporující kondici [32]. Pokud hovoříme o sportovcích, z dlouhodobého hlediska je většinou požadováno, aby se podávaný sportovní výkon zlepšoval. K určení toho nám většinou postačí čas běhu a jeho vzdálenost, popřípadě tempo běhu. Pokud však chceme sledovat reakci organismu sportovce na zátěž nebo mu pomoci dosáhnout optimálního výkonu, musíme brát v potaz také další veličiny, které v sobě odrážejí fyziologické a metabolické procesy odehrávající se v organismu běžce. Jejich znalost nám umožňuje odhadovat zátěž, jenž je na organismus vyvíjena, míru adaptace na ní a také odezvu organismu na zátěž (trénink). Monitorování zátěže, jenž je na organismus vyvíjena, je základní milník nejen pro vytrvalostní trénink [3]. Existuje široká škála biomarkerů, které nám umožňují sledovat aktuální intenzitu zátěže sportovce. Jedná se například o již zmíněnou srdeční frekvenci, úroveň laktátu v krvi, běžecký výkon, spotřebu kyslíku nebo míru svalového okysličení. Pouze některé však jsou snadno měřitelné a lze je sledovat v reálném čase přímo při běhu. [33; 34]

#### **3.1 Srdeční frekvence a tempo/rychlost běhu**

Mezi nejběžněji v reálném čase monitorované veličiny patří tempo nebo rychlost běhu a srdeční frekvence (HR). S těmito údaji si vystačí většina sportujících, protože poskytují základní informace o reakci organismu na vykonávanou pohybovou zátěž, ale také o kvalitě výkonu [35]. Skladba běžeckého se zpravidla odvíjí od stanoveného cíle a specializace sportovce. Obecně ale platí, že trénink probíhá v běžeckých zónách. Běžec ví, že každé zóně odpovídá určité rozmezí HR, a že je v každé z nich schopen běžet po určitou omezenou dobu. Trénink v každé HR zóně rozvíjí specifický aspekt kondice běžce. Díky této znalosti je možné specificky rozvíjet požadované schopnosti běžce, odstraňovat jeho slabiny a případně určovat ideální závodní tempo. Nicméně HR ovlivňuje řada vlivů okolního a vnitřního prostředí, jakými jsou například kvalita spánku, míra stresu, hydratace, počasí nebo únava. Ty je však náročné determinovat a brát v potaz při tvorbě zón HR [36]. To znamená, že například při špatné kvalitě spánku před závodem nebo při vysoké teplotě a vlhkosti v den závodu může kardiovaskulární systém sportovce reagovat na výkon jiným způsobem, než na který je zvyklý. Rozmezí zón HR se v takovém případě mohou změnit až o několik tepů za minutu. Pokud by se jimi sportovec i nadále řídil, mohlo by to mít za následek nedosažení cíle z důvodu předčasného vyčerpání nebo naopak běhu pod možnostmi sportovce. Další nevýhodou tréninku řízeného pomocí HR je pomalá odezva kardiovaskulárního systému. Rychlé změny tempa běhu, způsobené například změnou běžeckého terénu, se v srdeční frekvenci projeví až se zpožděním. To může mít za následek běh ve vyšší intenzitě, než bylo plánováno,

a může dojít k rychlejšímu vyčerpání běžce. [36]

Na podobném principu jsou založeny také rychlostní nebo tempové zóny, které mají obdobný problém. Ty navíc oproti HR vůbec neberou v potaz aktuální stav organismu běžce.

## 3.2 Běžecský výkon

Sledování běžecského výkonu je ve sportu poměrně přelomový způsob, pomocí kterého je možné sledovat metabolickou zátěž organismu nezávisle na vlivech okolního prostředí [10]. Tímto tedy eliminuje nedostatky HR a tempových tréninkových zón. Běžecský výkon je závislý především na rychlosti běhu, hmotnosti běžce a sklonu terénu [4]. Nicméně může být ovlivněn i dalšími parametry, jako je výška běžce a s ní související odpor vzduchu a stoupání.

Výkon je již dlouhou dobu s úspěchem využíván v cyklistice [37], což také vedlo k myšlence tvorby podobného konceptu v jiných sportech. Při běhu je jeho měření značně obtížné a tato technologie se začala rozvíjet teprve v posledních několika letech. Tato metrika umožňuje sportovci v reálném čase přímo při běhu objektivně hodnotit zátěž, která je na organismus vyvíjena. Výkon je měřen ve watttech a podobně jako HR se pro účely běhu rozděluje do několika wattových zón.

Existuje několik modelů rozdělení běžecského výkonu do zón pro potřeby tréninku i závodu. U většiny z nich dochází k určení hranic jednotlivých wattových zón na základě kritického výkonu (CP). V závislosti na daném modelu jsou pak hranice určeny jako násobek CP. Toto procentuální dělení je založeno na schopnosti organismu udržovat daný výkon a odráží tak v sobě metabolické procesy organismu. Jako příklad můžeme uvést procentuální dělení zón na základě CP, odpovídající intenzity běhu, jeho klasifikaci a adaptaci organismu dle výrobců wattmetru Stryd - Tab. 1.

Tab. 1 Rozdělení běžecských výkonových zón dle procent z CP, převzato z [37]

Zóna	% z CP	Intenzita běhu	Cíl běhu	Adaptace
1	65–80	lehká	dlouhé běhy	zmnožení kapilár kardiovaskulární s. prevence zranění
2	80–90	střední	maraton	zmnožení kapilár kardiovaskulární s. prevence zranění
3	90–100	práh	10 km	laktátová tolerance
4	100–115	vysoká intenzita	5 km	aerobní výkon
5	115–130	VO <sub>2max</sub>	sprint	anaerobní výkon

Běh je komplexní pohyb odehrávající se ve třírozměrném prostoru a lze tedy popsat ve třech osách. Primárně dochází k pohybu dopřednému, běžec se ale také pohybuje ve vertikálním a horizontálním směru. Tělo také při běhu rotuje ze strany na stranu podél

vlastní osy. Ke všem pohybům je zapotřebí vykonat mechanickou práci a té je nejvíce vykonáno při pohybu dopředném a vertikálním. Mechanická práce vykonaná při běhu lze rozdělit na pozitivní a negativní. Negativní část je vykonána prostředím působícím na běžce a jedná se o působení gravitační síly a odpor prostředí. Pozitivní část práce vykonává běžec působením na okolní prostředí, jde například o odraz od podložky. Jelikož je běh cyklický pohyb, při jeho konstantní rychlosti je vykonaná mechanická práce v ukončeném cyklu běhu při zanedbání ztrát rovna nule. Pozitivní práce umožňuje při běhu pohyb, veškerou pozitivní práci při běhu vytváří běžec. Proto se jí využívá k výpočtu běžeckého výkonu. [15; 10]

Vzhledem k běhu se hovoří o dvou typech výkonu, metabolickém a mechanickém.

### **3.2.1 Mechanický výkon**

Výkon vykonávaný běžcem vzhledem k okolnímu prostředí je nazýván mechanický výkon. Je definován jako práce vykonaná za sekundu a je měřený ve wattech [38; 10]. Jinými slovy, jde o mechanickou energii vyvinutou za jednu sekundu běžcem na okolní prostředí. Existuje velmi jednoduchý model k jeho výpočtu. Lidské tělo si pro tento účel lze představit a zjednodušit ho jako jeden hmotný bod. Tímto způsobem lze jednoduše popsat jeho interakce s okolním prostředím. Mechanický výkon lze spočítat jako součet potenciální a kinetické energie, tedy práce, hmotného bodu v čase. Tento způsobem popisu je ale velmi zjednodušený a neodpovídá realitě. Již nelze popsat pohyb končetin a svalů vzhledem k tělu běžce. Proto, abychom lépe porozuměli, kde konkrétně výkon vzniká, působí a jak se v průběhu cyklu běhu mění, je zapotřebí chápat tělo běžce jako soustavu jednotlivých segmentů propojených klouby. Pro tento účel se využívá kinematická analýza, sledování pohybu jednotlivých segmentů, a silové plošiny, zjištění sil působících v místě kontaktu běžce s podložkou. Svaly vytváří momenty síly, které mají za následek rotaci v kloubech. V tomto modelu začínáme měřením reakčních sil chodidla s podložkou a výpočtem točivého momentu v kotníku. Ten lze spolu s úhlovou rychlostí v kotníku využít k výpočtu momentu síly v kotníku. Obdobným způsobem můžeme pokračovat pro výpočet sil v kolenu a v kyčli [38]. V tomto případě můžeme lépe popsat celkový pohyb běžce. [10; 38]

Mechanický výkon může být vhodný pro analýzu pohybu a interakci běžce s okolním prostředím. Lze ho využít například pro biomechanickou analýzu nebo tvorbu vhodné běžecké obuvi. Ve sportu je však využíván hlavně pro svou vazbu na metabolickou zátěž organismu. Je totiž většinou oproti vhodným biomarkerům snadněji měřitelný a pokud je v daném sportovním odvětví dobře popsán jeho vztah k metabolickým procesům v organismu, dobře je reprezentuje. [10; 38; 34; 39]

### **3.2.2 Metabolický výkon**

Druhým typem výkonu je výkon metabolický. V tomto případě jde o výkon pohybového aparátu za sekundu a je opět měřený ve wattech [38]. Jde tedy o množství energie, které

organismus spotřebuje při běhu a která je k tomuto pohybu potřebná. Měření běžeckého výkonu ve wattech je tedy vyjádření energie spotřebované běžcem za jednotku času. Metabolický výkon reprezentuje zatížení organismu a práci jím vykonanou. Odráží rychlost hydrolýzy ATP potřebnou k vykonání pohybu běhu v daném okamžiku v čase, nebo též termodynamicky vyjadřuje množství ATP spotřebované k provedení svalové práce při běhu. To lze definovat jako součet příspěvků všech energetických systémů, které při běhu zajišťují ve svalech syntézu ATP. V konkrétním okamžiku běhu jsou si dodávka a poptávka ATP rovny. Příspěvek každého energetického systému se však liší. Určení metabolického výkonu pomocí jedné složky energetického systému, například pomocí spotřeby kyslíku, bude tady nepřesné [40]. [41]

Metabolický výdej lze přesně počítat v laboratoři pomocí přímé kalorimetrie. Metoda je založena na měření tepla, které vyprodukuje lidský organismus. Jelikož je tato metoda nákladná, v praxi se využívá neinvazivní nepřímé kalorimetrie. Tato metoda umožňuje odhad metabolického výdeje pomocí měření spotřeby kyslíku a tvorby oxidu uhličitého organismem. Je zde využíváno znalosti, že spotřeba nebo produkce určitého množství zmíněných plynů vyžaduje spotřebu určitého množství energie. Jelikož je nepřímá kalorimetrie založena na měření dechových plynů, lze pomocí ní odhadnout pouze procesy aerobního charakteru. Při běhu lze dechové plyny měřit pomocí analyzátorů plynů, ale metabolický výkon lze odhadovat pouze z hodnot naměřených při ustálení stavu měřených veličin. Jinými slovy musíme zajistit, aby běžec při běhu běžel určitým tempem nebo rychlostí, dokud nedojde k ustálení sledovaných parametrů. Bez kalorimetrie lze metabolický výkon odhadovat na základě empirických znalostí a vzorců běhu. [42; 43; 38]

### **3.2.3 Vztah mezi mechanickým a metabolickým výkonem**

K vykonání určitého mechanického výkonu je zapotřebí určitého metabolického výkonu organismu. Vztah mezi nimi je však v každém sportu jiný, neboť je závislý na konkrétním pohybu. Tento vztah udává účinnost, která je obecně vnímána jako poměr mechanického a metabolického výkonu [44; 14]. Ve sportu je však téměř nemožné správně změřit oba typy výkonu, a proto se zde hovoří spíše o optimalizaci nebo ekonomice daného pohybu. Časté vyjádření téhož také bývá pouze výkon v konkrétním sportu, v běhu je to běžecký výkon. Tyto pojmy lze chápat jako efektivita vykonávaného pohybu. V různých sportech je definována a chápána v jiném kontextu a s různými rozdíly. Například v cyklistice je chápána jako poměr vykonané práce a celkového metabolického výdeje [45] a udává se, že je její hodnota 25 % [37]. Velmi zjednodušeně měřenému mechanickému výkonu by odpovídal čtyřikrát větší metabolický výkon. Zde také dochází k problému měření celkového metabolického výdeje organismu, ten totiž bývá často vyjadřován spotřebou kyslíku ( $VO_2$ ). Obecně se hodnota efektivit liší napříč definicemi a závisí na její konkrétní interpretaci. Z velké části je závislá na efektivitě kontrakce svalových vláken, ale tato hodnota je poměrně obtížně měřitelná, neboť se na ní podílí mnoho faktorů na

buněčné úrovni a pro její kvantifikace je třeba přesně popsat a měřit reakce na buněčné úrovni [44]. Je také závislá na vykonávaném pohybu a jeho biomechanice.

V oblasti běhu se můžeme setkat s různými definicemi běžeckého výkonu. Jeden z jejich možných výkladů je metabolická energie spotřebovaná na jednotku vzdálenosti, další pak energie potřebná pro běh v určité submaximální rychlosti [20]. Tato druhá definice v sobě odráží také pojem běžecká ekonomika (RE). Na definici RE se již většina odborné literatury shoduje [46; 47; 48]. Není však doposud jasné, jaké proměnné se na určování RE podílejí, případně jakou mírou. RE bývá často vyjadřovaná v jednotkách spotřeby kyslíku (ml/kg/min) nebo v jednotkách energie (W/kg, případně J/kg/min). Jelikož je účinnost poměr výkonu a výkonu, je to veličina bezrozměrná. Zde dochází k částečnému oddělení RE od účinnosti. Bylo zjištěno, že se RE může lišit až o 30 % pro běžce, jenž mají stejnou hodnotu  $VO_{2max}$  [20]. To může být způsobeno tím, že někteří běžci jsou více efektivní při stejném množství vykonané mechanické práce, ale její vykonání je pro ně metabolicky méně náročné. To znamená, že při běhu dokážou dosáhnout například větší absorpce energie při dopadu a tu pak při odrazu efektivněji využít. Na druhou stranu RE může být lepší, protože je vykonáno méně mechanické práce při běhu danou rychlostí a stejné účinnosti. [38]

Jelikož je pohyb při běhu vykonáván oproti cyklistice poměrně variabilně, dochází zde k větším nuancím v trajektorii pohybu běžce a jeho dolních končetin napříč cykly běhu, je vztah mezi oběma výkony více komplexní. Protože svaly dokážou produkovat maximální sílu kontrakce při optimální délce svalového vlákna, je účinnost závislá na délce kroku a povrchu, po kterém se běží [49]. Liší se také tím, jaké množství energie je v každém cyklu běhu absorbováno a jak je dále absorbovaná energie zpětně využita. Efektivita absorpce sil je vyšší než 25 % [38]. Díky těmto závislostem může být efektivita při běhu vyšší než 25 %. Její hodnota se vzhledem k mechanické energii v čase mění a neodráží tedy přesně metabolický výkon. Pro kvantifikaci metabolické zátěže organismu pomocí mechanického výkonu je tedy zapotřebí použít sofistikovanější vztah, než je pouze jejich poměr.

Metabolická zátěž organismu, jeho spotřeba a trénovanost lze ve vytrvalostních sportech dobře vyjádřit parametrem ( $VO_{2max}$ ). Vyjadřuje totiž kardiovaskulární kapacitu organismu, na které se podílí mnoho metabolických faktorů, jenž ovlivňují schopnost organismu efektivně využít metabolickou energii [50]. Mezi ně patří kapacita plic a jejich schopnost difuze, tedy průchodu plynů skrze jejich membránu, schopnost kardiovaskulárního systému zásobovat pracující svaly krví a dostatečný počet kapilár v nich, schopnost červených krvinek transportovat kyslík ( $O_2$ ) a oxid uhličitý ( $CO_2$ ) a v neposlední řadě energetický metabolismus jednotlivých svalových buněk. Pokud k  $VO_{2max}$  v běhu přidáme ještě RE, dosáhneme velmi dobrého deskriptoru běžce a jeho schopnosti podávat vytrvalostní výkony [51]. Pokud bychom měli přístroj dostatečně přesný a neomezující běžce při jeho výkonu, podávající informace o  $VO_{2max}$  a RE,

dokázali bychom poměrně přesně kvantifikovat a hodnotit metabolickou zátěž organismu běžce a určovat tak vhodná tempa pro nejlepší výkony.

### **3.2.4 Kritický výkon**

Kritický výkon (CP), nebo též funkční prahový výkon, je definován jako nejvyšší možný výkon udržitelný po dobu 60 minut [34]. CP určuje hranici mezi ustáleným stavem organismu během běhu, tzv. steady-state, a stavem, ve kterém dochází k vyvedení energetického metabolismu z rovnováhy. V tuto chvíli dochází k převaze anaerobního metabolismu nad metabolismem aerobním. Tento bod bývá též označován jako druhý ventilační práh (VT2) anebo druhý laktátový práh (LT2) [52]. V případě laktátu jde o nejvyšší dosažený výkon předcházející exponenciálnímu vzrůstu koncentrace laktátu v krvi a jeho dalšímu hromadění [53]. V případě ventilačního prahu jde o výkon, při kterém dojde ke zvýšení produkce CO<sub>2</sub> nad spotřebu O<sub>2</sub> [52]. CP je velice důležitý bod pro všechny vytrvalostní sporty. Je tomu tak kvůli schopnosti organismu udržovat homeostázu a zachovávat aerobní metabolismus a efektivně dodávat potřebné substráty do pracujících svalů. Pokud dojde k vychýlení z tohoto kvazi-ustáleného stavu, a tedy překročení CP, začne se v krvi sportovce hromadit laktát a postupně dojde k vyčerpání organismu. Sportovec dokáže podávat výkon za hranicí CP jen po poměrně omezenou dobu. [34]

Existuje velká škála testů určujících CP sportovce. Mezi nejpřesnější, ale zato poměrně náročné, patří 60minutový test. Běžec běží nejvyšší možnou rychlostí, kterou je chopen udržet po dobu 60 minut. Průměrný dosažený výkon pak odpovídá CP. Jednodušší a častěji využívaný test je pouze 20minutový. Běžec také běží maximální možnou rychlostí ale pouze 20 minut. CP je pak určen jako 93,7 % z dosaženého průměrného výkonu [34].

V současnosti není řádně prozkoumán vztah mezi běžeckým CP a VT2, respektive LT2. Není tedy známo, zda je tento zlomový bod v energetickém metabolismu organismu konceptem CP v běhu dobře reprezentován.

## 4. BĚŽECKÉ WATTMETRY

Jde o zařízení schopné, na základě matematických modelů aplikovaných na různé měřené parametry, kvantifikovat běžecký výkon (PO) běžce. Na trhu se v poslední době objevilo několik systémů schopných měřit PO [5].

Mezi nejjednodušší systém určování běžeckého výkonů patří algoritmus v chytrých hodinkách, který využívá pouze data získaná ze samotných hodinek. Příkladem jsou běžecké hodinky od firmy Polar uvedené na trh po roce 2018.

O něco sofistikovanější způsob je algoritmus v hodinkách využívající také data o běžecké dynamice získaná z dalšího zařízení. V případě společnosti Garmin hodinky využívají data z hrudního pásu nebo ze zařízení Running Dynamics Pod umístěného v místě těžiště běžce.

Další systémy využívají samostatná zařízení umístěná na noze běžce, takzvané foot pods. Jde o inerciální senzory, mezi něž patří systém RunScribe nebo běžecký wattmetr Stryd.

Nejlepších výsledků dle Cerezuela-Espejo et al. [5] dosahuje běžecký wattmetr Stryd.

### 4.1 Stryd

Běžecký wattmetr Stryd je malé zařízení částečně vyrobeno z uhlíkových vláken vážící 8 g (verze 2022) a je zobrazen na Obr. 4. Zařízení se skládá ze samotného snímače a z klipu, který drží snímač připevněný ke tkaničkám obuvi. Umožňuje připojení k ostatním zařízením pomocí technologie Bluetooth a ANT+. Baterie umožňuje zaznamenávání aktivity pro 20 a více hodin běhu. Obsahuje tříosý akcelerometr, který umožňuje měřit zrychlení ve třech osách a tříosý gyroskop, který umožňuje měření úhlových rychlostí ve třech osách. Kombinací těchto dvou senzorů vzniká šestiosý inerciální senzor. Se vzorkovací frekvencí 1000 Hz dokáže tento senzor se 6 stupni volnosti měřit horizontální, vertikální a laterální zrychlení a také úhlovou rychlost otáčení kolem horizontální, vertikální a laterální osy. Wattmetr Stryd (verze 2019 a novější) obsahuje také senzor pro měření odporu vzduchu díky kterému je při výpočtu výkonu brán v potaz i výkon nutný pro překonání odporu větru. Nejnovější verze wattmetru (verze 2022) obsahuje také senzor teploty a vlhkosti, které umožňují zaznamenávat aktuální podmínky prostředí a brát je v potaz při výpočtu CP nebo predikcí pro závody. Cena nejnovější verze wattmetru je €269. [54]

V této práci byl použit wattmetr Stryd verze 2019, číslo modelu: 21, verze firmware 2.1.16, verze software 4.





Obr. 4 Wattmetr Stryd [55]

Nejdůležitější součástí wattmetru je inerciální senzor, který umožňuje určení polohy v prostoru. Tato myšlenka vychází z předpokladu, že první integrace zrychlení dle času je rychlost v čase, jeho druhá derivace dle času je pozice v čase. Díky této znalosti můžeme ze změn rychlosti a pozice wattmetru během cyklu běhu modelovat vertikální a horizontální síly (stranový pohyb můžeme zanedbat kvůli jeho malému příspěvku do celkového silového působení při běhu). Dopředný výkon je funkcí dopředné síly, tedy horizontální, vertikální výkon je funkcí vertikální síly. Součtem těchto výkonů a výkonu potřebnému k překonání odporu prostředí (senzor větru) je celkový běžecký výkon.

#### 4.1.1 Princip výpočtu výkonu

Dopředný pohyb může být kvantifikován na základě okamžitých změn kinetické energie. Ty určuje rychlost a horizontální složka reakční síly země v každém okamžiku běžeckého cyklu. Hybnost v tomto směru je v čase proměnná a běžec ji získává během odrazu, a naopak ztrácí při dopadu. Se změnou hybnosti souvisí i změna rychlosti a na základě určení maximální a minimální rychlosti během jednoho cyklu a hmotnosti běžce může wattmetr spočítat změnu kinetické energie v daném cyklu. Na základě změn kinetické energie Stryd počítá výkon běžce v horizontálním směru. Větší rychlost nebo brzděné síly mají za následek větší změnu, a tedy i větší výkon. Stryd měří změnu dopředné rychlosti s 95 % přesností [10]. [34; 10]

Vertikální pohyb lze kvantifikovat na základě okamžitých změn potenciální energie, které lze vypočítat z vertikálních změn polohy těžiště běžce. Tento pohyb je prováděn proti gravitaci, a proto není při běhu příliš žádoucí ve větším rozsahu. Změny polohy těžiště ve vertikálním směru můžeme určit pomocí vertikální složky reakční síly země. Tato síla lze spočítat dle druhého Newtonova zákona jako násobek zrychlení ve vertikálním směru a hmotnosti běžce. Stryd dokáže modelovat profil této síly s 95 % přesností [10]. Ke správnému určení polohy těžiště je nutné znát výšku běžce. Průměrná

chyba měření amplitudy vertikální oscilace pomocí wattmetru Stryd je 3,18 % [10]. Z těchto údajů Stryd počítá vertikální výkon.

Pro výpočet běžeckého výkonu je také důležitý údaj o době trvání letové fáze mezi kroky, respektive době kontaktu nohy se zemí. Běžec může na zem působit silou právě tehdy a pouze pokud je se zemí ve fyzickém kontaktu. Chyba v měření doby kontaktu se zemí pomocí wattmetru Stryd je 2,83 % [10].

Z výše popsaného plyne, že Stryd měří pozitivní část mechanické energie běhu, tedy energii běžce působící proti okolnímu prostředí. Celkový výkon je tedy spočítán jako časová derivace součtu změn kinetické a potenciální energie. [34; 10]

#### 4.1.2 Metriky poskytované wattmetrem Stryd

Kromě výkonu umožňuje Stryd sledování dalších parametrů, ať už jde o výsledky mezikroků pro výpočet PO nebo úplně odlišných údajů, které se zdají být zásadní pro kvalifikaci běžců nebo určování RE. Jejich přehled je v Tab. 2.

Tab. 2 Veličiny měřené wattmetrem Stryd

Veličina	Jednotka	Popis
Běžecký Výkon (PO)	W/kg	Vyjadřuje intenzitu běhu a zátěž vyvíjenou na organismus.
Form Power (FP)	W	Výkon vyvíjený ve vertikálním směru.
Form Power Ratio (FPR)	-	Poměr výkonu vyvíjeného ve vertikálním směru a celkového výkonu.
Ground Contact Time (GCT)	ms	Dobu kontaktu nohou se zemí. Čím kratší tato doba je, tím rychleji a efektivněji dokáže běžec vyvinout síly potřebné k odrazu.
Leg Spring Stiffnes (LSS)	kN/m	Znázorňuje model chování elastické energie v nohách běžce jako pružiny, při dopadu se akumuluje a při odrazu využívá. Vhodný pro klasifikaci běžců RE kvůli své vysoké korelaci s ní. Jeho dlouhodobým sledováním můžeme pozorovat změny v mechanice běhu. Čím vyšší hodnota LSS, tím vyšší RE.
Vertical Oscilation (VO)	cm	Pohyb těžiště ve vertikálním směru. Také souvisí s RE. Čím menší VO, tím vyšší RE (menší spotřeba energie pro pohyb ve vertikálním směru).
Tempo Běhu	min/km	Doba potřebná k uběhnutí 1 km při aktuální rychlosti běhu.
Vzdálenost	m	Uběhnutá vzdálenost.
Kadence (CD)	spm	Počet kroků za 1 minutu běhu.
Air Power (AP)	%	Aktuální podíl výkonu potřebného pro překonání odporu větru.

Uběhnutá vzdálenost, tempo běhu a CD lze měřit i pomocí GPS ale většinou s horší přesností.

Velmi důležitým a užitečným parametrem je CP. Stryd umožňuje automatické dopočítávání CP běžce algoritmem pomocí matematického modelu na základě naměřených tréninkových a závodních dat. Do těchto výpočtů jsou zahrnuty pouze údaje získané v posledních devadesáti dnech. Odhad CP pomocí tohoto modelu je validní pouze v případě, že se v okně daných devadesáti dní nachází dostatečné množství dat různých výkonových úrovní. Musí v něm být zastoupené běhy v maximálním a submaximálním úsilí a škála časově různě dlouhých běhů. Prakticky to znamená výskyt krátkých rychlých běhů s dobou trvání 10-30 sekund, běhů o střední intenzitě a vzdálenosti 5 - 10 km, a běhů dlouhých, minimálně 50 min, o nižší intenzitě, půlmaraton, maraton. V mobilní aplikaci lze tuto možnost automatického výpočtu vypnout a zadat hodnotu CP ručně, nebo lze využít protokoly pro testování CP a naměřené hodnoty do aplikace manuálně zadat. V tom případě bude CP spočítáno pouze na základě zadaných údajů a nebude se průběžně měnit se změnou výkonnosti jedince. Výrobci doporučují využít možnost auto kalkulace CP. [56]

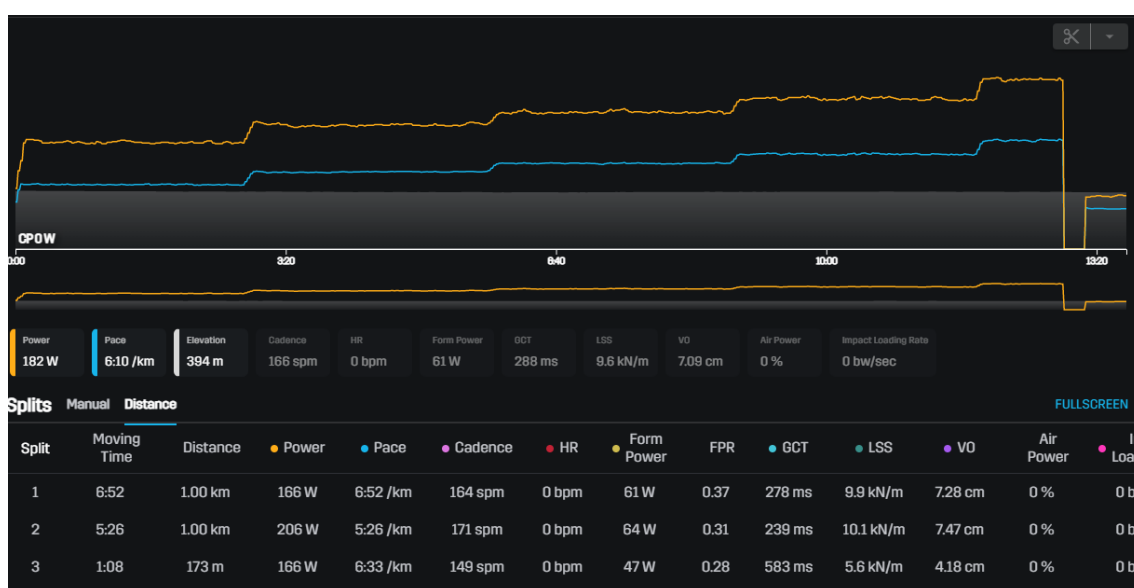
#### **4.1.3 Použití wattmetru Stryd**

Wattmetr lze díky mobilní aplikaci Stryd dostupné pro Android a iOS spárovat s mobilním telefonem. V aplikaci lze nastavit potřebné parametry, jako je hmotnost a výška sportovce. V této aplikaci lze také spravovat aktualizace firmwaru a synchronizovat a stahovat údaje zaznamenané wattmetrem. Aktivity již synchronizované je možné v aplikaci také zobrazit a analyzovat. Dále je k dispozici také webová aplikace Power Centre sloužící pro zobrazení a analyzování uložených aktivit, viz Obr. 6. V aplikaci je možné zapojení do členského programu a poté jsou členům k dispozici tréninkové plány.

Použití wattmetru Stryd při běhu je velmi jednoduché, stačí ho pomocí klipu připevnit na tkaničky běžecké obuvi, zobrazeno na Obr. 5. Wattmetr se pohybem automaticky aktivuje a začne zaznamenávat aktivitu. Pokud chceme sledovat měřené údaje v reálném čase, musíme wattmetr spárovat s mobilní aplikací a zahájit aktivitu Live run, nebo můžeme wattmetr připojit k podporovaným zařízením. Těmi jsou nejčastěji chytré hodinky, lze ho ale také připojit k různým jiným platformám a zařízením, jako je VO2 Master. [54]



Obr. 5 Připevnění wattmetru Stryd na obuv [57]



Obr. 6 Záznam jednoho testu v prostředí webové aplikace Power Centre

## 4.1 RunScribe

Jedná se o komplexní systém sloužící k analýze chůze a běhu. Díky sadě dvou snímačů, které se připevňují na tkaničky obuvi systém disponuje možností analýzy stranové symetrie. Senzor obsahuje 6osý pohybový senzor, který zaznamenává informace se

vzorkovací frekvencí 500 Hz. Systém RunScribe určuje parametry Stride Rate, Contact Time, Flight Ratio, Footstrike Type, Pronation, Pronation Velocity, Impact Gs, Braking Gs, Symmetry a Power. Pro jeho vlastnosti ho kromě sportovců využívají také laboratoře chůze, fyzioterapeuti nebo podiatristé. Cena sady dvou snímačů je \$599 a jsou zobrazeny na Obr. 7. [58]



Obr. 7 Systém RunScribe [59; 60]

## 4.2 Garmin technologie pro měření běžecké dynamiky

Společnost Garmin pro měření běžecké dynamiky využívá, kromě údajů z hodinek, hrudní pásy HRM-Pro™, HRM-Pro™ Plus, HRM-Run™, HRM-Tri™, nebo Running Dynamics Pod (Obr. 8). Senzory odesíláním měřených hodnot do hodinek přes rozhraní ANT+ nebo bluetooth umožňují přesnější výpočet běžeckého výkonu. Ten je možný v některých hodinkách od společnosti Garmin získat pouze na základě hodnot měřených samotnými hodinkami. Senzory měří parametry CD, GCT, SL – délka kroku, GCT Balance – poměr GCT jednotlivě pro obě nohy, VO a VO Ratio – poměr VO a SL v procentech. [62]



Obr. 8 Running Dynamics Pod [61]

## 5. METODIKA MĚŘENÍ

Jako teoretická východiska pro práci s wattmetrem Stryd byly použity články z vyhledávače v elektronických databázích Google Scholar a z databáze Web of Science. Do vyhledávacího pole bylo zadáno heslo „stryd running power meter“. Brány v potaz byly pouze ty články, která byly publikovány v roce 2018 nebo později, byly veřejné nebo dostupné přes instituci VUT a měření probíhalo při běhu. Poslední kritérium bylo, aby jedna ze sledovaných metrik byla spotřeba kyslíku  $VO_2$  a aby byl článek relevantní pro tuto práci.

Na základě této rešerše byly stanoveny vhodné metody a přístroje potřebné k řešení cílů práce.

Dle Cerezuela-Espejo et al. [5] je nejvalidnější komerčně dostupný běžecký wattmetr (testovaná zařízení byla: Stryd, Runscribe, Garmin Running Power a Polar Vantage V) právě Stryd, a to ve venkovní i vnitřním prostředí. Dle této studie je vztah mezi PO a  $VO_2$  velmi silný a téměř lineární s korelačním koeficientem  $r = 0,91$ . Imbach et al. [63] dále ukázal, že wattmetr Stryd měří validně PO, GCT a LSS. V tomto případě byl nalezen pozitivní korelační vztah mezi PO a  $VO_2$  s koeficientem  $R^2 = 0,82$ . Nejvyšší míru korelačního vztahu mezi PO a  $VO_2$  uvádí výrobci [10]  $R^2 = 0,96$ . Na druhou stranu Aubry et al. [6] měl svou studií zjistit korelační vztah PO a  $VO_2$  s hodnotou  $r = 0,29$ . V další studii [64] byl zjištěn korelační koeficient  $r \sim 0,6$  ale v tomto případě se vztah lišil při různých rychlostech. Avšak byla potvrzena rychlá odezva výkonu na změnu úsilí běhu, kterou fyziologické metriky jako  $VO_2$  nemají.

V dalších studiích [7; 64; 6] byly popsány vzorce determinace vztahu ekonomiky běhu. Ukázalo se například, že nižší hodnoty GCT,  $VO_2$  a VO, a naopak zvýšení PO, W/kg a délky kroku mohou určit rychlejší a ekonomičtější běžce.

### 5.1 Testový protokol

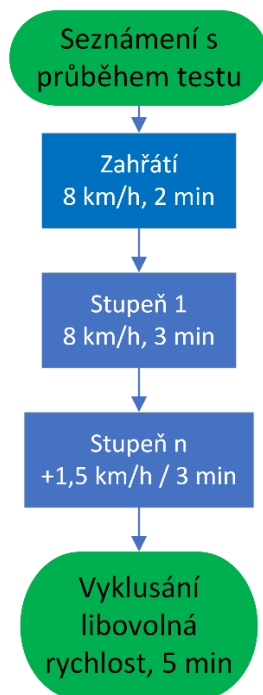
Pro testování ve vnitřním prostředí byl vybrán test na běhátku. Zvolený test je modifikací testu provedeného výrobcem [17; 42]. Jde o standardizovaný stupňovitý test s délkou trvání jednoho stupně tři minuty a zvyšováním rychlosti o 1,5 km/h. Tento test byl zvolen kvůli potřebě dosáhnout ustálených stavů PO. Test začínal rychlostí 8 km/h a trval až do volního vyčerpání. Testu předcházelo pětiminutové rozeběhání na rychlosti 8 km/h a po jeho skončení následovalo vyklusání v režii testovaného jedince. Po celou dobu testu byl nastaven sklon běhátka na 1 %, který nejvíce napodobuje běh v přirozeném prostředí [43].

Testování ve venkovním prostředí mělo co nejvíce napodobovat testování ve vnitřním prostředí. Proto byl zvolen podobný stupňovitý testovací protokol se délkou trvání stupně tři minuty a zvyšováním rychlosti o 1,5 km/h. Testu opět předcházelo pětiminutové

rozehřátí na rychlosti 8 km/h a po jeho skončení následovalo vyklusání v režii testovaného jedince.

Průběh testů je znázorněn na Obr. 9.

Pro účely této práce je považovaná změřená hodnota  $VO_{2peak}$ , v případě že nebyla dosažena hodnota  $VO_{2max}$ , za hodnotu  $VO_{2max}$ .



Obr. 9 Grafické znázornění průběhu testů

### 5.1.1 Testované osoby

Testování se zúčastnilo 26 testovaných osob (TO), z nichž byly 4 ženy a 22 mužů. Pro tuto práci se nenašlo více dobrovolníků z řad žen, proto je zde nesoulad v počtu žen a mužů. Všichni účastníci byli rekreační běžci na různé úrovni výkonnosti. Někteří se kromě běhu věnovali také jiným sportům. Průměrný věk žen byl  $33,75 \pm 6,18$  let, průměrná hmotnost  $64,75 \pm 1,70$  kg, průměrná výška  $170,25 \pm 5,18$  cm a průměrné  $VO_{2max}$   $42,47 \pm 1,76$  ml/kg/min. Průměrný věk mužů byl  $31,81 \pm 9,04$  let, průměrná hmotnost  $77,42 \pm 10,14$  kg, průměrná výška  $179,72 \pm 6,45$  cm a průměrné  $VO_{2max}$   $52,93 \pm 6,57$  ml/kg/min. Z toho vnitřní měření absolvovalo 26 TO a venkovní měření absolvovalo 13 TO.

Všichni účastníci měření podepsali informovaný souhlas, který byl součástí podané žádosti projektu bakalářské práce pod č.j. 1/2023 a následně schválený Etickou komisí CESA VUT v roce 2023. Účastníci byli informován, aby 24 hodin před oběma testy nevykonávali žádnou fyzicky náročnou aktivitu a aby se vyvarovali chování, které je v rozporu se zdravou životosprávou (konzumace alkoholu).

### 5.1.2 Sledované parametry

Po celou dobu testu byly o testované osobě zaznamenávány následující parametry: srdeční frekvence, spotřeba kyslíku ( $VO_2$ ), běžecký výkon (PO) a ostatní parametry měřené wattmetrem Stryd. Pro správné nastavení použitých přístrojů byla před testem od každého účastníka zjištěna jeho hmotnost, výška a datum narození.

### 5.1.3 Použité přístroje

Pro měření srdeční frekvence byl využit hrudní pás Polar H10 od firmy Polar Electro, Finsko nebo hrudní pás TICKR od firmy Wahoo, USA. Běžecký výkon byl měřen pomocí přístroje Stryd power meter od firmy Stryd, USA (verze 2019). Spotřeba kyslíku byla měřena přenosným analyzátozem kyslíku VO2 Master od firmy VO2 Master Health Sensors Inc, Kanada (verze 2020). Testování v laboratoři probíhalo na běhátku Valiant sport, Lode B.V., Netherlands. Pro udávání tempa běhu na stadionu byla využita elektrická koloběžka a předjezdec.

Před začátkem testování byla ověřena správnost měření rychlosti běhátka i koloběžky na všech rychlostech užitých při testu.

Skutečná rychlost běhátka byla spočtena jako podíl délky pásu a času potřebného pro jeho jedno otočení. Poté byl na datech skutečné a udávané rychlosti proveden dvouvýběrový párový t-test s p-hodnotou 0,452. Mezi skutečnou a udávanou hodnotou rychlosti běhátka tedy není na hladině významnosti  $\alpha = 0,5$  statisticky významný rozdíl.

Skutečná rychlost elektrické koloběžky byla spočtena jako podíl délky atletického oválu (400 m) a času, za který tuto dráhu koloběžka jedoucí konstantní rychlostí ujela. Konstantní rychlost koloběžky byla zajištěna zabudovaným tempomatem. Na data byl aplikován dvouvýběrový párový t-test na hladině významnosti  $\alpha = 0,5$ . P-hodnota testu je 0,062, a tedy mezi skutečnou a udávanou hodnotou rychlosti koloběžky není statisticky významný rozdíl.

## 5.2 Sběr dat

Sběr dat probíhal podle výše uvedených testových protokolů a s výše uvedenými přístroji na dobrovolně se účastnících zdravých jedincích. Nejprve byl vždy proveden test ve vnitřním prostředí a poté s rozstupem 14 až 68 dní ve vnějším prostředí. Tento rozstup je zde kvůli nepříznivému počasí ve venkovním prostředí (viz níže). Práce byla vytvářena v zimním a jarním období.

Testování probíhalo v laboratoři CESA VUT v Brně nebo na venkovním stadionu VUT v Brně. Před začátkem všech testů byly účastníci seznámeni s jejich průběhem a cílem.

Data měřená zařízením VO2 Master byly zaznamenávána do mobilní aplikace VO2 Master a ukládána na VO2 Master cloud. Data zaznamenaná do wattmetru Stryd byla po skončení testu nahrána do mobilní aplikace Stryd a poté nahrána do webové aplikace Power Centre.



Během testování na běhátku byly TO připoutány bezpečnostním popruhem.

Venkovní test probíhal za vhodného počasí, které bylo v souladu s doporučením pro používání přístroje VO2 Master. Venkovní teplota byla, kvůli provozním potřebám přístroje VO2 Master [65] (přístroj jinak nefunguje), minimálně 15 °C. Rychlost běhu testovaných osob po běžeckém ovále byla určována předjezdce na koloběžce. Pokud nebyly testované osoby schopni akceptovat rychlost předjezdce a vzdálili se od něho o více než 5 metrů, byl test ukončen.

## 6. ZPRACOVÁNÍ DAT

### 6.1 Export dat

Data naměřená zařízením VO2 Master nelze exportovat v surové podobě, ale pouze s určitým intervalem průměrování dat. Nejnižší možný interval průměrování je 1 sekunda, tato hodnota byla také zvolena pro export dat k dalšímu zpracování pro účely této práce. Data byla exportována z webové aplikace zařízení VO2 Master (<https://cloud.vo2master.com>) ve formě souboru Microsoft Excel (xlsx).

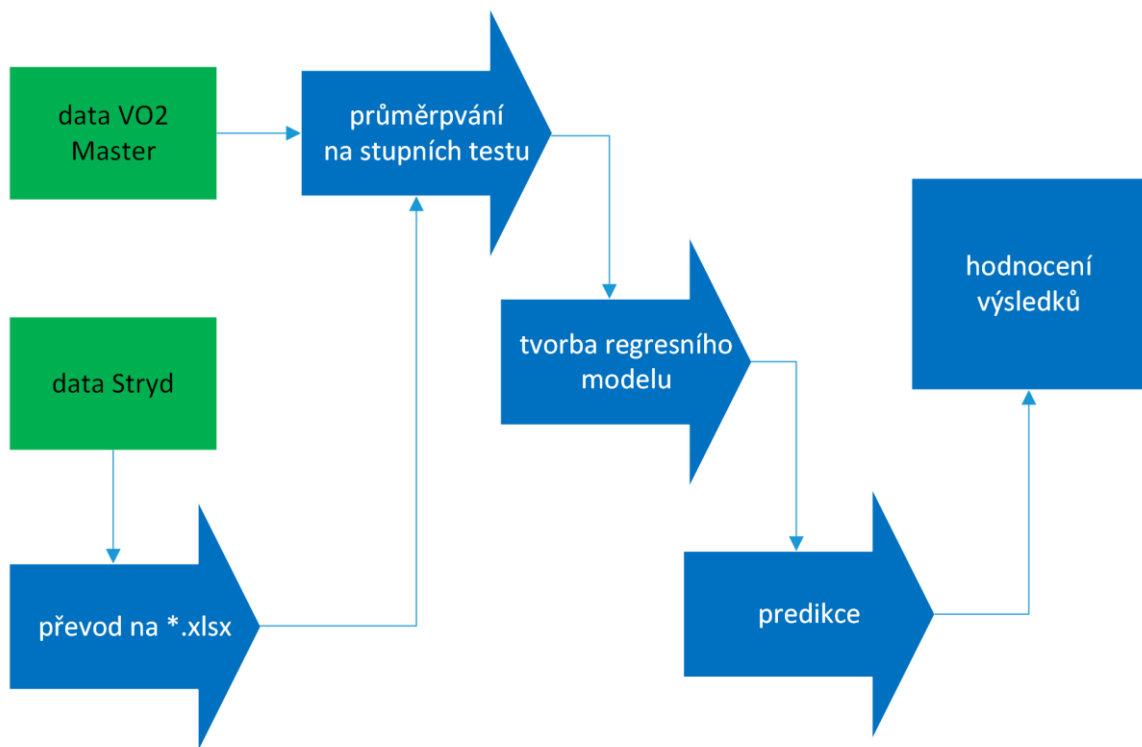
Data naměřená wattmetrem Stryd byla exportována v podobě FIT (\*fit) souboru z webové aplikace Power Centre (<https://www.stryd.com/powercenter>). Tyto soubory obsahují záznam každé 2 sekundy.

### 6.2 Předzpracování dat

Data byla po exportu dále zpracovávána pomocí programovacího jazyka Python (verze 3.11.3) v prostředí programu Spyder (verze 5.4.3).

Soubory FIT nejsou vhodné pro práci s daty, proto byla vytvořena funkce pro jejich převod do struktury DataFrame, ve které lze s daty vhodně pracovat.

Dále byla vytvořena funkce na předzpracování dat z obou přístrojů do vhodné podoby. Pro tuto práci byly využívány pouze data VO<sub>2</sub> a data měřená wattmetrem Stryd. Z jednotlivých stupňů testu byla, kvůli odstranění přechodových jevů, smazána první a poslední čtvrtina doby jeho trvání (v případě 3minutového stupně bylo odstraněno 45 sekund na jeho začátku a konci a k další úpravě využito pouze prostředních 90 sekund). Dále byla tato data na úrovni jednotlivých stupňů v testu (zbylé ustálené stavy PO) zprůměrována. Data ze stupně testu byla brána v potaz pouze pokud byla doba trvání daného stupně delší než 20 sekund. Na základě průzkumné analýzy dat bylo vytvořeno několik modelů pro popsání vztahu mezi VO<sub>2</sub> a PO, případně dalšími veličinami měřenými wattmetrem Stryd. Postup úpravy dat je na Obr. 10.



Obr. 10 Proces práce s daty v programovacím jazyku Python

### 6.3 Analýza dat

Výsledky analýz dat jsou zapsány ve formě *průměr ± směrodatná odchylka*.

Na datech PO a VO<sub>2</sub> byla provedena lineární regrese pro jednotlivé TO, její vizualizace pro jednu TO je na Obr. 11. Směrnice tvar přímky na Obr. 11 vypadá takto:

$$y = 14,4x - 4,85. \quad (6.1)$$

Pearsonův korelační koeficient  $r$  má hodnotu 0,97. Tento koeficient vyjadřuje sílu korelace mezi veličinami, hodnota 0,9 a vyšší znamená velmi silný korelační vztah [66]. Koeficient determinace  $R^2$  vyjadřující úspěšnost reprezentace VO<sub>2</sub> pomocí PO [67], nabývá hodnoty 0,96. Pro jednotlivé TO ve vnitřní prostředí je  $R^2 = 0,95 \pm 0,07$  a  $r = 0,97 \pm 0,04$ , ve vnějším prostředí je  $R^2 = 0,97 \pm 0,02$  a  $r = 0,97 \pm 0,03$ . Z charakteru dat pro jednotlivé TO vyplývá, že je vztah mezi PO a VO<sub>2</sub> během zátěžového testu lineární a zároveň statisticky významný, protože p-hodnota pro lineární vztah PO a VO<sub>2</sub> je nižší než hladina významnosti  $\alpha = 0,05$  (0,000) (pravděpodobnost, že je vztah mezi veličinami náhodný je 0.0 %). K popisu vztahu VO<sub>2</sub> a PO byly tedy vytvořeny lineární regresní modely, na jejichž základě byly určeny směrnice rovnice přímky zavislosti VO<sub>2</sub> na PO. Symbol  $x$  v rovnicích zastupuje běžecký výkon PO a symbol  $y$  spotřebu kyslíku VO<sub>2</sub>. Tyto modely byly následně využity k predikci hodnot VO<sub>2max</sub>.

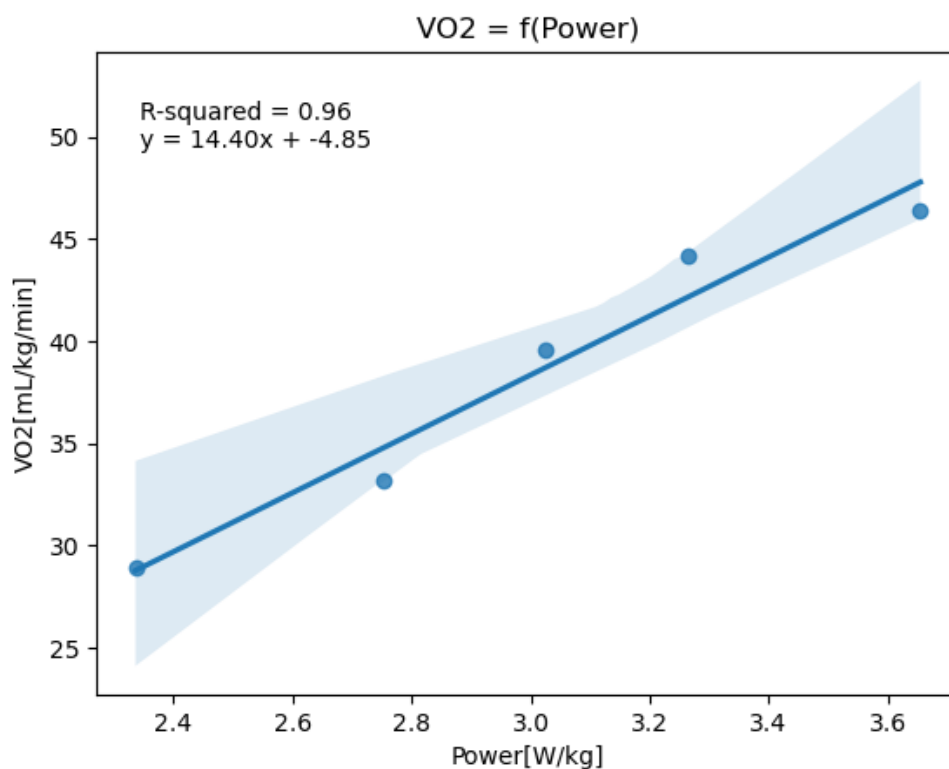
Pro ověření normality dat byl vždy použit Shapiro-Wilkův test s hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ , jehož nulová hypotéza je, že data pocházejí z normálního rozložení. Pokud je tedy p-hodnota menší než 0,05, data nemají normální rozložení. [68]

Pro zjištění, zda je mezi dvěma nezávislými skupinami bez přítomnosti normálního rozložení dat statisticky významný rozdíl byl použit Mann-Whitney U test. Jde o neparametrický nepárový dvouvýběrový test, který testuje nulovou hypotézu, že obě skupiny mají stejnou střední hodnotu. [69]

Pro určení přítomnosti statisticky významného rozdílu mezi predikovanými a reálnými hodnotami  $VO_{2max}$  s normálním rozložením byl použit párový t-test. Je to parametrický dvouvýběrový test testující nulovou hypotézu, že obě skupiny mají stejné průměrné hodnoty. [70]

Pro určení přítomnosti statisticky významného rozdílu mezi predikovanými a reálnými hodnotami  $VO_{2max}$  bez normálního rozložení byl použit Wilcoxon rank sum test. Je to neparametrický párový dvouvýběrový test testující nulovou hypotézu, že rozložení rozdílů mezi skupinami je symetrické kolem nuly. Zjišťuje tedy, zda obě skupiny pochází ze stejného rozložení. [71]

Pro zkoumání homogenity rozptylu mezi veličinami byl použit Levene test testující nulovou hypotézu, že obě veličiny pochází z výběru se stejným rozptylem. [72]



Obr. 11 Závislost  $VO_2$  na běžeckém výkonu jedné testované osoby

## 7. VÝSLEDKY

V této části práce je popsáno několik způsobů (lineárních modelů) pro hodnocení vztahu mezi  $VO_2$  a PO, případně dalšími veličinami měřenými wattmetrem Stryd. Každý z nich obsahuje popis vztahu mezi sledovanými veličinami a úspěšnost predikce hodnot  $VO_{2max}$  pomocí lineárních regresních modelů. Tyto modely predikují hodnoty  $VO_{2max}$  vždy pro prostředí, z něhož vycházejí. Modely vycházející z vnitřního prostředí navíc predikují hodnoty  $VO_{2max}$  pro vnější prostředí. Tato predikce je zde kvůli ověření platnosti laboratorních měření a aplikaci jejich výsledků na běžný tréninkový proces v přirozeném prostředí běžce. Dále je zde uvedeno porovnání vnitřního a vnějšího měření.

Pro predikci jsou ve všech případech použity stejné TO. Ty jsou ve vnitřním prostředí změřené v laboratoři nad rámec výzkumného vzorku stejnými přístroji, které byly použity v této práci. Při predikci z dat vnějšího měření pro vnější prostředí je rozdělen dataset na alespoň 3 testovací TO s alespoň 9 trénovacími TO. Pokud pro toto dělení nebyl dostatek dat, model nebyl vytvořen.

### 7.1 Model bez dělení

První model vychází ze všech dat získaných ve stejném prostředí najednou. Hodnoty PO získané ve vnějším prostředí nevykazují normální rozložení, ostatní ano. Data neměly normální rozložení ani po aplikaci Box-Cox transformace (mocninná transformace dat se zešikmeným rozložením [73]).

Pro predikci hodnot  $VO_{2max}$  byl zvolen model lineární regrese, která byla provedena na průměrech dat pro každý stupeň zátěžového testu. Pro vnitřní prostředí vypadá rovnice přímky regresního modelu takto:

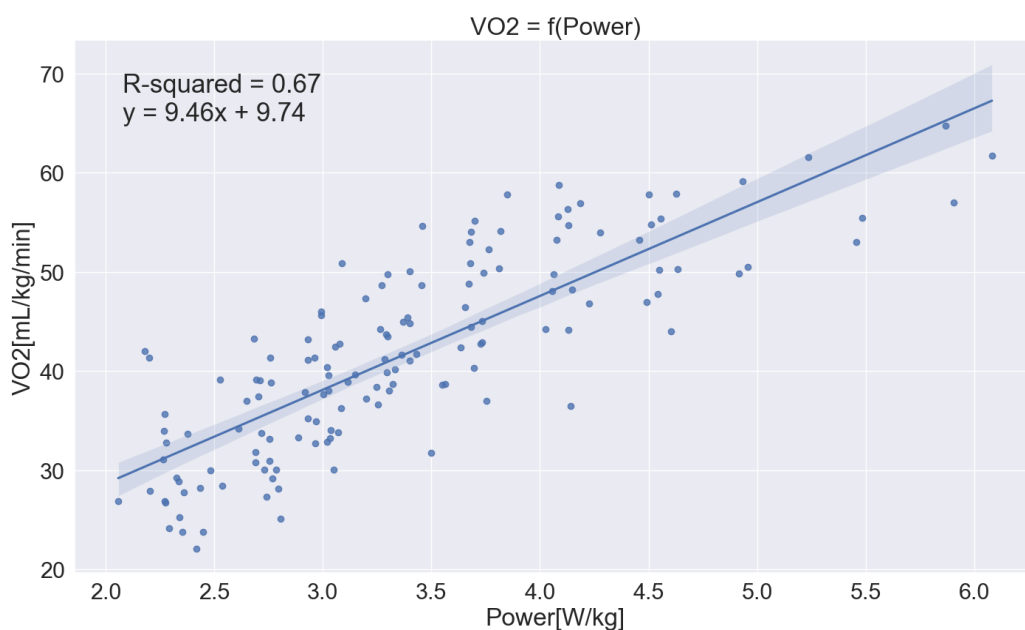
$$y = 9,46x + 9,74, \quad (7.1)$$

pro vnější takto:

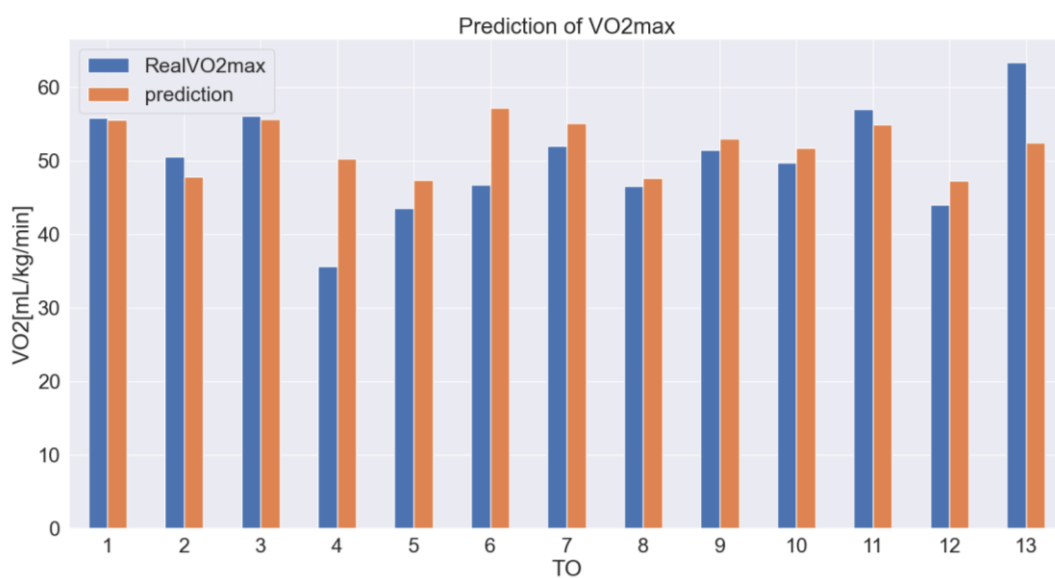
$$y = 11,41x - 3,93. \quad (7.2)$$

Koeficient determinace  $R^2$  modelu pro vnitřní prostředí má hodnotu 0,67 a pro vnější prostředí 0,79. Znamená to, že je v obou případech dobře vysvětleno množství rozptylu v datech  $VO_2$  pomocí PO [74]. Pearsonův korelační koeficient pro obě prostředí má hodnotu  $r = 0,81$ . Model z vnitřního prostředí je zobrazen na Obr. 12.

Predikované i reálné hodnoty  $VO_{2max}$  vykazují normální rozložení a byl na ně aplikován parametrický statistický test (t-test). Jeho výsledky, průměrné absolutní a procentuální chyby predikce jsou zobrazeny v Tab. 3. Můžeme říci, že neexistuje významný rozdíl mezi reálnými a predikovanými hodnotami  $VO_{2max}$  získanými těmito modely [70]. Vizualizací výsledků predikce modelu z vnitřního prostředí pro vnější prostředí je Obr. 13.



Obr. 12 Regresní model bez dělení, vnitřní měření



Obr. 13 Predikce hodnot  $VO_{2max}$  modelem z vnitřního prostředí pro vnější prostředí, model bez dělení

Tab. 3 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou  $VO_{2max}$ , modely bez dělení

Model vytvořený z dat prostředí	Predikce pro prostředí	Průměrná absolutní chyba [mL/kg/min]	Procentuální odchylka [%]	p-hodnota t-testu
vnitřního	vnitřní	5,428	5,78	0,122
vnitřního	vnější	4,329	3,51	0,315
vnějšího	vnější	8,292	16,38	0,166

## 7.2 Model rozdělení dle pohlaví

V tomto modelu pro analýzu dat bylo použito rozdělení dat na dvě skupiny, muže a ženy. Data PO nevykazovala normální rozložení. Data neměly normální rozložení ani po aplikaci Box-Cox transformace. Proto byl pro určení přítomnosti rozdílu mezi skupinami použit Mann-Whitney U test, jehož p-hodnota pro PO byla 0,033 a pro VO<sub>2</sub> byla 0,004. Znamená to tedy, že je mezi skupinami statisticky významný rozdíl a má smysl vytvořit regresní modely pro muže a ženy odděleně.

Opět byl zvolen model vytvořený z průměrů dat pro každý stupeň zátěžového testu.

Ve vnitřním prostředí je rovnice přímky regresního modelu pro muže; ženy:

$$y = 9,13x + 11,19; \quad y = 13,54 - 4,64. \quad (7.3)$$

Ve vnějším prostředí pak rovnice pro muže vypadá takto:

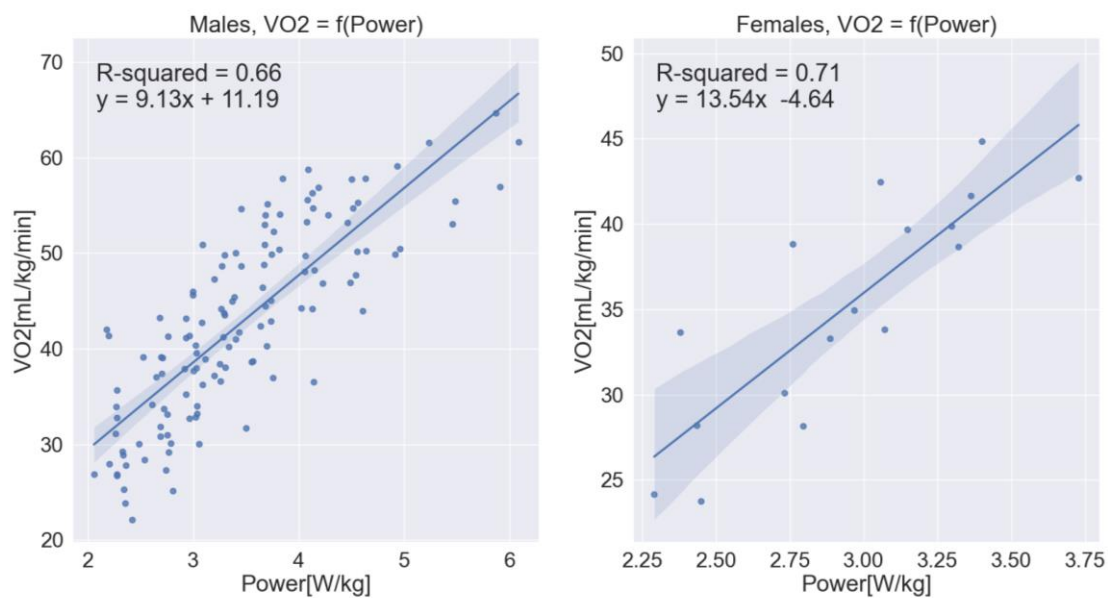
$$y = 11,48 - 1,85. \quad (7.4)$$

Regresní model z vnitřního prostředí pro muže nabývá hodnotu  $R^2 = 0,66$  a regresní model žen  $R^2 = 0,71$ . Model mužů z vnějšího prostředí má hodnotu  $R^2 = 0,68$ . Je tedy ve všech případech dobře vysvětleno množství rozptylu v datech VO<sub>2</sub> pomocí PO [74]. Vizualizace modelů z vnitřního prostředí je na Obr. 14.

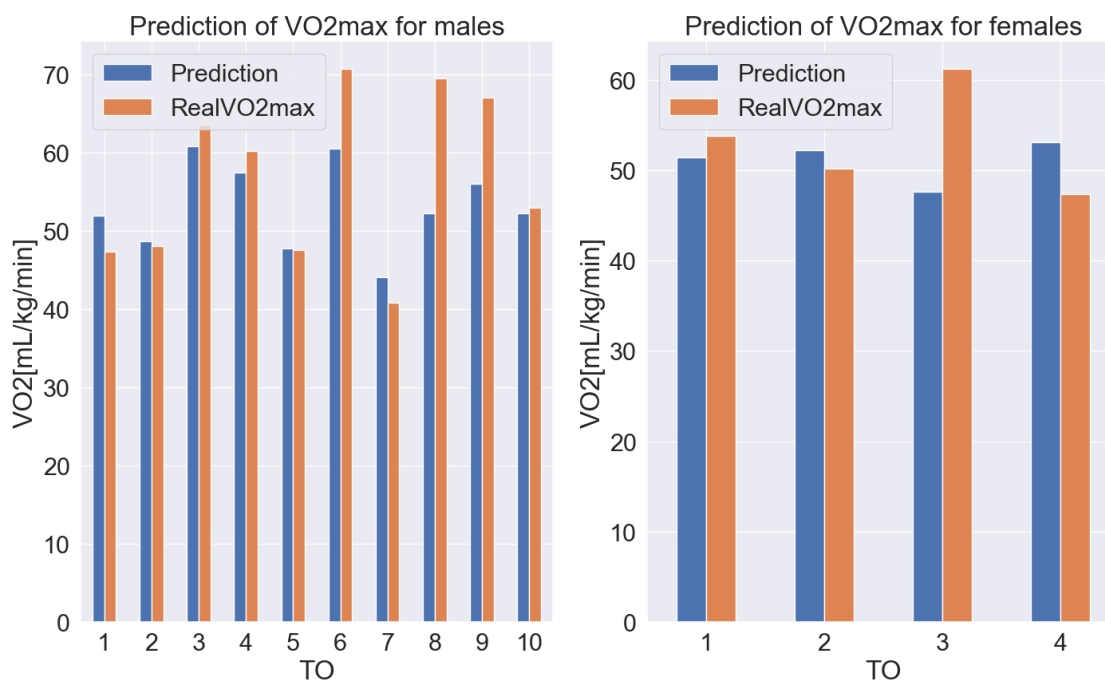
Predikce modelů pro vnitřní prostředí je zobrazena na Obr. 15. Rozložení predikovaných a reálných hodnot VO<sub>2max</sub> je normální. Predikce modelu pro vnější prostředí byla možná pouze pro muže kvůli nedostatečnému množství žen změřených ve vnějším prostředí. Průměrné absolutní a procentuální chyby predikce a p-hodnoty získané aplikací statistického testu (t-test) na predikované a reálné hodnoty VO<sub>2max</sub> jsou zobrazeny v Tab. 4. Z p-hodnot vyplývá, že mezi predikovanými a reálnými hodnotami VO<sub>2max</sub> není statisticky významný rozdíl.

Tab. 4 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou VO<sub>2max</sub>, dělení muži a ženy

<b>Modely vytvořené z dat z vnitřního prostředí</b>				
<b>Model</b>	<b>Predikce pro prostředí</b>	<b>Prům. abs. chyba [mL/kg/min]</b>	<b>Procentuální odchylka [%]</b>	<b>p-hodnota t-testu</b>
muži	vnitřní	5,675	6,57	0,137
muži	vnější	3,328	1,35	0,397
ženy	vnitřní	5,877	3,95	0,657
<b>Modely vytvořené z dat z vnějšího prostředí</b>				
muži	vnější	3,519	6,72	0,250



Obr. 14 Regresní model pro muže a ženy odděleně, vnitřní měření



Obr. 15 Predikce hodnot VO<sub>2max</sub> pro vnitřní prostředí na základě dělení na muže a ženy



### 7.3 Model rozdělení dle maximální hodnoty běžeckého výkonu

Tento model využívá rozdělení TO na dvě skupiny dle maximální hodnoty PO dosažené během testu. Jako nejlepší práh pro dělení se, dle dosažených parametrů modelu, zdá být hodnota 4,3 W/kg. Data PO i VO<sub>2</sub> vykazovala normální rozložení, ale dle Leveneho testu neměly data PO stejnou homogenitu rozptylu. Proto byl pro určení přítomnosti rozdílu mezi skupinami použit Mann-Whitney U test s p-hodnotou 0,000 pro PO i VO<sub>2</sub>. Znamená to tedy, že je mezi skupinami statisticky významný rozdíl a má smysl vytvořit regresní modely s různým maximálním dosaženým PO.

Opět byl zvolen model vytvořený na datech průměrů PO a VO<sub>2</sub> pro každý stupeň zátěžového testu.

Ve vnitřním prostředí je rovnice přímky regresního modelu pro vysoký maximální PO:

$$y = 13,48x - 0,62, \quad (7.5)$$

a nízký maximální PO:

$$y = 9,71 + 6,79. \quad (7.6)$$

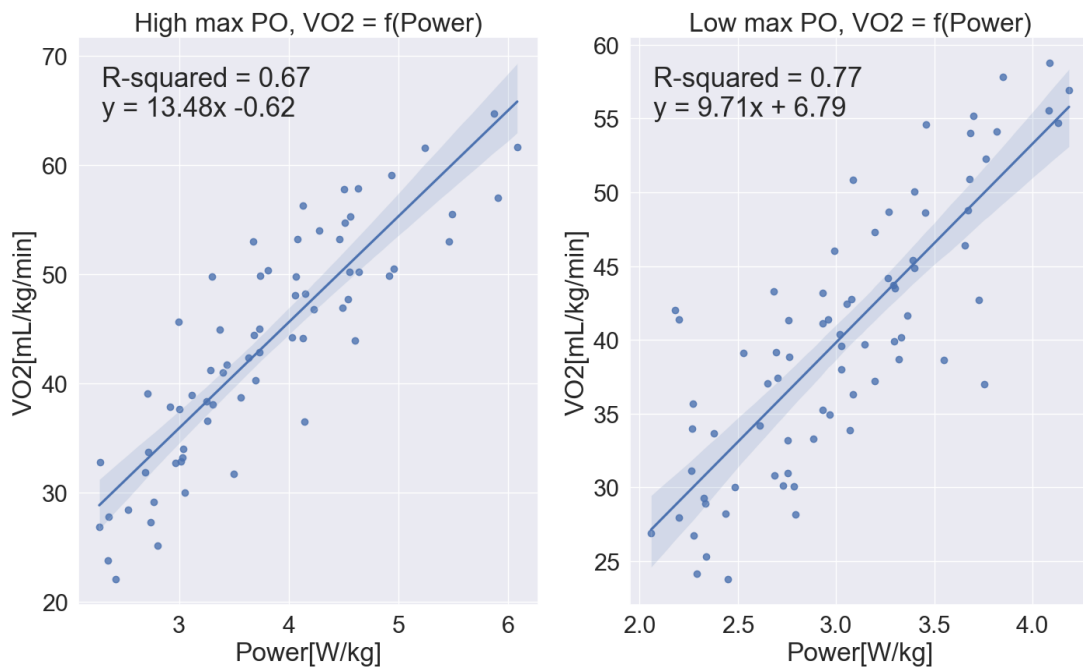
Regresní model pro vysoký maximální dosažený PO nabývá hodnotu  $R^2 = 0,67$  a pro nízký maximální dosažený PO  $R^2 = 0,77$ , a tedy je dobře vysvětleno množství rozptylu v datech VO<sub>2</sub> pomocí PO pro oba modely [74]. Vizualizace modelů je na Obr. 16.

Rozložení predikovaných hodnot VO<sub>2max</sub> v obou prostředích nebylo pro vysoký maximální PO ani po Box-Cox transformaci normální. Na jejich porovnání s reálnými hodnotami VO<sub>2max</sub> byl použit Wilcoxon rank sum test. Ostatní data vykazovala normální rozložení a na jejich porovnání byl použit párový t-test. Výsledky testů, průměrné absolutní a procentuální chyby predikce jsou zobrazeny v Tab. 5. Predikce ve vnitřním prostředí je znázorněna na Obr. 17. Statisticky významný rozdíl mezi reálnými a predikovanými hodnotami VO<sub>2max</sub> je pouze u predikce pro vnější prostředí a skupinu s vysokým PO.

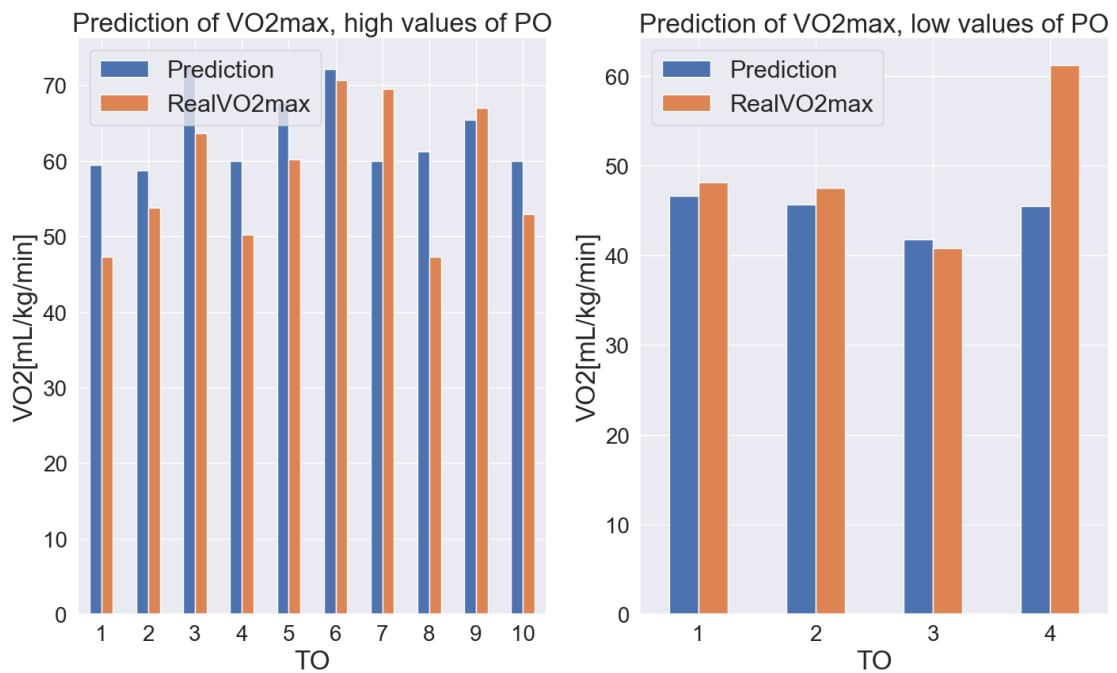
Pro použití tohoto dělení ve venkovním prostředí není dostatečné množství dat.

Tab. 5 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou VO<sub>2max</sub>, dělení na vysoký a nízký PO

Modely vytvořené z dat z vnitřního prostředí				
Model	Predikce pro prostředí	Prům. abs. chyba [mL/kg/min]	Procentuální odchylka [%]	p-hodnota stat. testu
vysoký PO	vnitřní	7,661	8,93	0,0645
nízký PO	vnitřní	4,997	9,58	0,250
vysoký PO	vnější	9,782	15,39	0,005
nízký PO	vnější	4,282	4,59	0,625



Obr. 16 Regresní model pro vysoký a nízký maximální dosažený PO, vnitřní měření



Obr. 17 Predikce hodnot  $VO_{2max}$  na základě dělení dle maximálního dosaženého PO

## 7.4 Modely využívající další veličiny wattmetru Stryd

Na základě dat z vnitřního měření získaných z wattmetru Stryd byly sestaveny dva modely lineární regrese. Na základě korelační mapy (Příloha B -) a parametrů modelu byly vybrány veličiny (CD, GCT a PO), které nejvíce souvisí  $VO_2$  a přispívají k vysvětlení jeho variability modelem. Žádná veličina nevykazovala normální rozložení, které nezměnila ani Box-Cox transformace. V datech jsou totiž přítomny odlehle hodnoty, které jsou vzhledem k velikosti vzorku důležité, viz Příloha A -. Kvůli zamezení multikolinearity (Variance Inflation Factor (VIF) větší než 30, představuje kolinearitu mezi danou proměnnou a ostatními nezávislými proměnnými [75]), a tedy vzniku chyb v modelu, byla využita PCA transformace. Jde o metodu analýzy hlavních komponent, sloužící k redukci příznaků nebo k jejich transformaci do jiného, fyzikálně bezvýznamného prostoru, čehož se využívá k odstranění multikolinearity [76]. Po aplikaci PCA transformace nabývá VIF u všech proměnných hodnoty 1 a lze je v modelu použít bez vzniku multikolinearity [75].

První model byl vytvořen z dat 21 TO a byly predikovány hodnoty  $VO_{2max}$  účastníků měření ve vnějším prostředí. Hodnota  $R^2$  tohoto modelu je 0,74. Rovnice přímky modelu má tvar:

$$y = -10,06x_1 - 0,41x_2 - 0,20x_3 + 37,61, \quad (7.7)$$

kde  $x_1$  je CD,  $x_2$  je GCT a  $x_3$  je PO.

V druhém modelu byl dataset 21 TO z vnitřního měření rozdělen na 18 trénovacích a 3 testovacích TO kvůli predikci hodnot  $VO_{2max}$  ve vnitřním prostředí. Hodnota  $R^2$  tohoto modelu je 0,71. Rovnice přímky modelu má tvar:

$$y = 8,47x_1 + 0,67x_2 - 0,19x_3 + 39,91, \quad (7.8)$$

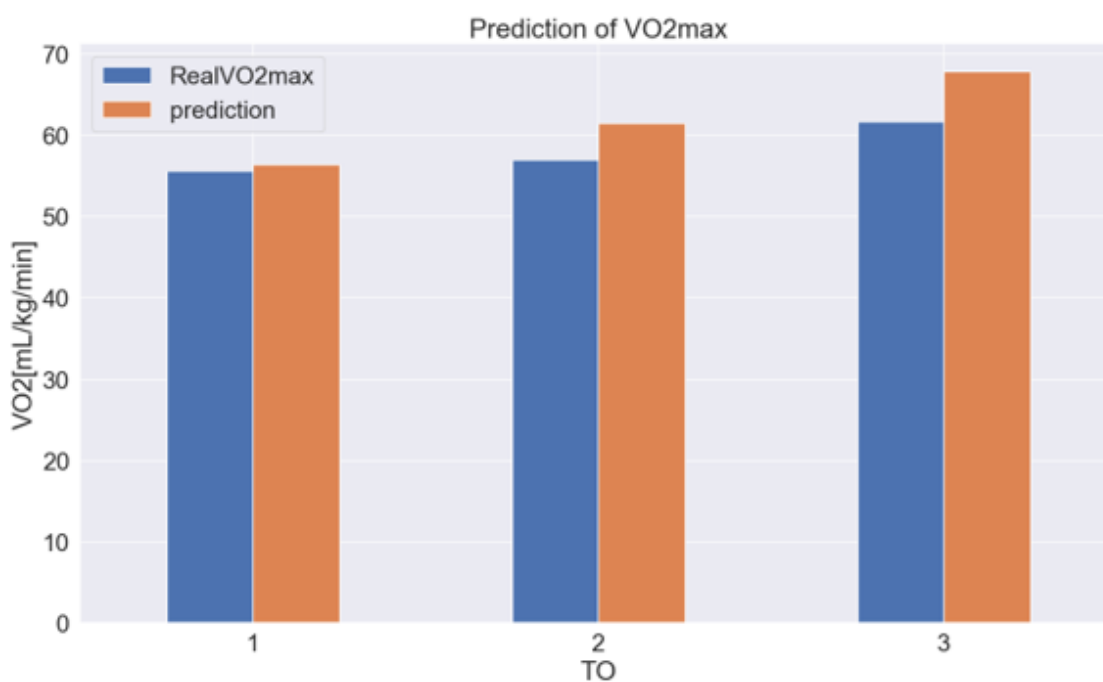
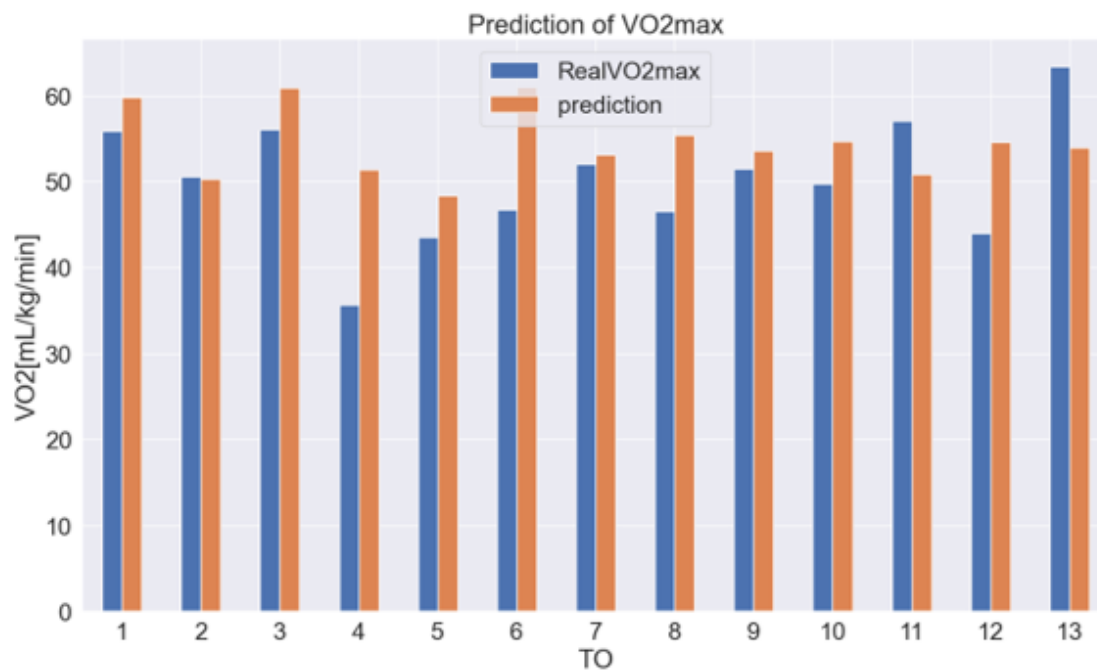
kde  $x_1$  je CD,  $x_2$  je GCT a  $x_3$  je PO.

Predikované i reálné hodnoty  $VO_{2max}$  měla v obou případech normální rozložení a byl na ně aplikován párový t-test. Koeficienty determinace, průměrné absolutní a procentuální chyby a p-hodnoty t-testu zobrazuje Tab. 6.

Predikovaná a reálná data  $VO_{2max}$  se v obou případech statisticky významně neliší. Obr. 18 zobrazuje predikce obou modelů.

Tab. 6 Rozdíly mezi predikovanou a reálnou hodnotou  $VO_{2max}$ , veličiny CD, GCT a PO z wattmetru Stryd

Predikce pro prostředí	$R^2$	Prům. abs. chyba [mL/kg/min]	Procentuální odchylka [%]	p-hodnota t-testu
vnitřní	0,71	3,813	6,36	0,135
vnější	0,74	6,702	8,12	0,056



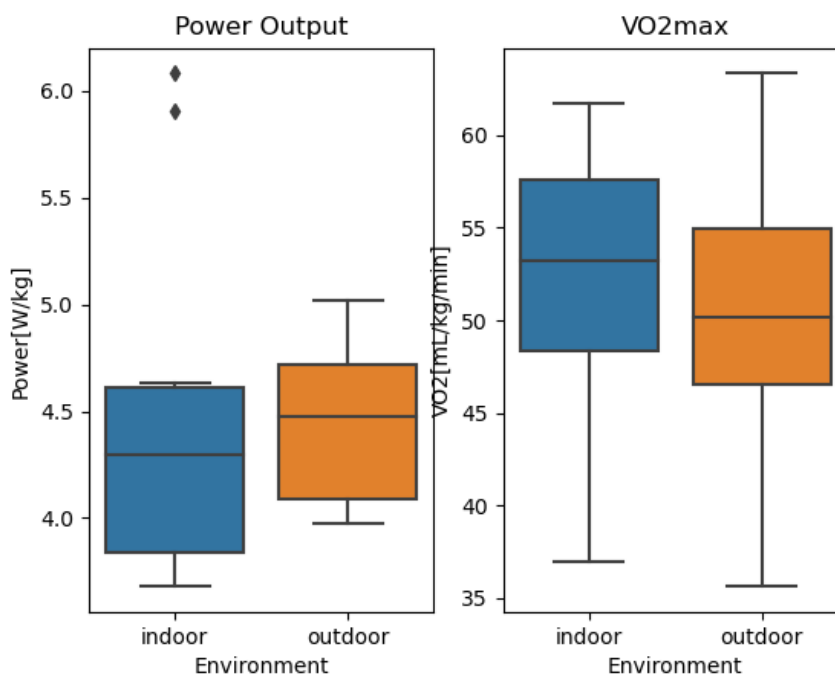
Obr. 18 Predikce hodnot  $VO_{2max}$  modelem rozšířeným o další veličiny měřené wattmetrem Stryd z dat z vnitřního prostředí pro vnější prostředí (nahore) a pro vnitřní prostředí (dole)

## 7.5 Porovnání měření ve vnitřním a vnějším prostředí

Data naměřená v různých prostředích byla podrobena testu podobnosti. Protože některá

data PO nevykazovala normální rozložení, byl na ně použit Wilcoxon rank sum test. Data  $VO_{2max}$  normální rozložení vykazovala a byl na ně použit párový t-test. Z výsledků statistických testů soudíme, že mezi daty naměřenými v různých prostředích není statisticky významný rozdíl, viz Tab. 7. Rozsah dat PO a  $VO_{2max}$  v různých prostředích ukazuje Obr. 19.

Tab. 8 znázorňuje průměrné hodnoty a směrodatné odchylky sledovaných veličin v různých prostředích. Lze pozorovat, že průměr dat  $VO_{2max}$  je ve vnitřním prostředí o 3,7 % vyšší než v prostředí vnějším. Naopak průměr hodnot PO je ve vnitřním prostředí o 1,2 % nižší než v prostředí vnějším.



Obr. 19 Porovnání rozsahu hodnot PO a  $VO_{2max}$  ve vnitřním a vnějším prostředí

Tab. 7 Porovnání dat z vnitřního a vnějšího prostředí a jejich odchylka

Veličina	Průměrná absolutní odchylka	Procentuální odchylka [%]	p-hodnota statistického testu
PO	0,497 [W/kg]	1,22	0,556
$VO_{2max}$	4,270 [mL/kg/min]	3,70	0,593

Tab. 8 Průměrné hodnoty a směrodatné odchyly PO a VO<sub>2</sub> v různých prostředích

<b>Běžecový výkon PO</b>		
<b>Prostředí</b>	<b>Průměrná hodnota [W/kg]</b>	<b>Směrodatná odchylka [W/kg]</b>
vnitřní	4,499	0,817
vnější	4,445	0,351
<b>Spotřeba kyslíku VO<sub>2</sub></b>		
<b>Prostředí</b>	<b>Průměrná hodnota [mL/kg/min]</b>	<b>Směrodatná odchylka [mL/kg/min]</b>
vnitřní	51,941	7,375
vnější	50,055	7,334

## 8. DISKUSE

Hlavním cílem předkládané práce je definování a hlubší porozumění vztahu mezi běžeckým výkonem PO a spotřebou kyslíku  $VO_2$ , ale také zkoumání možností predikce hodnot maximální spotřeby kyslíku  $VO_{2max}$  na základě běžeckého výkonu. Obě sledované veličiny byly zjišťovány v průběhu zátěžových testů ve vnitřním (26 TO) a vnějším prostředí (13 TO). Měření absolvovaly celkem 4 ženy a 22 mužů. Jednalo se převážně o rekreační běžci.

### 8.1 Vztah úrovně běžeckého výkonu a spotřeby kyslíku

**Výzkumná otázka 1:** Jaký je vztah úrovně běžeckého výkonu a spotřeby kyslíku?

Tento vztah je lineární. Odpověď na tuto otázku však není zcela jednoznačná. Vztah mezi PO a  $VO_2$  pro jednotlivé testované subjekty je lineární. Koeficient determinace  $R^2$  lineárních modelů pro jednotlivé TO nabývá pro vnitřní měření hodnotu  $0,95 \pm 0,07$  a pro vnější měření hodnotu  $0,97 \pm 0,02$ . To znamená velmi dobrou reprezentaci hodnot  $VO_2$  hodnotami PO. Korelační koeficient v obou případech nabývá hodnoty větší než 0,9 a mezi veličinami je tedy velmi silný korelační vztah [66]. Takový výsledek byl očekávaný, je tedy zřejmé, že metrika běžeckého výkonu má pro jednotlivé běžce smysl a dobře reprezentuje metabolickou zátěž vyvíjenou na organismus. Podobných výsledků dosáhl i Imbach et al. [63] ( $R^2 = 0,82 \pm 0,01$ ).

Vztah PO a  $VO_2$  pro všechny TO byl zkoumán zvlášť v obou sledovaných prostředích.  $R^2$  modelu pro vnitřní prostředí má hodnotu 0,67 a pro vnější prostředí 0,79. Rovnice přímků těchto modelů uvádí rovnice (7.1) a rovnice (7.2). Tento rozdíl v modelech je zřejmě zapříčiněn různým počtem TO v rozdílných prostředích. Test výrobců provedený na 9 TO různé výkonnosti, od subelitních až po rekreační, dosáhl lepší hodnoty  $R^2 = 0,96$  [10]. Cerezuela-Espejo et al. [5] popsali tento vztah koeficientem  $R^2 = 0,91$ , jejich výzkumu se účastnila poměrně homogenní skupina aktivně trénujících triatlonistů. Oproti tomu Aubry et al. [6] dosáhli korelační vztah pouze  $r = 0,29$ . Testu se však zúčastnilo 11 elitních a 13 rekreačních běžců. Tyto rozdíly v hodnocení vztahu PO a  $VO_2$  mohou být způsobeny různou homogenitou TO ve výzkumných skupinách. V této práci byli všichni TO sportovci na rekreační úrovni věnující se běhu na různé vzdálenosti, případně i dalším sportům. Je to tedy poměrně různorodá skupina, co se specifické výkonnosti týče. Podobně tomu bylo i v práci Aubry et al. [6]. Práce Cerezuela-Espejo et al. [5] testovala triatlonisty, tedy sportovce se stejným spektrem specifických činností. Čím více se liší hodnoty  $VO_2$  pro podobné hodnoty PO (heterogenní skupiny), tím větší vzniká v modelu chyba. Tento problém by mohl vyřešit specifický výběr TO například stejné výkonnosti. Pokud ale chceme využívat modely pro predikci hodnot  $VO_{2max}$ , je třeba testovací vzorek co nejvíce zobecnit a zahrnout do něho celé spektrum výkonností. To lze zajistit rozšířením testovacího vzorku na stovky účastníků. Další vysvětlení variability hodnot



$R^2$  může být různá velikost testovacího vzorku. Čím je jeho velikost menší, tím přesnější model je. To lze pozorovat na modelu pro jednotlivé TO (1 osoba, výborný model 0,95), na modelu pouze pro ženy (4 osoby, dobrý model 0,71) a na modelu pro všechny TO dohromady (26 osob, horší model 0,66).

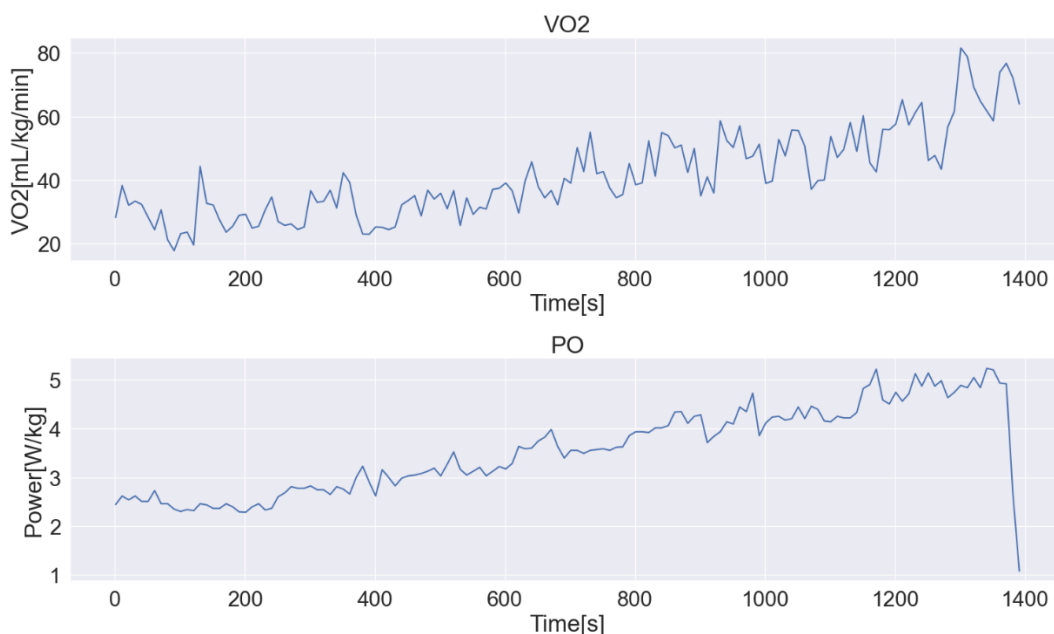
Vztah PO a  $VO_2$  ovlivňuje také výběr skupiny TO, na které je vztah zkoumán. Regresní model vycházející z dat pouze mužů má hodnotu  $R^2 = 0,66$  a regresní model vycházející z dat žen má hodnotu  $R^2 = 0,71$ . Regresní modely byly vytvořeny také z dat rozdělených dle maximálního dosaženého PO během testu, kritická byla hodnota 4,3 W/kg. Model pro vysoký maximální dosažený PO nabývá hodnotu  $R^2 = 0,67$  a model pro nízký maximální dosažený PO hodnotu  $R^2 = 0,77$ . Různá kvalita modelů může být zapříčiněná, kromě vlivu dělení na užší výkonnostní skupiny, také různým počtem TO v dílčích skupinách.

Na vztah PO a  $VO_2$  má vliv také prostředí, ve kterém běh probíhá. Dle výsledků této práce je poměrně velký rozdíl mezi modelem z vnitřního ( $R^2 = 0,67$ ) a modelem z vnějšího ( $R^2 = 0,79$ ) prostředí. Rozdíl mohl vzniknout kvůli většímu počtu TO ve vnitřním prostředí. Rozdíl může být zapříčiněn také poměrně dlouhým rozestupem mezi vnitřními a venkovními testy. Cerezuela-Espejo et al. [5] dospěli k hodnotě  $R^2 = 0,92$  ve vnitřním prostředí a k hodnotě  $R^2 = 0,93$  ve vnějším prostředí. Rozestupy mezi testy však byly pouze od 48 do 72 hodin. Dalším důvodem rozdílu mezi prostředími může být počasí, při kterém bylo vnější měření prováděno. Na atletickém stadionu při většině testů foukal vítr. Běžci tímto faktorem byli ovlivněni, a to i když byli schováni za předjezdcem na koloběžce. Vliv větru lze pozorovat v kolísání hodnot PO i  $VO_2$  během jednoho stupně testu, viz Obr. 20. To může být také příčinou rozdílu průměrných hodnot získaných ve vnitřním a vnějším prostředí. Udržení stejné rychlosti běhu proti větru vyžaduje vynaložení většího výkonu, než při běhu v bezvětří nebo s větrem v zádech. Výkyvy hodnot PO se nacházejí ve stejných místech jako výkyvy hodnot  $VO_2$ , které budou zřejmě zapříčiněny větrem proudícím kolem zařízení  $VO_2$  Master [65]. Navzdory kolísání hodnot PO se jeho průměr ve vnějším a vnitřním prostředí liší pouze o 1,2 %. Zřejmě zde došlo ke kompenzaci při běhu po a proti větru. Běh totiž probíhal na atletickém ovále, na kterém po určitou dobu foukal vítr stejným směrem.

Tyto rozdíly se však daly předpokládat. Přirozené prostředí pro běh je venku, se všemi jeho přírodními vlivy. Je pouze potřeba počítat s tím, že nelze vycházet z hodnot získaných v izolovaném prostředí a přesně se jimi řídit v přirozeném venkovním prostředí. Tento problém se však týká pouze modelů vytvořených v této práci. Samotná matrica běžeckého výkonu funguje dobře i ve venkovním prostředí, protože pro jednotlivé TO odráží metabolickou zátěž  $VO_2$  velmi přesně ( $0,97 \pm 0,02$ ). Rozdíl ve sledovaných veličinách mezi prostředími není významný, procentuální rozdíl obou veličin je podobný a je menší než 5 %, viz Tab. 7.

Byl také vytvořen model z veličin CD, GCT a PO, který má hodnotu  $R^2 = 0,74$ . Aubry et al. [6] ukázali, že s  $VO_2$  mají nejsilnější vztah VO a GCT. Albiach et al. [7] odhalili

složitější vztahy mezi metrikami poskytovanými wattmetrem Stryd a běžeckou výkonností. Popisují vzorce změn jednotlivých veličin souvisejících s lepšími podávanými výkony a demonstrují tak, že k dobrým výsledkům je, kromě dobré trénovanosti (hodnota  $VO_{2max}$ ) potřebná také dobrá technika (mechanika) běhu.



Obr. 20 Kolísání  $VO_2$  a PO ve vnějším prostředí vlivem větru

## 8.2 Predikce $VO_{2max}$ pomocí běžeckého výkonu

**Výzkumná otázka 2:** Je možné za pomoci běžeckého wattmetru odhadovat maximální spotřebu kyslíku  $VO_{2max}$ ?

Ano, je to možné. Na základě lineárního vztahu mezi veličinami PO a  $VO_{2max}$  lze vytvořit lineární regresní modely, a ty následně využít k predikci hodnot  $VO_{2max}$ . V současné chvíli neexistují vědecké práce, které by se zabývaly predikcí hodnot  $VO_{2max}$  na základě PO. Některé studie ukazují silný vztah mezi těmito veličinami [7; 10], ale hodnoty  $VO_{2max}$  neodhadují.

**Výzkumná otázka 3:** Jak přesný bude tento výpočet (jak se bude vypočtená hodnota lišit od reálné spotřeby  $VO_{2max}$ , která bude naměřena v laboratoři a ve venkovním prostředí)?

Z výsledků práce je patrné, že přesnost predikce může být různá. U všech modelů, kromě těch pro vysoký PO a jeho predikci pro vnější prostředí, využívajících pouze data PO a  $VO_2$ , není mezi predikovanými a reálnými daty  $VO_{2max}$  významný rozdíl. Nejpresnější v predikci byl model mužů vycházející z dat vnitřního prostředí a predikující data ve vnějším prostředí – procentuální chyba 1,3 %. O něco hůře, s procentuální chybou 3,5 %, na tom je model bez dělení vytvořený z dat vnitřního prostředí a predikující pro

vnější prostředí. Tento jev vyšší úspěšnosti predikce v jiném prostředí, než ze kterého byl model vytvořen, se v této práci opakuje. Jedním z možných vysvětlení je přirozeně se vyskytující chyba v modelu, která je rozdílem, jakkoliv je malý, ve sledovaných hodnotách v různých prostředích eliminována. Tento jev může být nahodilý, a pro jeho vyvrácení či potvrzení by bylo třeba provést více opakovaných měření. Malé chyby v predikci dosahuje také model žen (3,95% odchylka od reálné hodnoty  $VO_{2max}$ ), v tomto případě to zřejmě bude zapříčiněno malým zastoupením žen v testovacím vzorku.

Neočekávaným výsledkem je poměrně vysoká chybovost modelů vytvořených z veličin CD, GCT a PO měřených wattmetrem Stryd. Vzhledem k dobrým výsledkům korelační analýzy těchto veličin s hodnotami  $VO_2$  a hodnot  $R^2$  modelu (0,74) bylo očekáváno, že pomohou zpřesnit předchozí modely a vylepší tak úspěšnost predikce. Navzdory očekávání tyto modely dosahují vyšší chyby (6,4 % při predikci pro vnitřní prostředí a 8,1 % pro vnější prostředí) než modely využívající k predikci pouze data PO všech testovaných v jednom prostředí.

Obecně dobře funguje model vytvořený bez dalšího dělení dat získaných ve vnitřním prostředí. Ten bychom také zvolili jako nejlepší pro predikci hodnot  $VO_{2max}$ , protože se neukázalo, že by jiné způsoby použité v této práci přinesly významně lepší výsledky.

## ZÁVĚR

Tato práce se zabývala popisem vztahu mezi běžeckým výkonem PO a spotřebou kyslíku  $VO_2$ . Na základě tohoto vztahu se práce dále zabývala otázkou, zda je možné odhadovat hodnoty maximální spotřeby kyslíku  $VO_{2max}$  z hodnot PO získaných během zátěžového testu. Dále je v práci určena přesnost tohoto odhadu a rozdíly predikce hodnot  $VO_{2max}$  mezi vnějším a vnitřním prostředím.

V prvních čtyřech kapitolách se práce zabývá teoretickým rozbohem vhodné odborné literatury potřebné ke správnému pochopení metriky běžeckého výkonu. V páté části je popsána metodologie práce. Šestá část popisuje práci s daty a navazuje na ní část sedmá s výsledky práce. Poslední částí práce je diskuse rozebírající dosažené výsledky.

Bylo zjištěno, že vztah mezi PO a  $VO_2$  je pro jednotlivé testované subjekty lineární a velmi silný. Ve vnitřním prostředí je koeficient determinace  $R^2 = 0,95 \pm 0,07$  a Pearsonův korelační koeficient  $r = 0,97 \pm 0,04$ , ve vnějším prostředí je  $R^2 = 0,97 \pm 0,02$  a  $r = 0,97 \pm 0,03$ . Dále byl vytvořen lineární regresní model pro všechny TO ve vnitřním a vnějším prostředí zvlášť.  $R^2$  modelu pro vnitřní prostředí má hodnotu 0,67 a pro vnější prostředí 0,79. Byl také vytvořen model využívající další veličiny měřené wattmetrem Stryd, koeficient  $R^2$  tohoto modelu je 0,74. Byly vytvořeny i modely využívající dělení dle pohlaví nebo dle maximálního dosaženého PO během testu. Ty však nepřinesly přesnější popis vztahu sledovaných veličin.

Mezi sledovanými veličinami získanými ve vnějším a vnitřním prostředí byl pozorován malý rozdíl (1,2 % pro PO a 3,7 % pro  $VO_2$ ).

Bylo také zjištěno, že je možné predikovat hodnoty  $VO_{2max}$  s různou přesností vycházející z použitého modelu. Nejpřesnější byl model vytvořený z mužských dat z vnitřního prostředí použitý pro predikci hodnot  $VO_{2max}$  ve vnějším prostředí. Procentuální chyba této predikce je 1,3 %. Dobrých výsledků (procentuální odchylka 3,5 %) dosáhla také predikce modelem vytvořeným z dat vnitřního prostředí dohromady predikující pro vnější prostředí. Tento model bychom pro predikci hodnot  $VO_{2max}$  doporučili jako nejlepší a zároveň velmi univerzální. Není totiž třeba určovat, do jaké skupiny testovaný subjekt patří. Model lze využít pro predikci použitím rovnice (7.1).

## LIMITY PRÁCE

Velkou limitou práce je malá velikost testovaného vzorku probandů bránící plnohodnotnému statistickému ověření všech modelů a jejich vzájemnému porovnání.

Dalším nedostatkem práce je různý počet TO změřených v rozdílných prostředích, který neumožňuje plnohodnotné porovnání získaných hodnot v těchto prostředích mezi sebou. V tom brání také velký časový rozestup mezi měřeními v různých prostředích, díky kterému mohlo dojít k posunu ve výkonnosti TO. Ten je zapříčiněn především provozními podmínkami zařízení VO2 Master, které často nejsou ve venkovním prostředí v době tvorby práce (zimní a jarní období) splněny.

Všem limitám by se dalo předejít větší časovou dotací na práci, větším výzkumným vzorkem TO a také využitím přístrojů umožňujících práci v širším spektru okolních podmínek.

## REFERENCE

- [1] RODRÍGUEZ, DANIEL, AUSTIN BROWN a PHILIP TROPEL. Portable Global Positioning Units to Complement Accelerometry-Based Physical Activity Monitors. *Medicine & Science in Sports & Exercise* [online]. 2005, **11**(572-581), 37 [cit. 2022-11-03]. Dostupné z: doi:10.1249/01.mss.0000185297.72328.ce
- [2] L., Passfield, Hopker JG., Jobson S., Friel D. a Zabala M. Knowledge is power: Issues of measuring training and performance in cycling. *Journal of Sports Sciences* [online]. 2017, **35**(12), 1426-1434 [cit. 2022-11-03]. Dostupné z: doi:10.1080/02640414.2016.1215504
- [3] BOURDON, Pitre, Marco CARDINALE, Andrew MURRAY et al. Monitoring Athlete Training Loads: Consensus Statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance* [online]. 2017, **12**(2), 2-161-2-170 [cit. 2022-11-03]. ISSN 1555-0265. Dostupné z: doi:10.1123/IJSP.2017-0208
- [4] CERZUELA-ESPEJO, Víctor, Alejandro HERNÁNDEZ-BELMONTE, Javier COUREL-IBÁÑEZ, Elena CONESA-ROS, Alejandro MARTÍNEZ-CAVA a Jesús PALLARÉS. Running power meters and theoretical models based on laws of physics: Effects of environments and running conditions. *Physiology & Behavior* [online]. 2020, **223** [cit. 2022-11-19]. ISSN 00319384. Dostupné z: doi:10.1016/j.physbeh.2020.112972
- [5] CERZUELA-ESPEJO, Víctor, Alejandro HERNÁNDEZ-BELMONTE, Javier COUREL-IBÁÑEZ, Elena CONESA-ROS, Ricardo MORA-RODRÍGUEZ a Jesús PALLARÉS. Are we ready to measure running power? Repeatability and concurrent validity of five commercial technologies. *European Journal of Sport Science* [online]. 2021, **21**(3), 341-350 [cit. 2022-11-10]. ISSN 1746-1391. Dostupné z: doi:10.1080/17461391.2020.1748117
- [6] AUBRY, Rachel, Geoff POWER a Jamie BURR. An Assessment of Running Power as a Training Metric for Elite and Recreational Runners. *Journal of Strength and Conditioning Research* [online]. 2018, **32**(8), 2258-2264 [cit. 2022-11-10]. ISSN 1064-8011. Dostupné z: doi:10.1519/JSC.0000000000002650
- [7] PARDO ALBIACH, Juan, Melanie MIR-JIMENEZ, Vanessa HUESO MORENO, Iván NÁCHER MOLTÓ a Javier MARTÍNEZ-GRAMAGE. The Relationship between VO<sub>2</sub>max, Power Management, and Increased Running Speed: Towards Gait Pattern Recognition through Clustering

- Analysis. *Sensors* [online]. 2021, **21**(7) [cit. 2022-11-10]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21072422
- [8] DIJK, Hanz, Ron MEGEN a Koen JONG. *The Fastest Way To Your Next Personal Best* [online]. First edition March 2021. NedRUN, 2021 [cit. 2023-04-30]. ISBN 9789082106954. Dostupné z: [https://storage.googleapis.com/stryd\\_static\\_assets/ebook-download/the-fastest-way-to-your-next-personal-best-06-18-21.pdf?mc\\_cid=b71eb1ed9f&mc\\_eid=a5d469096f](https://storage.googleapis.com/stryd_static_assets/ebook-download/the-fastest-way-to-your-next-personal-best-06-18-21.pdf?mc_cid=b71eb1ed9f&mc_eid=a5d469096f)
- [9] NOVACHECK, Tom F. The biomechanics of running. *Gait & Posture* [online]. 1998, **7**(1), 77-95 [cit. 2022-11-05]. ISSN 09666362. Dostupné z: doi:10.1016/S0966-6362(97)00038-6
- [10] THE STRYD TEAM. *How to Lead the Pack: Running Power Meters & Quality Data* [online]. In: . s. 17 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: [https://storage.googleapis.com/stryd\\_static\\_assets/stryd-metric-validation.pdf](https://storage.googleapis.com/stryd_static_assets/stryd-metric-validation.pdf)
- [11] HOWARD, Róisín, Richard CONWAY a Andrew HARRISON. Muscle activity in sprinting: a review. *Sports Biomechanics* [online]. 2017, **17**(1), 1-17 [cit. 2022-11-06]. ISSN 1476-3141. Dostupné z: doi:10.1080/14763141.2016.1252790
- [12] THORDARSON, David B. RUNNING BIOMECHANICS. *Clinics in Sports Medicine* [online]. 1997, **16**(2), 239-247 [cit. 2023-04-20]. ISSN 0278-5919. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S0278-5919\(05\)70019-3](https://doi.org/10.1016/S0278-5919(05)70019-3)
- [13] Physical activity. In: *World health organisation* [online]. Ženeva [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/physical-activity>
- [14] WINTER, Edward, Grant ABT, F.B. BROOKES et al. Misuse of “Power” and Other Mechanical Terms in Sport and Exercise Science Research. *Journal of Strength and Conditioning Research* [online]. 2016, **30**(1), 292-300 [cit. 2022-11-26]. ISSN 1064-8011. Dostupné z: doi:10.1519/JSC.0000000000001101
- [15] KANEKO, Masahiro. Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. *Journal of Biomechanics* [online]. 1990, **23**, 57-63 [cit. 2022-11-07]. ISSN 00219290. Dostupné z: doi:10.1016/0021-9290(90)90041-Z
- [16] SUN, X, WK LAM, X ZHANG, J WANG a W FU. Systematic Review of the Role of Footwear Constructions in Running Biomechanics: Implications for Running-Related Injury and Performance. *J Sports Sci*

- Med* [online]. 2020, **19**(1), 20-37 [cit. 2023-04-22]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7039038/>
- [17] THEISEN, Daniel, Laurent MALISOUX, Paul GETTE, Christian NÜHRENBÖRGER a Axel URHAUSEN. Footwear and running-related injuries – Running on faith?. *Sports Orthopaedics and Traumatology Sport-Orthopädie - Sport-Traumatologie*. 2016, **32**(2), 169-176. ISSN 0949-328X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.orthtr.2016.03.047>
- [18] HOLLIS, Christina, Rachel KOLDENHOVEN, Jacob RESCH a Jay HERTEL. Running biomechanics as measured by wearable sensors: effects of speed and surface: effects of speed and surface. *Sports Biomechanics*. Routledge, 2021, **20**(5), 521-531. ISSN 1476-3141. Dostupné z: doi:[10.1080/14763141.2019.1579366](https://doi.org/10.1080/14763141.2019.1579366)
- [19] TAWA, Nassib a Quinette LOUW. Biomechanical factors associated with running economy and performance of elite Kenyan distance runners: A systematic review: A systematic review. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. 2018, **22**(1), 1-10. ISSN 1360-8592. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jbmt.2017.11.004>
- [20] PEIKRISZWILI TARTARUGA, M., C. BOLLI MOTA, L.A. PEYRÉ-TARTARUGA, L.F. MARTINS KRUEL, J.-M. VALLIER a J. BRISSWALTER. Running efficiency and long-distance performance prediction: Influence of allometric scaling. *Science & Sports* [online]. 2013, **28**(4), 165-171 [cit. 2022-11-12]. ISSN 07651597. Dostupné z: doi:[10.1016/j.scispo.2013.02.007](https://doi.org/10.1016/j.scispo.2013.02.007)
- [21] HOOGKAMER, WOUTER, SHALAYA KIPP, BARRY SPIERING a RODGER KRAM. Altered Running Economy Directly Translates to Altered Distance-Running Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise* [online]. 2016, **48**(11), 2175-2180 [cit. 2023-04-23]. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:[10.1249/MSS.0000000000001012](https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001012)
- [22] RUIZ-ALIAS, Santiago, Alejandro MOLINA-MOLINA, Víctor SOTO-HERMOSO a Felipe GARCÍA-PINILLOS. A systematic review of the effect of running shoes on running economy, performance and biomechanics: analysis by brand and model: analysis by brand and model. *Sports Biomechanics*. Routledge, 2023, **22**(3), 388-409. ISSN 1476-3141. Dostupné z: doi:[10.1080/14763141.2022.2089589](https://doi.org/10.1080/14763141.2022.2089589)
- [23] FARINA, Emily, Derek HAIGHT a Geng LUO. Creating footwear for performance running. *Footwear Science*. Taylor & Francis, 2019, **11**(1), 134-135. ISSN 1942-4280. Dostupné z: doi:[10.1080/19424280.2019.1606119](https://doi.org/10.1080/19424280.2019.1606119)



- [24] CIGOJA, Sasa, Colin FIRMINER, Michael ASMUSSEN, Jared FLETCHER, W. EDWARDS a Benno NIGG. Does increased midsole bending stiffness of sport shoes redistribute lower limb joint work during running?. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2019, **22**(11), 1272-1277. ISSN 1440-2440. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsams.2019.06.015>
- [25] MUNIZ-PARDOS, Borja, Shaun SUTEHALL, Konstantinos ANGELOUDIS, Fergus GUPPY, Andrew BOSCH a Yannis PITSILADIS. Recent Improvements in Marathon Run Times Are Likely Technological, Not Physiological. *Sports Medicine*. 2021, **51**(3), 371-378. ISSN 1179-2035. Dostupné z: doi:[10.1007/s40279-020-01420-7](https://doi.org/10.1007/s40279-020-01420-7)
- [26] HOOBKAMER, Wouter, Shalaya KIPP, Jesse FRANK, Emily FARINA, Geng LUO a Rodger KRAM. A Comparison of the Energetic Cost of Running in Marathon Racing Shoes. *Sports Medicine*. 2018, **48**(4), 1009-1019. ISSN 1179-2035. Dostupné z: doi:[10.1007/s40279-017-0811-2](https://doi.org/10.1007/s40279-017-0811-2)
- [27] PALMER, Chris. Engineering Running Shoes to Break Records. *Engineering*. 2020, **6**(9), 962-963. ISSN 2095-8099. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.07.006>
- [28] FOLLAND, JONATHAN, SAM ALLEN, MATTHEW BLACK, JOSEPH HANDSAKER a STEPHANIE FORRESTER. Running Technique is an Important Component of Running Economy and Performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise* [online]. 2017, **49**(7), 1412-1423 [cit. 2023-04-24]. ISSN 0195-9131. Dostupné z: doi:[10.1249/MSS.0000000000001245](https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001245)
- [29] BALSALOBRE-FERNÁNDEZ, Carlos, Jordan SANTOS-CONCEJERO a Gerasimos GRIVAS. Effects of Strength Training on Running Economy in Highly Trained Runners: A Systematic Review With Meta-Analysis of Controlled Trials. *Journal of Strength and Conditioning Research* [online]. 2016, **30**(8), 2361-2368 [cit. 2023-04-24]. ISSN 1064-8011. Dostupné z: doi:[10.1519/JSC.0000000000001316](https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001316)
- [30] BARNES, Kyle a Andrew KILDING. Strategies to Improve Running Economy. *Sports Medicine*. 2015, **45**(1), 37-56. ISSN 1179-2035. Dostupné z: doi:[10.1007/s40279-014-0246-y](https://doi.org/10.1007/s40279-014-0246-y)
- [31] TELFER, Scott a James WOODBURN. The use of 3D surface scanning for the measurement and assessment of the human foot. *Journal of Foot and Ankle Research*. 2010, **3**(1), 19. ISSN 1757-1146. Dostupné z: doi:[10.1186/1757-1146-3-19](https://doi.org/10.1186/1757-1146-3-19)

- [32] BRENÉ, Stefan, Astrid BJØRNEBEKK, Elin ÅBERG, Aleksander MATHÉ, Lars OLSON a Martin WERME. Running is rewarding and antidepressive. *Physiology & Behavior* [online]. 2007, **92**(1-2), 136-140 [cit. 2022-11-05]. ISSN 00319384. Dostupné z: doi:10.1016/j.physbeh.2007.05.015
- [33] BORRESEN, Jill a Michael IAN LAMBERT. The Quantification of Training Load, the Training Response and the Effect on Performance. *Sports Medicine* [online]. 2009, **39**(9), 779-795 [cit. 2022-11-19]. ISSN 0112-1642. Dostupné z: doi:10.2165/11317780-000000000-00000
- [34] CARTÓN-LLORENTE, Antonio, Felipe GARCÍA-PINILLOS, Jorge ROYO-BORRUEL, Alberto RUBIO-PEIROTÉN, Diego JAÉN-CARRILLO a Luis ROCHE-SERUENDO. Estimating Functional Threshold Power in Endurance Running from Shorter Time Trials Using a 6-Axis Inertial Measurement Sensor. *Sensors* [online]. 2021, **21**(2) [cit. 2022-11-19]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s21020582
- [35] LAMBERT, M., Z. MBAMBO a A. GIBSON. Heart rate during training and competition for longdistance running. *Journal of Sports Sciences*. Routledge, 1998, **16**(1), 85-90. ISSN 0264-0414. Dostupné z: doi:10.1080/026404198366713
- [36] ACHTEN, Juul a Asker JEUKENDRUP. Heart Rate Monitoring. *Sports Medicine* [online]. 2003, **33**(7), 517-538 [cit. 2022-11-18]. ISSN 0112-1642. Dostupné z: doi:10.2165/00007256-200333070-00004
- [37] DI PRAMPERO, Pietro E. Cycling on Earth, in space, on the Moon. *European Journal of Applied Physiology* [online]. 2000, **82**(5-6), 345-360 [cit. 2022-11-12]. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s004210000220
- [38] SNYDER, Kristine. *Running Power Definition and Utility* [online]. In: . s. 10 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.stryd.com/running-power-definition>
- [39] JENNY, David a Patrick JENNY. On the mechanical power output required for human running – Insight from an analytical model. *Journal of Biomechanics* [online]. 2020, **110** [cit. 2022-11-20]. ISSN 00219290. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbiomech.2020.109948
- [40] GRAY, Adrian, Kathleen SHORTER, Cloe CUMMINS, Aron MURPHY a Mark WALDRON. Modelling Movement Energetics Using Global Positioning System Devices in Contact Team Sports: Limitations and Solutions. *Sports Medicine* [online]. 2018, **48**(6), 1357-1368 [cit. 2022-11-09]. ISSN 0112-1642. Dostupné z: doi:10.1007/s40279-018-0899-z

- [41] BROCHHAGEN, Joana a Matthias HOPPE. Metabolic Power in Team and Racquet Sports: A Systematic Review with Best-Evidence Synthesis. *Sports Medicine - Open* [online]. 2022, **8**(1) [cit. 2022-11-09]. ISSN 2199-1170. Dostupné z: doi:10.1186/s40798-022-00525-9
- [42] FERRANNINI, Eleuterio. The theoretical bases of indirect calorimetry: A review. *Metabolism* [online]. 1988, **37**(3), 287-301 [cit. 2022-11-09]. ISSN 00260495. Dostupné z: doi:10.1016/0026-0495(88)90110-2
- [43] MATARESE, LAURA E. Indirect Calorimetry. *Journal of the American Dietetic Association* [online]. 1997, **97**(10), 154-160 [cit. 2022-11-09]. ISSN 00028223. Dostupné z: doi:10.1016/S0002-8223(97)00754-2
- [44] SMITH, Nicholas, Christopher BARCLAY a Denis LOISELLE. The efficiency of muscle contraction. *Progress in Biophysics and Molecular Biology* [online]. 2005, **88**(1), 1-58 [cit. 2022-11-15]. ISSN 00796107. Dostupné z: doi:10.1016/j.pbiomolbio.2003.11.014
- [45] ETTEMA, Gertjan a Håvard LORÅS. Efficiency in cycling: a review. *European Journal of Applied Physiology* [online]. 2009, **106**(1), 1-14 [cit. 2022-11-12]. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s00421-009-1008-7
- [46] SAUNDERS, Philo, David PYNE, Richard TELFORD a John HAWLEY. Factors Affecting Running Economy in Trained Distance Runners. *Sports Medicine* [online]. 2004, **34**(7), 465-485 [cit. 2022-11-12]. ISSN 0112-1642. Dostupné z: doi:10.2165/00007256-200434070-00005
- [47] MORGAN, Don, Philip MARTIN a Gary KRAHENBUHL. Factors Affecting Running Economy. *Sports Medicine* [online]. 1989, **7**(5), 310-330 [cit. 2022-11-12]. ISSN 0112-1642. Dostupné z: doi:10.2165/00007256-198907050-00003
- [48] TARTARUGA, Marcus, Jeanick BRISSWALTER, Leonardo PEYRÉ-TARTARUGA et al. The Relationship Between Running Economy and Biomechanical Variables in Distance Runners. *Research Quarterly for Exercise and Sport* [online]. 2012, **83**(3), 367-375 [cit. 2022-11-12]. ISSN 0270-1367. Dostupné z: doi:10.1080/02701367.2012.10599870
- [49] ARENDT-NIELSEN, Lars, Nikolai GANTCHEV a Thomas SINKJÆR. The influence of muscle length on muscle fibre conduction velocity and development of muscle fatigue. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section* [online]. 1992, **85**(3), 166-172 [cit. 2022-11-13]. ISSN 01685597. Dostupné z: doi:10.1016/0168-5597(92)90128-X

- [50] LUNDBY, C., D. MONTERO a M. JOYNER. Biology of VO<sub>2</sub> max: looking under the physiology lamp. *Acta Physiologica* [online]. 2017, **220**(2), 218-228 [cit. 2022-11-27]. ISSN 17481708. Dostupné z: doi:10.1111/apha.12827
- [51] MAYORALAS, F. a ET AL. Running economy and performance. High and low intensity efforts during training and warm-up. A bibliographic review. In: *Arch. Med.* [online]. Deporte, s. 108-116 [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: [http://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/rev2\\_ingles.pdf](http://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/rev2_ingles.pdf)
- [52] VÁRNAY, František, Pavel HOMOLKA, Leona MÍFKOVÁ a Petr DOBŠÁK. *Spiroergometrie v kardiologii a sportovní medicíně*. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 2020. ISBN 978-80-271-2552-4.
- [53] BINDER, Ronald, Manfred WONISCH, Ugo CORRA, Alain COHEN-SOLAL, Luc VANHEES, Hugo SANER a Jean-Paul SCHMID. Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European journal of cardiovascular prevention and rehabilitation*. 2008, **15**(6), 726-734. ISSN 1741-8267. Dostupné z: doi:10.1097/HJR.0b013e328304fed4
- [54] *Running with Power / Stryd (Europe)* [online]. Stryd, 2014 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.stryd.com/eu/en>
- [55] Wattmetr Stryd. In: *Stryd* [online]. [cit. 2022-11-27]. Dostupné z: <https://blog.stryd.com/content/images/size/w2000/2022/09/2022-POD-RENDER-FILE-3.328.png>
- [56] PALLADINO, Steve. How does Stryd auto-CP work?. In: <https://docs.google.com> [online]. Palladino Power Project, 2020 [cit. 2022-12-10]. Dostupné z: <https://docs.google.com/document/d/e/2PACX-1vRBe-k5GiCz1Vqj9W25PxiAkLY1OffKM6k4EjcGy0JIFNC7ibNEcOUIpm2b3lANnJ5Rz-6GtmcemOfz/pub?fbclid=IwAR3T-74j3m3B30EQGM9a86SNU5pRijIwNdpYX1rq09ZtL36KGrQqf3Dpq30>
- [57] Přípevnění wattmetru Stryd na obuv. In: *Stryd* [online]. Stryd Team, 2022 [cit. 2022-12-04]. Dostupné z: [https://www.stryd.com/\\_next/image?url=https%3A%2F%2Fimages.ctfassets.net%2F8iip9pij3rta%2F5rhQQOmSFKeUysxt4kzZSk%2F2e4b30700907e0980b5c2740460bbb9c%2FGroup\\_1872\\_\\_2\\_.png&w=640&q=75](https://www.stryd.com/_next/image?url=https%3A%2F%2Fimages.ctfassets.net%2F8iip9pij3rta%2F5rhQQOmSFKeUysxt4kzZSk%2F2e4b30700907e0980b5c2740460bbb9c%2FGroup_1872__2_.png&w=640&q=75)
- [58] *RunScribe* [online]. Scribe Labs, 2014 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://runscribe.com/>

- [59] RSP\_Shoe\_Laces\_System. In: *RunScribe* [online]. RunScribe Labs, 2014 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: [https://runscribe.com/wp-content/uploads/2018/09/RSP\\_Shoe\\_Laces\\_System-1024x815.png](https://runscribe.com/wp-content/uploads/2018/09/RSP_Shoe_Laces_System-1024x815.png)
- [60] RSRed\_DualPods\_Front. In: *RunScribe* [online]. RunScribe Labs, 2014 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: [https://runscribe.com/wp-content/uploads/2021/03/RSRed\\_DualPods\\_Front.png](https://runscribe.com/wp-content/uploads/2021/03/RSRed_DualPods_Front.png)
- [61] Garmin dynamics pod. In: *Garmin* [online]. USA: Garmin, 1996 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://res.garmin.com/en/products/010-12520-00/g/ad-01.jpg>
- [62] Running Dynamics. In: *Garmin* [online]. USA: Garmin, 1996 [cit. 2023-01-22]. Dostupné z: <https://www.garmin.com/cs-CZ/garmin-technology/running-science/running-dynamics/>
- [63] IMBACH, Frank, Robin CANDAU, Romain CHAILAN a Stephane PERREY. Validity of the Stryd Power Meter in Measuring Running Parameters at Submaximal Speeds. *Sports* [online]. 2020, **8**(7) [cit. 2022-11-10]. ISSN 2075-4663. Dostupné z: doi:10.3390/sports8070103
- [64] AUSTIN, Casey, James HOKANSON, Peter MCGINNIS a Steve PATRICK. The Relationship between Running Power and Running Economy in Well-Trained Distance Runners. *Sports* [online]. 2018, **6**(4) [cit. 2022-11-10]. ISSN 2075-4663. Dostupné z: doi:10.3390/sports6040142
- [65] Manuál VO2 Master Pro. In: *VO2 Master Health Sensors* [online]. Kanada: Vernon, 2021 [cit. 2023-05-08]. Dostupné z: <https://vo2master.com/wp-content/uploads/2020/02/Manual20200209.pdf>
- [66] SCHOBER, Patrick, Christa BOER a Lothar SCHWARTE. Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation: Appropriate Use and Interpretation. *Anesthesia & Analgesia*. 2018, **126**(5). ISSN 0003-2999. Dostupné také z: [https://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/2018/05000/Correlation\\_Coefficients\\_\\_Appropriate\\_Use\\_and.50.aspx](https://journals.lww.com/anesthesia-analgesia/Fulltext/2018/05000/Correlation_Coefficients__Appropriate_Use_and.50.aspx)
- [67] WRIGHT, Sewall. *Correlation and Causation*. 1921, 557-585. Dostupné také z: <https://handle.nal.usda.gov/10113/IND43966364>
- [68] SHAPIRO, S. a M. WILK. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*. [Oxford University Press, Biometrika Trust], 1965, **52**(34), 591. ISSN 00063444. Dostupné z: doi:10.2307/2333709
- [69] MANN, H. a D. WHITNEY. On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *The Annals of*

- Mathematical Statistics* [online]. 1947, **18**(1), 50-60 [cit. 2023-05-09]. ISSN 0003-4851. Dostupné z: doi:10.1214/aoms/1177730491
- [70] KIM, Tae Kyun. T test as a parametric statistic. *Kja*. Korean Society of Anesthesiologists, 2015, **68**(6), 540-546. ISSN 2005-6419. Dostupné z: doi:10.4097/kjae.2015.68.6.540
- [71] WILCOXON, Frank. Individual Comparisons by Ranking Methods. *Biometrics Bulletin*. [International Biometric Society, Wiley], 1945, **1**(6), 80. ISSN 00994987. Dostupné z: doi:10.2307/3001968
- [72] GLASS, Gene V. Testing Homogeneity of Variances. *American Educational Research Journal*. American Educational Research Association, 1966, **3**(3), 187-190. ISSN 0002-8312. Dostupné z: doi:10.3102/00028312003003187
- [73] BOX, G. a D. COX. An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. [Royal Statistical Society, Wiley], 1964, **26**(2), 211. ISSN 00359246. Dostupné také z: <http://www.jstor.org/stable/2984418>
- [74] ZHANG, Dabao. A Coefficient of Determination for Generalized Linear Models. *The American Statistician*. Taylor & Francis, 2017, **71**(4), 310-316. ISSN 0003-1305. Dostupné z: doi:10.1080/00031305.2016.1256839
- [75] Statsmodels.stats.outliers\_influence.variance\_inflation\_factor. In: *Statsmodels* [online]. statsmodels-developers, 2009 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: [https://www.statsmodels.org/stable/generated/statsmodels.stats.outliers\\_influence.variance\\_inflation\\_factor.html](https://www.statsmodels.org/stable/generated/statsmodels.stats.outliers_influence.variance_inflation_factor.html)
- [76] MINKA, Thomas. Automatic choice of dimensionality for PCA. *Advances in neural information processing systems*. 2000, **13**.

# SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

## Zkratky:

ANT+	Advanced and Adaptive Network Technology
ATP	Adenosinetriphosphate
CP	Critical Power
CESA	CEntrum Sportovních Aktivit
FP	Form Power
FPR	Form Power Ratio
GCT	Ground Contact Time
HR	Heart Rate
LSS	Leg Spring Stifness
PO	Power Output
RE	Running Economy
SL	Stride Length
TO	Testovaná Osoba
USA	United States of America
VO	Vertical Oscilation
VUT	Vysoké Učení Technické v Brně

## Symboly:

$VO_2$	spotřeba kyslíku	[mL/kg/min]
$VO_{2max}$	maximální spotřeba kyslíku	[mL/kg/min]
$R^2$	koeficient determinace	
$r$	Pearsonův korelační koeficient	
$\alpha$	hladina významnosti stat. tesů	

## **SEZNAM PŘÍLOH**

<b>PŘÍLOHA A - VZTAHY MEZI VELIČINAMI MĚŘENÝMI WATTMETREM STRYD .....</b>	<b>64</b>
<b>PŘÍLOHA B - KORELAČNÍ MAPA VELIČIN MĚŘENÝCH WATTMETREM STRYD.....</b>	<b>65</b>
<b>PŘÍLOHA C - INFORMOVANÝ SOUHLAS .....</b>	<b>66</b>



## **Příloha A - Vztahy mezi veličinami měřenými wattmetrem Stryd**

Příloha zobrazuje vztahy mezi některými veličinami měřenými wattmetrem Stryd.

## **Příloha B - Korelační mapa veličin měřených wattmetrem Stryd**

Příloha je vyobrazením korelační mapy veličin měřených wattmetrem Stryd.

## **Příloha C - Informovaný souhlas**

Příloha je ukázkou informovaného souhlasu, který byl součástí podané žádosti projektu bakalářské práce pod č.j. 1/2023 a následně schválený Etickou komisí CESA VUT v roce 2023.