České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra teorie obvodů

Analýza variability srdeční frekvence při seskoku padákem

Kukla Jiří

Školitel: prof. Ing. Roman Čmejla, CSc.
Květen 2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kukla** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **494752**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**

Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Analýza variability srdeční frekvence při seskoku padákem

Název bakalářské práce anglicky:

Analysis of heart rate variability during skydiving

Pokyny pro vypracování:

1. Na základě rešerše literatury vyberte vhodné parametry pro analýzu variability srdeční frekvence při zátěžových situacích.
2. Ve spolupráci s Nadací Science 21 vytvořte databázi záznamů EKG signálů při seskoku padákem.
3. Implementujte robustní algoritmus pro získání parametrů variability srdeční frekvence v prostředí MATLAB.
4. Vybrané parametry vyhodnoťte na vytvořené databázi signálů.

Seznam doporučené literatury:

[1] Kim, H.-G., Cheon, E.-J., Bai, D.-S., Lee, Y. H., & Koo, B.-H. (2018). Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. Psychiatry Investigation, 15, 235–245.
[2] Cavalade M., Papadopoulou, V., Theunissen, S., Balestra, C., 2015. Heart rate variability and critical flicker fusion frequency changes during and after parachute jumping in experienced skydivers. Eur. J. Appl. Physiol. 115 (7), 1533–1545.
[3] Mazurek, K.; Koprowska, N.; Gajewski, J.; Zmijewski, P.; Skibniewski, F.; Rozanowski, K. Parachuting training improves autonomic control of the heart in novice parachute jumpers. Biocybern. Biomed. Eng. 2018, 38, 181–189.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Roman Čmejla, CSc. katedra teorie obvodů FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

prof. Ing. Roman Čmejla, CSc. podpis vedoucí(ho) práce	doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval prof. Ing. Romanu Čmejlovi, CSc., za vedení bakalářské práce, věcné upomínky a nápomocnost. Dále patří poděkování organizaci Science 21, bez které by tato práce ani nemohla vzniknout. Speciálně pak Tomáši Surovčíkovi za přímé zprostředkování dat a konzultaci ohledně měření.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 26. května 2023

Abstrakt

Tato práce se zabýva analýzou variability srdečního rytmu u sportovců provozujících parašutismus. Jedná se o extrémní sport, který způsobuje silný mentalní a fyziologický stres, obzvlášť u netrénovaných jedinců. Monitorováním tohoto stresu metodami invazivními, či neinvazivními jako je měření EKG a následná kalkulace HRV, můžeme odhadnout a předvídat fyziologické odezvy lidského těla na podobné stresory. V rámci této práce jsou zkoumány reakce subjektů s různou mírou tréninku při vystavení stresovým situacím spojeným se skokem z letadla. Cílem je porozumět, jak trénovanost a zkušenosti ovlivňují srdeční reakce a adaptabilitu organismu na extrémní podněty. Nejslibnějšími parametry související se stresem se ukázaly být HR, LF, SD2 a pNN50.

Klíčová slova: HRV, EKG, ANS, stres, akcelerometry, parašutismus

Školitel: prof. Ing. Roman Čmejla, CSc. Praha, Technická 1902/2, místnost: B2-525

Abstract

This thesis focuses on the heart rate variability in athletes practising skydiving. It is an extreme sport that causes significant mental and physiological strain on human body, especially in untrained individuals. By monitoring this stress using invasive or non-invasive methods such as EKG measurement and subsequent calculation of HRV, we can estimate and predict the physiological responses of the human body to similar stressors Within this study, the reactions of subjects with varying levels of training are examined when exposed to stressful situations associated with skydiving. he goal is to understand how fitness and experience influence cardiac responses and the adaptability of the body to extreme stimuli. The most promising parameters related to stress have been found to be HR, LF, SD2, and pNN50.

Keywords: HRV, ECG, ANS, stress, accelometers, parachuting, skydiving

Title translation: Analysis of heart rate variability during skydiving

Obsah

1 Úvod **1**
1.1 Popis problematiky 1
1.2 Měřené subjekty 1

2 Pořízení dat **3**

3 Motivace a přehled literatury **5**
3.1 HRV a stres 5
3.2 HRV při skydivingu 6

4 Fyziologie v abnormálních podmínkách **9**

5 Metodika vyhodnocování **11**
5.1 Odůvodnění metodiky 13

6 Výsledky **15**
6.1 Subjekt 2 15
6.2 Subjekt 3 16
6.3 Subjekt 1 - profesionální skydiver 16
6.3.1 Letní signál 16
6.3.2 Podzimní signál první 17
6.3.3 Podzimní signál druhý 17
6.4 Subjekt 6 18
6.5 Subjekt 5 19
6.6 Subjekt 4 19
6.7 Limitace práce 19

7 Závěr **21**

Literatura **23**

A Seznam zkratek **27**

B Grafy a parametry **29**
B.1 Subjekt 1 29
B.1.1 Letní signál 29
B.1.2 Podzimní signál první 31
B.1.3 Podzimní signál druhý 33
B.2 Subjekt 2 35
B.3 Subjekt 4 37
B.4 Subjekt 5 39
B.5 Subjekt 6 41

Obrázky

2.1 Fotodokumentace z průběhu měření 4

5.1 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt 1 11
5.2 Příklad Poincaré grafů 12

B.1 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt 1 30
B.2 Příklad Poincaré grafů 30
B.3 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt 1 32
B.4 Příklad Poincaré grafů 32
B.5 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt 1 34
B.6 Příklad Poincaré grafů 34
B.7 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt2 36
B.8 Příklad Poincaré grafů 36
B.9 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt 4 38
B.10 Příklad Poincaré grafů 38
B.11 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt 5 40
B.12 Příklad Poincaré grafů 40
B.13 Vizualizace HRV bpm 150 s pro subjekt 6 42
B.14 Příklad Poincaré grafů 42

Tabulky

1.1 Parametry subjektů 2

5.1 Příklad parametrů HRV v klidu pro subjekt 1 11
5.2 Příklad parametrů HRV před seskokem pro subjekt 1 12
5.3 Příklad parametrů HRV při seskoku pro subjekt 1 12
5.4 Příklad parametrů HRV po seskokem pro subjekt 1 12

B.1 Parametry HRV v klidu pro subjekt 1, letní signál 29
B.2 Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 1, letní signál . . . 29
B.3 Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 1, letní signál 29
B.4 Parametry HRV výskok pro subjekt 1, letní signál 29
B.5 Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 1, letní signál 30
B.6 Parametry HRV po dopadu 150s pro subjekt 1, letní signál 30
B.7 Parametry HRV v klidu pro subjekt 1, podzimní signál první . . 31
B.8 Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 1, podzimní signál první 31
B.9 Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 1, podzimní signál první 31
B.10 Parametry HRV při skoku pro subjekt 1, podzimní signál první . . 31
B.11 Parametry HRV po dopadu 600s subjekt 1, podzimní signál první . . 31
B.12 Parametry HRV po dopadu 150s subjekt 1, podzimní signál první . . 31
B.13 Parametry HRV v klidu pro subjekt 1, podzimní signál druhý . 33
B.14 Parametry HRV 600 sekund před výskokem subjekt 1, podzimní signál druhý 33
B.15 Parametry HRV 150 sekund před výskokem subjekt 1, podzimní signál druhý 33
B.16 Parametry HRV při skoku pro subjekt 1, podzimní signál druhý . 33

B.17 Parametry HRV 600 sekund po dopadu pro subjekt 1, podzimní signál druhý 33
B.18 Parametry HRV 150 sekund po dopadu pro subjekt 1, podzimní signál druhý 33
B.19 Parametry HRV klid pro subjekt 2 35
B.20 Parametry HRV 600s před momentem u dveří pro subjekt 2 . . 35
B.21 Parametry HRV 150s před momentem u dveří pro subjekt 2 . . 35
B.22 Parametry HRV moment u dveří pro subjekt 2 35
B.23 Parametry HRV po momentu u dveří 600s pro subjekt 2 35
B.24 Parametry HRV po momentu u dveří 150s pro subjekt 2 35
B.25 Parametry HRV v klidu pro subjekt 4 37
B.26 Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 4 37
B.27 Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 4 37
B.28 Parametry HRV výskok pro subjekt 4 37
B.29 Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 4 37
B.30 Parametry HRV po dopadu 150s pro subjekt 4 37
B.31 Parametry HRV v klidu pro subjekt 5 39
B.32 Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 5 39
B.33 Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 5 39
B.34 Parametry HRV výskok pro subjekt 5 39
B.35 Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 5 39
B.36 Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 5 39
B.37 Parametry HRV v klidu pro subjekt 6 41
B.38 Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 6 41
B.39 Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 6 41
B.40 Parametry HRV při výskoku pro subjekt 6 41
B.41 Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 6 41
B.42 Parametry HRV po dopadu 150s pro subjekt 6 41

Kapitola 1
Úvod

Cílem této práce bylo z měření při skocích z letadla, v rámci parašutismu (skydivingu), vytvořit databázi elektrokardiografických signálů (EKG). Následně signály zpracovat a vyhodnotit z nich získané parametry. Na základě literatury určit, které parametry korelují s různými fyzio-psychologickými stavy, obzvláště z hlediska stresu.

Přístup zvolený k řešení jednotlivých podúkolů a výsledky budou rozebrány v práci.

1.1 Popis problematiky

Vzhledem k povaze této úlohy nebylo možné libovolně získávat data pro potřeby bakalářské práce. Od začátku tedy nebylo jisté, kolik signálů vznikne, jak měření budou probíhat a zda se vůbec plánovaná měření uskuteční. Parametrů ovlivňujících tato rozhodnutí bylo mnoho, nejdůležitějšími z nich však bylo počasí, vytíženost vzdušných prostor a jejich okolí jinými entitami (armáda ČR apod.).

Konečný stav je databáze osmi naměřených signálů získaných od šesti různých lidí. Signálem se rozumí balíček všech naměřených dat, tedy pro případ této práce se jedná o EKG, akcelerometry a teplotu vzduchu. Délka každého z těchto signálů je v řádu jednotek hodin. Vzhledem k těmto okolnostem bude práce spíše kvalitativního než kvantitativního rázu a jednotlivé signály budou podrobně popsány a vyhodnoceny.

1.2 Měřené subjekty

Subjekty studie tvoří skupina šesti lidí, z čehož pět jsou muži a jedna slečna. Základní informace o účastnících studie se nacházejí v tabulce 1.1. Šestičlenou skupinu subjektů tvoří jeden profesionální skydiver, se zkušeností z více než 4000 výskoků. Na tomto subjektu jsou naměřeny tři signály.

Dále skupinu tvoří tři středně zkušení parašutisté se zkušeností nízkých stovek výskoků. U každého z nich byl pořízen jeden signál.

Posledními členy skupiny jsou dva absolutní amatéři, kteří nikdy předtím výskok z letadla nepodstoupili. Oba tyto subjekty také přispěli jedním sig-

nálem do celkové databáze. Slečna se řadí do skupiny absolutních amatérů. Měřené subjekty byly součástí práce dobrovolně, nikdo je tedy nemohl donutit k výskoku z letadla.

Oba amatérští účastníci se ve dveřích rozhodli nepodstoupit výskok, důvod není předmětem této práce. Důsledkem pro tuto práci je ovšem fakt, že 2 z 8 signálů v databázi neobsahují samostatný výskok. I tak jsou tato data přínosná a přispívají do výsledků bádání.

	věk	**výška**	**váha**	**počet seskoků**
Subjekt 1	46	176	70	4000+
Subjekt 2	20	172	60	0
Subjekt 3	20	-	-	0
Subjekt 4	49	171	-	300+
Subjekt 5	32	184	74	200+
Subjekt 6	35	187	94	200+

Tabulka 1.1: Parametry subjektů

Kapitola 2

Pořízení dat

Signály ke zpracování byly poskytnuty nadací Science 21, za což jim patří obrovské poděkování, bez nich by tato práce nemohla vzniknout. [2]

Databáze signálů nebyla pořízena během jednoho měření. Signály byly postupně sbírány během několika měsíců, takže vnější podmínky, tedy počasí se vždy lišily. Vliv počasí se nezměnil extrémně, neboť při nepříznivých podmínkách, jako silný déšť, případně za silného větru, by se vůbec výskok neuskutečnil. Ovšem teploty a atmosférické tlaky mohly být různé. Lišily se také časy, kdy během dne došlo k výskoku, což může také působit na ovlivnění výsledků, viz cirkadiální rytmus [22].

Měření probíhala na letištích v Roudnici nad Labem, Letňanech a Erpužicích. Signály subjektu 5 a subjektu 6 byly naměřeny na letišti v Roudnici. Signál subjektu 4 v Letňanech a signály subjektu 1, 2 a 3 v Erpužicích.

Subjekty byly dlouho před samotným výskokem připraveni, museli mít sbalené padáky, připravenou všechnu výbavu a následně se na ně napojily měřící přístroje. U účastníků se alespoň v nějákém úseku měření snímaly tyto signály: EEG, EKG, akcelerometry, venkovní teplota a saturace krve. K měření se využil přístroj FAROS 360, jehož součástí bylo EKG, akcelerometr a teploměr. Nejdůležitějšími signály pro tuto práci jsou: 3 svody EKG signálu a 3 signály z každé souřadné osy tříosého akcelerometru. Vzorkovací frekvence EKG signálu byla 1000 Hz a vzorkovací frekvence akcelerometrů 100 Hz.

Vybrané subjekty k měření se dostavily na letiště, následně provedly přípravu. Za pomoci Ing. Petra Ježdíka PhD. na ně byly umístěny měřáky, následovaly synchronizační úkony, aby se nemusel řešit offset signálu vůči sobě. Po nastoupení do letadla trvalo zhruba 20 minut než subjekty vystoupali do výšky výskoku. Subjekty neměli během výskoku žádné specifické úkoly, jediný jejich pokyn byl dostat se do stabilní pozice, otevřít padák a dopadnout na vyznačenou travnatou plochu blízko letiště. Dopadová plocha byla objekt ve tvaru kříže a subjekty od něj dopadaly do vzdálenosti 100 metrů na základě povětrnostních podmínek.

Na fotkách 2.1 je zobrazen profesionální skydiver - subjekt 1, který přispěl třemi signály do databáze. Důležité je zmínit, že dva skoky od subjektu 1 byly naměřeny po sobě ve stejném signálu a je to to dále okomentované ve výsledcích.

(a) : Při stoupání letadla

(b) : Těsně před výskokem

Obrázek 2.1: Fotodokumentace z průběhu měření

Kapitola 3

Motivace a přehled literatury

Ačkoliv na problematiku variability srdečního rytmu vzniklo za poslední desetiletí mnoho prací, málo které se zaměřují na fyzio-psychologický stress, který je spojen s extrémními aktivitami, jako je skydiving. Tato skutečnost bude zapříčiněna převážně velkou obtížností získávání takovýchto dat.

Literatura na toto téma je limitovaná, což ovšem přináší velký potenciál neprozkoumaných poznatků, které lze vyvodit. Přínosné bude ověřit dosavadní výsledky, porovnat v čem souhlasí a kde se tato práce liší.

Jednou z motivací může být pozorování odezvy organismu na volný pád. Heart rate variability, neboli variabilita srdečního rytmu, (HRV) je proměnlivé na základě pozorovaných časových oken. Bude přínosné prozkoumat, jak se parametry HRV mění na základě těchto časových úseků, obzvláště při takto dynamické činnosti.

Další motivací je pozorovat efekty extrémních podmínek na lidský organismus, ať už z hlediska fyziologického, psychologického, případně prozkoumat, jak se tělo na tyto stavy adaptuje.

Dosažené poznatky mají potenciál zlepšit hodnocení bezpečnosti při takto nebezpečných sportech a rozšířit poznatky o autonomním srdečním systému a jeho regulaci. Zajímavá je i otázka rozdílů hodnot pro různě trénované jedince.

Jak už bylo řečeno, na téma HRV vzniklo mnoho prací. Pro tuto práci bude důležité zhodnotit, co se již vypozorovalo při analýzách HRV ve stresu a pak zhodnotit specificky práce, které se zabývali tématem skydivingu, podle toho bude i kapitola rozdělena.

3.1 HRV a stres

HRV využívá měřítka/parametry, kterými kvantifikuje fluktuace po sobě jdoucích RR intervalů. Tyto parametry by měly být převážně úzce spojeny s kontrolou mechanismů autonomní nervové soustavy.

Některé studie se pokoušely přiřadit tyto matematické výpočty ke konkrétním mechanismům, které hrají roli v řízení srdce. V dnešní době je již pohled na tuto analýzu odlišný a tyto pokusy se považují přinejlepším za zjednodušení problematiky.

Jedním z příkladů je reprezentace poměru nízké a vysoké frekvence ve frekvenční doméně, tedy LF/HF ratio, jako spolehlivý index "sympatiko-vagální" rovnováhy [4].

Je proto potřeba problematiku správně interpretovat. HRV parametry odráží vzájemné působení všech mechanismů, které ovlivňují aktivitu převodního systému srdečního a snaží se přizpůsobit srdeční výdej pro potřeby lidského těla [1].

Otázkou je také, jak bude reagovat tělo, resp. HRV, na anticipaci stresu. Ne vždy jsme stresu vystaveni náhle, často můžeme predikovat, že budeme stresu v krátkodobé, či dlouhodobé budoucnosti vystaveni.

Studie ukazují, že pouhé očekávání nástupu stresoru vyvolává negativní odezvu na variabilitu srdečního rytmu [14] . Dále je rozdíl, mezi dlouhodobým a krátkodobým stresorem [18].

Reakcí na krátkodobé stresory, kterými se bude tato práce zabývat byly tyto: zvýšená průměrná srdeční frekvence, zvýšené SDNN a zvýšená aktivita v oblasti LF a HF. Studie, která zkoumala dlouhodobější segmenty měření při periodickém uvedení do mentálního stresu vedla k negativním efektům na HRV subjektů. Podle této studie byl psychologický stres spojen se zvýšením v poměru LF/HF [21].

Dobré by také bylo přinést poznatky z odvětví sportu. Skydiving je formou sportu a lidé provozující tuto činnost se dají považovat za atlety. Trénovaní atleti vykazují nižší hodnoty klidové srdeční frekvence [3]. Dále anticipace fyzické aktivity inhibuje parasympatickou větev srdeční inervace a zvyšuje aktivitu v sympatiku. Tento mechanismus vede ke zvýšení srdeční frekvence a kontraktibility srdce.

Nejobecnější a statisticky nejsignifikantnější výsledky přinesla meta-analýza, která se zabývala 37 studiemi HRV ve stresových situacích. Došla k závěru, že nejběžnější pozorování je nízká modulace parasympatické aktivity, tedy pokles parametru HF a zároveň nárůst modulace sympatické aktivity, tedy nárůst v pásmu LF ve frekvenční doméně HRV. Zároveň se usnesla na závěru, že HRV parametry jsou objektivní metrika, jež se může využít jako podpůrná metoda vyhodnocení psychologického stavu jedince a jeho stresové úrovně [11].

3.2 HRV při skydivingu

V současné době existuje pět prací zabývající se tímto tématem. V této kapitole bych rád shrnul dosavadní poznatky z těchto pěti prací [5, 6, 17, 12, 7], které jsou relevantní pro výsledky vyhodnocení této práce.

První článek

Podle první studie [5], které se účastnilo 18 trénovaných subjektů, byly pozorovány a následně získány tyto informace statistickým zpracováním:

1. Srdeční frekvence se během celého procesu zvyšuje, ale po dopadu se vrátí do původních hodnot

2. Snížení hodnot parametru pNN50 po dopadu oproti naměřeným hodnotám před výskokem
3. Zároveň nebyla pozorována změna HF složky před a při skoku, ale po dopadu se snižovala
4. Hodnota parametru LF se snížila hlavně při skoku
5. Parametr SD2 se signifikantně nezměnil oproti jeho hodnotě před výskokem, ale jeho hodnota byla nižší po dopadu, než před výskokem
6. Parametr SD1 klesal při výskoku, po dopadu byl zvýšený, ale zároveň menší než před výskokem

Druhý článek

Subjektem druhého článku bylo 38 trénovaných vojáků [6].

Při letu ke skoku a v okně 30 minut po dopadu bylo zjištěno:

1. Razantním nárůst složky LF
2. Značný pokles parametrů HF a RMSSD při letu ke skoku a v okně 30 minut po dopadu
3. Navýšená hodnota srdeční frekvence

Třetí článek

Dále existuje měření opět provedené na vojácích. Části s výskokem se účastnilo 11 subjektů [17] .

Pozorované výsledky se shodovaly s předchozí prací, tedy

1. Signifikantnímu nárustu tepové frekvence
2. Poklesu v hodnotách parametrů RMSSD a HF
3. Zvýšení v parametru LF

Celkově byl tedy pozorován nárůst v modulaci sympatiku a pokles v parasympatické nervové modulaci.

Čtvrtý článek

Velmi zajímavou prací je [12], jejímiž subjekty jsou 11 zkušených skokanů a 11 začátečníků. Výsledky této práce naznačují rozdíly mezi těmito skupinami v různých parametrech.

Nejdůležitější nálezy jsou,

1. Čas maxima HR během měření - u expertů je to v momentě otevření padáku a při dopadu, zatímco u začátečníků bylo pozorováno, že maximální HR dosahují při výskoku a při pádu s padákem

2. Parametry SDNN, RMSDD, LF, HF a TP - celkově vyšší u expertů než u nováčků, zatímco poměr LF/HD byl v expertní skupině signifikantně nižší. U nezkušené skupiny byly také pozorovány vyšší hodnoty parametru HR a HF než u expertů

Pátý článek

Velice specifickou prací je také [7]. Subjekty této práce jsou 2 zkušení vojáci-výsadkáři. Ti skákali synchronizovaně ve větší skupině lidí a při letu měli zaujmout jisté formace.

Práce se především zaměřovala na momenty, kdy při měření docházelo k maximálním hodnotám HR. Ukázalo se, že oba parašutisté maximálních hodnot tepové frekvence dosahovali při tvoření formace a letu před ní.

Tedy z dostupné literatury jsou takováto očekávání: Pravděpodobně bude docházet k signifikantnímu zvýšení HR v celé fázi měření, hlavně při výskoku, pádu a dopadu. Tyto rozdíly v srdeční frekvenci se budou lišit mezi zkušenými a méně zkušenými subjekty. Zároveň vlivem stresu bude docházet k vyšší modulaci sympatiku, tedy nárůstu LF a útlumu parasympatiku, tedy k poklesu HF. Opět tyto hodnoty a jejich vývoj bude pravděpodobně jiný na základě zkušenosti se skákáním a vlivem mentálního rozpoložení jedince, tedy psychickým stresem.

Zkušený skydiver by měl mít lepší variabilitu srdce v celém signálu, to se odrazí na hodnotách časové domény HRV. A parametry nelineární domény tedy SD1 a SD2 budou reagovat hlavně při výskoku a dopadu.

Je důležité upozornit na fakt, že všechny vzniklé práce zaujaly odlišné postoje k celé problematice. Každá z nich zvolila specifický přístup při postupu měření, vyhodnocování a celkových podmínkách, za kterých se data měřila. Jiné metody měření, nebo zpracování dat však mohou způsobit rozdílné závěry.

Kapitola 4

Fyziologie v abnormálních podmínkách

Práce se zaměřuje především na posouzení míry stresu vyvinuté na lidské tělo při náročných a pro lidský organismus nepřirozených činnostech, jako je skákání z letadla. Zároveň je důležité zhodnotit, jak tato zátěž koreluje s HRV parametry.

Interpretace těchto výsledků ovšem nemůže být přímočará, neboť se nejedná o prostředí jako například v klinických studiích, kdy měření biomarkerů obvykle probíhá za stacionárních podmínek, jednotlivé proměnné jsou izolované a pokus probíhá v kontrolovaném prostředí.

Subjekty jsou vystaveny velkému množství stresorů fyziologického i psychologického charakteru. Je nutné brát v potaz i fakt, že tyto externí i interní stresory nemusí mít nutně instantní odezvu na námi zkoumané parametry. Zároveň odeznění těchto stresorů nezaručuje okamžité navrácení lidského těla do stavu před vystavením [19].

V první řadě samotný výskok vyžaduje vybavení v podobě padáku, záložního padáku a výstroje. V kombinaci se všemi měřícími přístroji, které na sebe subjekty měly přidělané, se jedná o signifikantní váhu navíc, která vyvolává fyziologický stres, jež tělo musí konstantně překonávat [20, 16] .

Výstroj i s měřáky měli účastníci na sobě po celou dobu získávání signálů. Z praktických důvodů by nebylo možné nastrojit subjekty těsně před výskokem. Předpoklad je, že tepová frekvence bude po celou dobu měření z tohoto důvodu mírně navýšena [20, 16]. Tento předpoklad bude platit jak v klidovém režimu, kdy subjekty například čekaly na odlet, tak i v zájmových segmentech, tedy před výskokem z letadla, při výskoku a po dopadu, kde navíc dochází k sbalení padáku a urychlenému opuštění dopadového prostoru, což je vyvíjená fyziologická zátěž navíc.

Tělo přirozeně zvyšuje tepovou frekvenci při fyziologické zátěži, aby kompenzovalo zvýšenou potřebu produkce energie pro tyto účely [20, 16, 8].

Dalším z faktorů, který se promítne na odezvu lidského těla je rychle měnící se atmosférický tlak v důsledku vystoupání letadla do výšky výskoku. Vnější tlak se zmenší a bude menší oproti vnitřnímu tlaku, což může vyvolat únavu, bolesti či jisté změny vnímání, což přispěje jako další stresor na subjekt. [9] K tomuto rychlému vystoupání se váže i změna hustoty kyslíku v atmosféře. Jak postupně letadlo vystoupává výše, hustota kyslíku v atmosféře klesá. Aby tělo vyrovnalo přísun kyslíku do tkání, musí nadále zvyšovat rychlost

tepové frekvence. K tomuto stavu se referuje jako hypoxie a byl popsán jak u běžných lidí, tak u atletů, specificky i parašutistů [8, 9].

Jelikož je subjekt vystaven snížené koncentraci kyslíku pouze po krátkých časových intervalech, tělo reaguje jen krátkodobým nárůstem tepové frekvence, tedy objem vypuzené krve na jeden tep je stejný, pouze frekvence vzrůstá. V případě, že tělo je vystavováno tomuto stavu chronicky, či dokonce jedinec trvale pobývá ve vyšší nadmořské výšce, reakce organismu na tento stresor je zvýšení koncentrace červených krvinek v krevním řečišti a zvětšený dechový objem společně s vitální kapacitou plic. [10, 15]. Tento fakt by mohl být jedním z hlavních rozdílů mezi trénovanými a amatérskými skokany.

Dalším větším stresorem, hlavně psychologického rázu, ovlivňující převážně nováčky je pocit ztráty kontroly nad situací. Subjekty se vystavují pro lidské tělo neobvyklé situaci, kterou nemají plně ve své moci. Musí spoléhat na pilota letadla, funkčnost padáků, správnou přípravu od instruktorů, při letu mohou narazit na turbulence, případně se mohou markantně změnit povětrnostní podmínky a mnoho dalších proměnných [6]. Tento efekt na lidskou mysl je dobře popsán a v našem případě by mohl být umocněn sníženou mobilitou účastníků vzhledem k vybavení a měřícím přístrojům, které subjekty transportují na svém těle.

U sportovních a vojenských parašutistů byl pozorován fenomén, kdy dalším ze stresorů vyvíjený na psychiku subjektu byl strach ze selhání, v případě že subjekty měli úkol, který měli během seskoku případě záhy po něm splnit [6]. Tento stresor byl umocněn, pokud subjekty měly kooperovat v týmech, neboť selhání jednoho článku mohlo narušit úkon celku. Tento efekt zřejmě nebude pozorován, neboť subjekty této práce během skoku nevykonávali žádné úkony navíc.

Lidé, kteří vědomě podstupující měření a výzkumné procedury, vykazují rozdíly ve fyziologické odezvě. Tento jev je pečlivě prozkoumán v medicíně. Často se stává, že při měření krevního tlaku v ordinaci mají měřené subjekty elevované hodnoty, které neodpovídají reálným hodnotám v běžném dni [13]. Tedy samotné měření může ovlivnit získané hodnoty vyvoláním psychologické odezvy ve zkoumaném subjektu.

Posledním z faktorů, který by mohl mít vliv na výsledky pozorování a měření je respirační sinusová arytmie (RSA). Jde o fakt, že při nádechu má srdce tendenci zrychlit svojí frekvenci, a naopak při výdechu zpomalit. Tento fakt ve spojení s tím, že bude rychlost dýchání subjektů elevovaná v důsledku nadmořské výšky, může ovlivnit HRV parametry měření, neboť dochází k shlukování a dilatování po sobě jdoucích úderů srdce. K tomuto jevu dochází v důsledku, že parasympatická inervace plic je vedena nervus vagus, stejně jako u srdce a tyto dva orgány spojují další systémy v těle. [23]

Kapitola 5

Metodika vyhodnocování

Důležité pro hodnocení jsou klidové parametry HRV. Ty byly vypočítány z úseku signálu, který byl pokud možno časově nejvzdálenější od výskoku. Budou sloužit k porovnání s úseky před skokem, při volném pádu, při pádu s padákem a po dopadu.

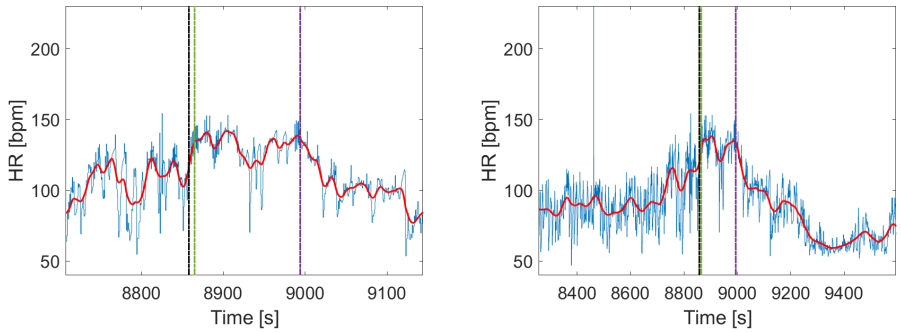
Dále bude posouzeno, zdali se tyto hodnoty vůbec dají za klidové parametry považovat. Klidové parametry budou vypočteny alespoň z 10 minutového úseku měřeného signálu.

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	79	0.772	0.088	0.054	0.054	360	27.82

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
855	66.07	0.038	0.118	0.322	0.824	0.242	3.408	2.101

Tabulka 5.1: Příklad parametrů HRV v klidu pro subjekt 1

Na obrázku B.13 bude vizuální reprezentace v časových úsecích 150 případně 600 sekund před výskokem a po dopadu. V grafu jsou postupně vyznačeny tyto úseky: výskok, otevření padáku, dopad.



Obrázek 5.1: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 1 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)

Dalším nástrojem pro hodnocení budou samotné HRV parametry spočtené v časovém okně 150 případně 600 sekund před výskokem a po dopadu. V případě, že to bude mít smysl, budou uvedeny i HRV parametry během volného pádu před otevřením padáku.

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	71	0.863	0.112	0.076	0.076	257	37.03

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
469	67.58	0.054	0.149	0.361	1.555	0.543	2.863	3.507

Tabulka 5.2: Příklad parametrů HRV před seskokem pro subjekt 1

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
179	71	0.861	0.121	0.063	0.063	63	30.43

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
128	61.84	0.045	0.165	0.270	0.499	0.341	1.466	2.956

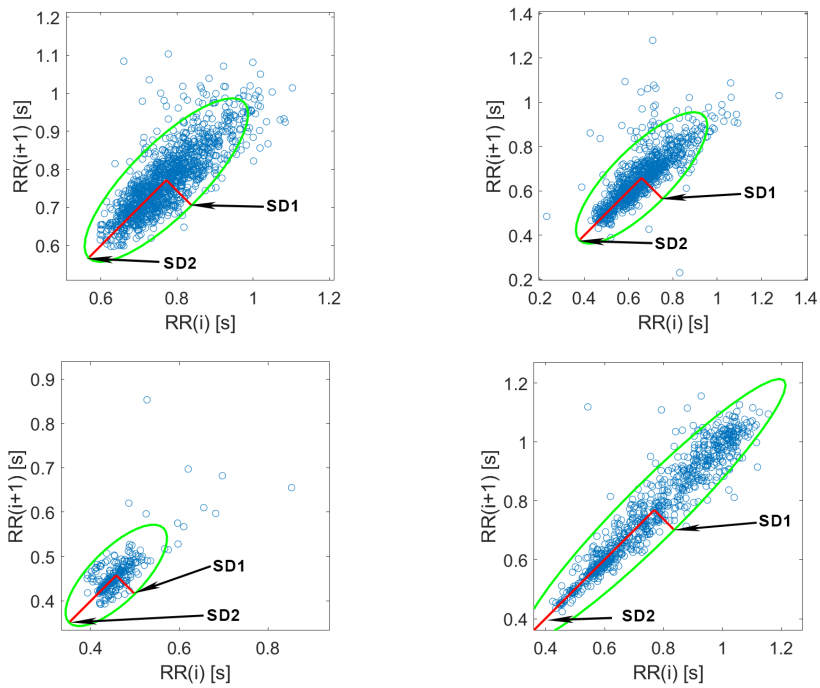
Tabulka 5.3: Příklad parametrů HRV při seskoku pro subjekt 1

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	76	0.805	0.127	0.051	0.051	168	22.55

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
446	59.87	0.036	0.176	0.205	0.571	0.211	2.701	3.504

Tabulka 5.4: Příklad parametrů HRV po seskokem pro subjekt 1

Grafickou reprezentaci využijeme také ve formě Poincarého Grafu. Tyto grafy budou opět vykresleny pro časové okno před výskokem, během výskoku, po dopadu a pro celý úsek, tedy před, při, po. V případě potřeby mohou být vykresleny i pro úsek volného pádu, případně pro úsek s naměřenými klidovými parametry HRV.



Obrázek 5.2: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)

5.1 Odůvodnění metodiky

V této podkapitole se budu věnovat důvodům, proč byla metodika hodnocení stanovena právě takto. V první řadě klidové parametry.

Určení, zdali se klidové parametry slučují s něčím, co by se podle literatury dalo označit za klidové parametry napoví, jestli subjekt byl alespoň více jak hodinu v relativním psychickém klidu, případně jestli již před odletem byl ve stresu. [24].

Dále nám tyto parametry poskytnou užitečný nástroj při porovnání spočtených parametrů HRV v zájmových oblastech, tedy před výskokem, během výskoku a po dopadu. Díky nim budeme moci lépe sledovat, zda se HRV parametry vyvíjí, případně jestli činnost subjektu nemá žádný vliv na variabilitu jeho srdečního rytmu.

Vizualizace HRV je užitečná pro posouzení vývoje srdečního rytmu. Z grafů je lehce nahlédnutelné, zdali se srdeční frekvence zrychluje nebo zpomaluje. Zdali se variabilita srdce zvyšuje, či snižuje. Jestli dochází ke krásnému sinusovému rytmu, případně jestli se srdce chová jako metronom.

Časová okna jsou vybraná z toho důvodu, že 150 sekund umožňuje snadno nahlédnout, jak se vyvíjelo HRV těsně před výskokem a ihned po dopadu. V těchto úsecích obvykle dochází k rapidním, dynamickým změnám. Ovšem v takto krátkém okně naopak nelze pozorovat, jak se srdce vyvíjelo při vzletu a stoupání do výšky výskoku. Jestli a jak dlouho se po dopadu vracela srdeční aktivita do předchozího stavu.

Tyto procesy jsou mnohem pomalejší, proto je potřeba je hledat v rozšířeném časovém okně, nejlépe co nejdelším. Bohužel signály po dopadu rychle končí, a tak nelze sledovat delší časové okno než je 10 minut. Zároveň 10 minut zhruba odpovídá době stoupání letadla, nabízí se to tedy jako ideální druhé časové okno pro porovnání hodnot předvýskokových a podopadových hodnot.

Vypočtené parametry HRV souvisí s vizualizací HRV, a tak se shodují s časovými okny v HRV grafech. Tedy v případě sledování dynamických jevů před výskokem a po dopadu jsou spočteny v 150 sekundových oknech, v případě sledování vývoje hodnot před skokem, či snaze zjistit, zdali se srdce po dopadu opět uklidňuje je to okno 600 sekundové.

To stejné platí pro Poincaré grafy, které jsou také vyčrtnuty v souvisejících časových oknech.

Kapitola 6

Výsledky

Všechny vytvořené grafy použité pro analýzu výsledků jsou k nahlédnutí v příloze stejně jako vypočítané parametry HRV. Z důvodu absence dostatku dat na smysluplné statistické zpracování budou jednotlivé signály detailně popsány.

6.1 Subjekt 2

Data jsou k vidění v sekci B.2.
Subjekt 2, jediná slečna, nikdy neměla zkušenost se skákáním z letadla a u dveří se rozhodla nevyskočit. Nejedná se tedy o analýzu signálu seskoku, ovšem moment u dveří se v signálu najít povedl. Výsledky analýzy jsou přínosné.

Klidové parametry byly vypočítány více jak jednu hodinu před výskokem. Zároveň jsou to nejlepší "klidové" parametry, které se daly v signálu najít. I tak se za klidové považovat nedají, už jen kvůli rychlosti srdeční frekvence, přesto tak budou označovány. [24]

Subjekt tedy byl očividně v obrovském psychickém stresu již před nasednutím do letadla a bude zajímavé pozorovat, jak se stav bude vyvíjet do momentu u dveří.

Po dobu stoupání letadla se intenzita psychického stresoru ještě více stupňuje. To vede k dalšímu stoupání tepové frekvence. Variabilita srdce je vizuálně nízká a potvrzují to vypočtené parametry. Roste modulace sympatiku, to se odráží především v tepové frekvenci, ale i ve frekvenční doméně, kdy LF parametr je signifikantně elevovaný proti klidovým hodnotám. Tento jev je zřetelný z HRV grafu a v časovém okně 150 sekund před místem u dveří je ještě více umocněna modulace sympatiku, HR je vyšší než v 10 minutovém okně před momentem u dveří, stejně tak LF parametr je na globálním maximu.

Ačkoliv při momentu u dveří dochází k další elevaci HR, tak ostatní parametry, jako například pNN50 a pNN20, spíše ukazují zlepšení srdeční variability. Zajímavé je, že se celkový výkon ve frekvenčním spektru signifikantně snížil až pod klidové hodnoty.

To ,co následuje, je velice unikátní moment pro analýzu. Podle vypočtených hodnot v 150 sekundovém okně po momentu u dveří dochází k absolutnímu zborcení variability srdce. Ač HR rapidně klesl i pod hodnoty před momentem

u dveří, tak variabilita klesla téměř k nule. Srdce pár minut pracuje velmi pravidelně, pouze 12% po sobě jdoucích tepů se liší o více než 20 ms. I odezva ve frekvenční oblasti je pozoruhodná. LF parametr se vrací téměř ke globálnímu maximu před momentem u dveří a signifikantně se i zvýšila modulace parasympatiku, na což poukazuje parametr HF. Je to pravděpodobně i důvod poklesu HR, neboť parasympatikus tlumí aktivitu sympatiku.

Rozšířením časového okna na 10 minut po momentu u dveří zjistíme, že se postupně všechny parametry vrací ke klidovým hodnotám ovšem i tak jsou proti klidovému" úseku elevované.

6.2 Subjekt 3

Subjekt 3 je taktéž úplný nováček a u dveří se rozhodl nevyskočit. Bohužel se v signálu nepovedl najít moment, kdy stál u dveří. V celém signálu se nenacházel žádný signifikantní nárůst HR jako u předchozího subjektu, ani rapidní změna HRV parametrů.

6.3 Subjekt 1 - profesionální skydiver

Data jsou k vidění v sekci B.1.
Profesionální skydiver přispěl do databáze třemi signály. První z nich byl změřen v létě 2022 a další dva ve stejný den v krátkém sledu za sebou v listopadu 2022.

6.3.1 Letní signál

Klidové hodnoty odpovídají nezatíženému člověku bez extrémních fyzických/-psychických stresorů. Je namístě konstatovat, že subjekt 1 byl před vzletem v dobrém mentálním rozpoložení bez stresu.

Při stoupání letadla dochází v 10 minutovém okně před výskokem k mírnému nárůstu srdečního tepu. Tuto skutečnost si můžeme vysvětlit dvěma způsoby. Prvním by mohl být vliv hypoxie, jelikož variabilita srdce je podle parametrů před výskokem lepší než u klidových hodnot. Druhá možnost je opět zvýšená modulace sympatické větve autonomního nervového systému (ANS), to by dokazoval nárůst parametru LF. Ve skutečnosti to bude pravděpodobně kombinací obou těchto faktorů.

Přiblížením na 150 sekundové okno již dochází k signifikantnějšímu nárůstu HR, a ač parametry ve frekvenční oblasti zůstavají stejné, tak v časové oblasti naznačují parametry mírné zhoršení srdeční variability. Můžeme tvrdit, že subjekt 1 se krátce před výskokem nachází v mírném stresu.

Přecházíme do segmentu výskoku. Bohužel o volném pádu nemůžeme vyvodit žádné závěry, neboť trval pouhých 7 sekund. Na grafu vizualizace není nic zásadního vidět a spočítané parametry pro 7 sekundový záznam nenesou žádnou signifikanci. Během výskoku dochází již k zásadnímu navýšení srdeční frekvence. Spočítané parametry pro segment výskoku naznačují jasné

snížení variability srdce, a to je viditelné i z HRV grafu. Ač ve frekvenční doméně dochází k mírnému poklesu LF, a naopak nárůstu HF, můžeme tvrdit, že na subjekt 1 během výskoku působí stresory.

Vývoj HR v tomto segmentu se shoduje s literaturou, kdy při otevření a dopadu jsou vysoké hodnoty HR, zatímco v době letu s padákem došlo k značnému snížení [12]. Ani deset minut po dopadu se spočítané hodnoty nevrátily do klidové podoby. Ovšem do jisté míry navrácení variability lze vizuálně pozorovat v HRV grafu. Zajímavým parametrem v podopadobé části je SD2, který se vyšplhal až nad klidovou hodnotu. Tento fakt je dobře pozorovatelný na Poincaré grafu.

6.3.2 Podzimní signál první

První podzimní signál se od letního signálu podstatně liší. Ač jsou klidové parametry opět velmi dobré a naznačují nestresový stav, tak první rozdíl je vidět hned při stoupání letadla do výšky výskoku.

V časovém okně 10 minut před výskokem se vypočtené HRV parametry téměř neliší od klidových. Toto by mohlo vyvrátit předchozí tvrzení o hypoxii a vysvětlit navýšení HR v předchozím signálu vnějšími stresory, jako například faktem, že se jednalo o první měření při seskoku, a to dokáže rozhodit i takto zkušeného jedince.

Na druhou stranu mezi signály je i rozdíl časové délky skoku a to podstatný. Vezmeme-li v potaz, že k otevření padáku došlo téměř po stejné časové době, znamela by to, že tento skok proběhl ze značně menší výšky a tím pádem se vliv hypoxie ještě nestihl projevit.

Zkrácením časového okna na 150 s před výskokem se téměř nic nezmění. Dochází k velice mírnému nárůstu srdeční frekvence a parametru LF. Tělo se tímto pomaličku připravuje na přicházející stresor. Bohužel čas mezi výskokem a otevřením padáku je opět velice krátký na jakékoliv směrodatné výsledky.

Trend v parametrech výskoku je podobný minulému signálu, ale parametry HRV během výskoku mírně klesly. Dochází opět k navýšení srdeční frekvence a složky LF, tedy modulaci sympatiku. Můžeme konstatovat, že subjekt v mírném stresu skutečně je. Z grafu lze opět vidět podobný vývoj HR během seskoku jako v minulém signálu, údolíčko mezi otevřením padáku a dopadem.

I v podopadovém segmentu je vidět změna oproti prvnímu signálu. Srdce se vrací do stavu před výskokem rychleji, tedy již během 2 minut jsou parametry na původních klidových hodnotách až na HR, který mírně zostává. Tento fakt bude pravděpodobně způsoben podopadovými aktivitami, jako je balení padáku a rychlé přesunutí na další výskok, který následuje krátce po tomto.

6.3.3 Podzimní signál druhý

Klidové parametry jsou stejné jako v signálu prvním, neboť se odehrály krátce po sobě. Na tomto signálu bude zajímavé pozorovat, jestli první signal zanechal dočasné následky, které se projeví na druhém výskoku. A zdá se, že ano. Ač srdeční frekvence má podobný trend signálu prvnímu, tak variabilita srdce je graficky i podle HRV parametrů mírně nižší. Značný rozdíl je i v TP

všech segmentů, oproti prvnímu seskoku je nižší a v segmentu po dopadu je na globálním minimu.

Za zmínku stojí i vývoj v nelineární doméně. Parametr SD2 se vyšplhal na globální maximum, i nad hodnotu v klidových parametrech, dobrá reprezentace tohoto faktu se nachází v Poincaré grafu po dopadu. Celkově se i srdce vrací pomaleji ke svým klidovým hodnotám.

Tyto dva po sobě jdoucí skoky ukazují, že únava, opakovanější zátěž, či chronická zátěž ať už psychické nebo fyzické povahy může vést ke zhoršení HRV parametrů i v takto krátkém časovém měřítku.

6.4 Subjekt 6

Data jsou k videní v sekci B.5.
Tento signál patří prvnímu z trojice středně zkušených parašutistů. Hodnoty klidových parametrů subjektu, alespoň co se týče srdeční frekvence, jsou velmi dobré. Subjekt není před vzletem ve stresu.

Ve vzletové fázi opět dochází k modulaci sympatiku. Parametr LF prudce vystřelí oproti klidovým hodnotám. HR se také značně zvedl. Vizuálně je variabilita nízká a čím víc se subjekt blíží k výskoku, tím více se zhoršuje. To lze pozorovat jak graficky, tak porovnáním parametrů v časovém okně 600 sekund a 150 sekund. Můžeme tedy říct, že se u subjektu stres časem zintenzivňuje.

Zde opět vyvstala otázka hypoxie. Seskok trval přes 4 minuty a volný pád měl délku 30 sekund. Z toho vyplývá, že výskoková výška musela být mnohem vyšší a tedy i stoupání do této výšky muselo trvat déle. To je dostatek času, aby se projevila hypoxie. A do jisté míry je možné, že za část zvýšení HR hypoxie opravdu může, ale opět je zde zřetelný dynamický trend krátce před výskokem, který můžeme jasně přiřadit působení psychického stresu.

Zajímavé je, že přiblížením k výskoku se modulace jak sympatiku, tak parasympatiku zmenšuje, nasvědčuje tomu pokles obou parametrů LF i HF, tedy i celkový výkon je menší, navzdory tomu HR dále roste.

Jak už bylo zmíněno, segment výskoku je oproti subjektu 1 mnohem delší. K otevření padáku dochází až 30 sekund po výskoku. Má tedy smysl zabývat se i volným pádem. Zdá se, že během volného pádu HR mírně stoupá a maxima dosáhne při otevření padáku. Od tohoto momentu začne mírně klesat a v signálu se opět vytvoří údolíčko s druhým vrcholem srdeční frekvence při dopadu. Variabilita je v celé délce výskoku téměř nulová. Znovu to potvrzují jak vypočtené parametry HRV tak vizualizace HRV pomocí grafu.

Observací Poincaré grafu tohoto výskoku zjistíme, že se jedná téměř o kružnici. Subjekt se během výskoku nachází v extrémním stresu. Segment 150 sekund po dopadu rozhodně není dostatečný pro návrat hodnot do klidového stavu. V 600 sekundách po dopadu se variabilita stihla vrátit do podoby před výskokem, ale srdce se stále nenachází v klidovém teritoriu.

6.5 Subjekt 5

Data jsou k viděni v sekci B.4.
Druhý subjekt ze skupiny středně zkušených parašutistů má klidové parametry na pomezí, kdy se ještě dají považovat za klidové. Trend se vyvíjí podobně jako u subjektu 6. Při vzletu je mírný nárůst HR, a zvýšená aktivita sympatické části inervace. Chvíli před výskokem se rapidně zvedne srdeční frekvence a zde nastává změna oproti minulému subjektu.

Při volném pádu subjektu HR klesá a v momentě otevření padáku opět rapidně vstoupne. Následně se vytvoří údolíčko, ale při dopadu opět rapidně stoupá HR až do globálního maxima, kdy HR dosahuje lokálně hodnoty až 160 tepů/min okamžité srdeční frekvence.

Zde nastává další rozdíl oproti subjektu 6, srdce se rychle vrací do hodnot před skokem, v oblasti 9 minutového okna jsou hodnoty parametrů dokonce mnohem lepší než předskokové hodnoty, bohužel tento signál končí 9 minut po dopadu.

6.6 Subjekt 4

Data jsou k videní v sekci B.3. Poslední ze skupiny středně zkušených skydiverů má špatné klidové parametry. Subjekt je ve stresu ještě před nastoupením do letadla. Při stoupání se opakuje stejný stereotyp. Růst modulace sympatiku, zvýšení HR. Ovšem u tohoto jedince dochází i k drastické snížení variability ještě před výskokem z latedla. Překvapením proto je, že v segmentu výskoku jeho variabilita z ničeho nic raketově vyroste a parametr pNN50 společně s pNN20 je lepší než u profesionálního skydivera v klidu, alarmující je tento fakt o to víc, že subjekt má v tomto segmentu průměrné HR kolem 150. Zároveň v signálu není údolíčko mezi otevřením padáku a dopadem. Graf HRV spíše ukazuju rostoucí tendenci HR během seskoku až k vrcholu v bodě dopadu. Zaznamenán byl i interval volného pádu

6.7 Limitace práce

Výsledky dosažené bádáním byly limotované absencí většího počtu dat pro řádné statistické zpracování. Ač časově a finančně náročné, bylo by zajímavé vidět širší škálu subjektů, jak věkového charakteru, tak zkušenostního.

Bylo by dobré porovnat, jak se tělo adaptuje na výskok v různých výškách a obzvláště u začátečníku, jak si postupným tréninkem zvyká na stresory spojené s výskokem. Dále by bylo zajímavé zkoumat klidové parametry subjektů v jiný den, kdy neanticipují tuto fyzio-psychologickou zátěž.

A přínosné by mohlo být porovnání HRV parametrů za stejné srdeční frekvence při čistě fyzické zátěži již změřených jedinců a vyvodit, zda existují rozdíly v korelujících parametrech. Další možné zlepšení by mohlo být ve formě vyplnění dotazníku subjekty na percepci psychologického stavu před skokem. To, že se jedinec necítí ve stresu neznamená, že jeho tělo tento

stresor nemůže vnímat a patřičně na něj reagovat. Observace porovnání subjektivního percepčního stresu vůči objektivním metrikám by mohla přinést zajímavé výsledky. Nové poznatky by také mohli vzniknout v kombinaci těchto výsledků s výsledky dalších měřených biomarkerů, jako je okysličení krve, rozbor krevního obrazu apod.

Kapitola 7

Závěr

Kontrétní závěry na základě statistiky nelze vyvodit neboť na to není dostatek dat. I tak bylo možné při analýze sledovat jisté trendy, které se týkaly všech nebo alespoň většiny účastníků práce.

Nejvýraznější element, který spojoval všechny signály spočíval v nárůstu HR. Srdeční frekvence vždy dosahovala maximální hodnoty během výskoku, případně u subjektu, který neskákal, během momentu u dveří. Samotný vývoj HR se napříč signály lišil. Ačkoliv se maximální hodnota objevovala během výskoku, u některých jedinců tomu tak bylo při otevření padáku, u jiných při dopadu na zem a u některých přímo při opuštění letadla. Z pozorování by se dalo tvrdit, že výsledky souhlasily s [12].

V doméně srdeční frekvence se ovšem lišily i jiné parametry, například na základě zkušeností a vytrénovanosti. U profesionálního parašutisty bylo jasně vidět, že elevace HR přichází pomaleji a pozvolněji. K většímu nárůstu dojde až časově blízko k výskoku. Během výskoku, je hodnota HR zvýšená podstatně méně než u netrénovaných, či mírně trénovaných jedinců. A v neposlední řadě jakmile stresor přestane působit na subjekt, je rychleji schopný dostat hodnoty HRV do klidových parametrů. Toto byly hlavní pozorované rozdíly mezi různě cvičenými jedinci z hlediska srdeční frekvence.

Dalším pozorováním, byl celkem běžný nárůst LF složky během letu k výskoku u všech skupin subjektů. LF tedy také opravdu souvisí s mentálním stresem a potvrzuje to nálezy, které provedli studie [12] [5] [17].

Dalším velice slibným parametrem, který krásně odrážel nejen hladinu stresu, ale také variabilitu srdce je pNN50. U většiny subjektů byl pozorován rapidní pokles tohoto parametru hlavně ve fázi výskoku, u některých se po dopadu nevrátil na předskokové hodnoty ani v 10 minutovém okně. "Time recovery"tohoto parametru opět odráží robustnost autonomního nervového systému při vypořádání se se stresem. Jak jsme si mohli všimnout například u Subjektu 1 - profesionálního skydivera pokles tohoto parametru u něj byl pouze mírný a během chvilky po dopadu ho dostal zpět pod kontrolu.

Zajímavý byl ovšem úkaz, kdy provedla dva po sobě následující výskoky, což značně zpomalilo jeho schopnost vrátit se na původní HRV hodnoty. Posledním z nadějných parametrů je SD2, a to z důvodu, že rychle reaguje na dynamický vývoj srdce. Jeho hodnota se téměř vždy po dopadu vrátila poměrně rychle do původních hodnot, i přes fakt, že během stresových fází

tento parametr často drasticky klesal.

Literatura

[1] Uptodate, Aug 2022. URL: https://www.uptodate.com/contents/evaluation-of-heart-rate-variability?search=HRV&source=search_result&selectedTitle=1~116&usage_type=default&display_rank=1.

[2] Nadace Science 21. URL: https://science21.cz/.

[3] André E Aubert, Bert Seps, and Frank Beckers. Heart rate variability in athletes. *Sports medicine*, 33:889–919, 2003.

[4] George E Billman. The lf/hf ratio does not accurately measure cardiac sympatho-vagal balance, 2013.

[5] M Cavalade, Virginie Papadopoulou, Sigrid Theunissen, and Costantino Balestra. Heart rate variability and critical flicker fusion frequency changes during and after parachute jumping in experienced skydivers. *European journal of applied physiology*, 115:1533–1545, 2015.

[6] Vicente Javier Clemente-Suárez, José Juan Robles-Pérez, and Jesús Fernández-Lucas. Psycho-physiological response in an automatic parachute jump. *Journal of Sports Sciences*, 35(19):1872–1878, 2017.

[7] I González-Moro, M Poyatos, J Albaladejo, and V López. Cardiac stress associated with display parachuting. *Arch. Med. Deporte*, 37:24–29, 2020.

[8] Sheldon Hanton, David Fletcher, and Guy Coughlan. Stress in elite sport performers: A comparative study of competitive and organizational stressors. *Journal of sports sciences*, 23(10):1129–1141, 2005.

[9] Masaki Kanai, Fumio Nishihara, Tatsuya Shiga, Hitoshi Shimada, and Shigeru Saito. Alterations in autonomic nervous control of heart rate among tourists at 2700 and 3700 m above sea level. *Wilderness & environmental medicine*, 12(1):8–12, 2001.

[10] Keisho Katayama, Kohei Sato, Hiroshi Matsuo, Koji Ishida, Ken-ichi Iwasaki, and Miharu Miyamura. Effect of intermittent hypoxia on oxygen uptake during submaximal exercise in endurance athletes. *European journal of applied physiology*, 92:75–83, 2004.

[11] Hye-Geum Kim, Eun-Jin Cheon, Dai-Seg Bai, Young Hwan Lee, and Bon-Hoon Koo. Stress and heart rate variability: a meta-analysis and review of the literature. *Psychiatry investigation*, 15(3):235, 2018.

[12] Krzysztof Mazurek, Nawoja Koprowska, Jan Gajewski, Piotr Zmijewski, Franciszek Skibniewski, and Krzysztof Różanowski. Parachuting training improves autonomic control of the heart in novice parachute jumpers. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 38(1):181–189, 2018.

[13] Thomas G Pickering. White coat hypertension. *Current opinion in nephrology and hypertension*, 5(2):192–198, 1996.

[14] Matias M Pulopulos, Marie-Anne Vanderhasselt, and Rudi De Raedt. Association between changes in heart rate variability during the anticipation of a stressful situation and the stress-induced cortisol response. *Psychoneuroendocrinology*, 94:63–71, 2018.

[15] Turhan San, Senol Polat, Cemal Cingi, Gorkem Eskiizmir, Fatih Oghan, and Burak Cakir. Effects of high altitude on sleep and respiratory system and theirs adaptations. *The Scientific World Journal*, 2013, 2013.

[16] Iñigo San-Millán and George A Brooks. Assessment of metabolic flexibility by means of measuring blood lactate, fat, and carbohydrate oxidation responses to exercise in professional endurance athletes and less-fit individuals. *Sports medicine*, 48:467–479, 2018.

[17] Joaquín Sánchez-Molina, José J Robles-Pérez, and Vicente J Clemente-Suárez. Effect of parachute jump in the psychophysiological response of soldiers in urban combat. *Journal of medical systems*, 41:1–7, 2017.

[18] C Schubert, M Lambertz, RA Nelesen, W Bardwell, J-B Choi, and JE Dimsdale. Effects of stress on heart rate complexity—a comparison between short-term and chronic stress. *Biological psychology*, 80(3):325–332, 2009.

[19] C Schubert, M Lambertz, RA Nelesen, W Bardwell, J-B Choi, and JE Dimsdale. Effects of stress on heart rate complexity—a comparison between short-term and chronic stress. *Biological psychology*, 80(3):325–332, 2009.

[20] B Silke, SJ Watt, and SH Taylor. The circulatory response to lifting and carrying and its modification by beta-adrenoceptor blockade. *International journal of cardiology*, 6(4):527–536, 1984.

[21] RP Sloan, PA Shapiro, E Bagiella, SM Boni, M Paik, JT Bigger Jr, RC Steinman, and JM Gorman. Effect of mental stress throughout the day on cardiac autonomic control. *Biological psychology*, 37(2):89–99, 1994.

[22] Martha Hotz Vitaterna, Joseph S Takahashi, and Fred W Turek. Overview of circadian rhythms. *Alcohol research & health*, 25(2):85, 2001.

[23] Fumihiko Yasuma and Jun-ichiro Hayano. Respiratory sinus arrhythmia: why does the heartbeat synchronize with respiratory rhythm? *Chest*, 125(2):683–690, 2004.

[24] Dongfeng Zhang, Xiaoli Shen, and Xin Qi. Resting heart rate and all-cause and cardiovascular mortality in the general population: a meta-analysis. *Cmaj*, 188(3):E53–E63, 2016.

Příloha A

Seznam zkratek

HRV	Hear rate variability
HR	Heart rate
ANS	Autonomný nervový systém
EKG	Elektrokardiogram
RR	Interval mezi R špičkami
LF	Low-frequency
HF	High-frequency
TP	Total power
BPM	údery za minutu

Příloha B

Grafy a parametry

B.1 Subjekt 1

B.1.1 Letní signál

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	74	0.831	0.116	0.077	0.077	275	38.19

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
503	69.86	0.054	0.155	0.352	1.52	0.497	3.057	3.507

Tabulka B.1: Parametry HRV v klidu pro subjekt 1, letní signál

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	94	0.659	0.121	0.077	0.077	307	33.74

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
644	70.77	0.054	0.162	0.336	1.566	0.413	3.79	3.498

Tabulka B.2: Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 1, letní signál

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	108	0.574	0.11	0.078	0.078	82	31.54

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
162	62.31	0.055	0.145	0.379	1.569	0.38	4.129	3.525

Tabulka B.3: Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 1, letní signál

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
136	132	0.458	0.047	0.034	0.034	27	9.12

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
96	32.43	0.024	0.062	0.388	1.373	0.714	1.923	3.86

Tabulka B.4: Parametry HRV výskok pro subjekt 1, letní signál

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	83	0.769	0.182	0.055	0.055	199	25.51

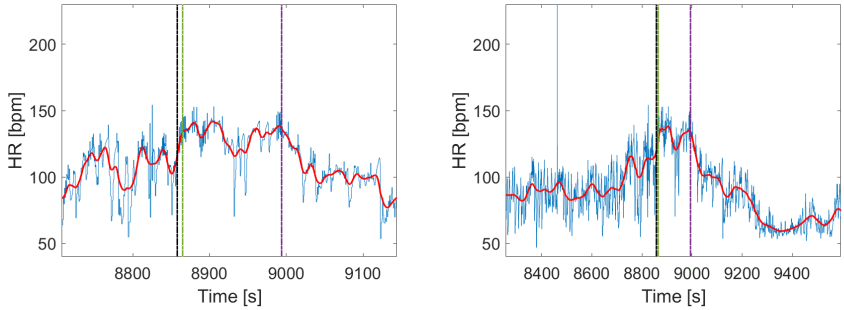
NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
450	57.69	0.039	0.254	0.153	0.364	0.119	3.045	3.498

Tabulka B.5: Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 1, letní signál

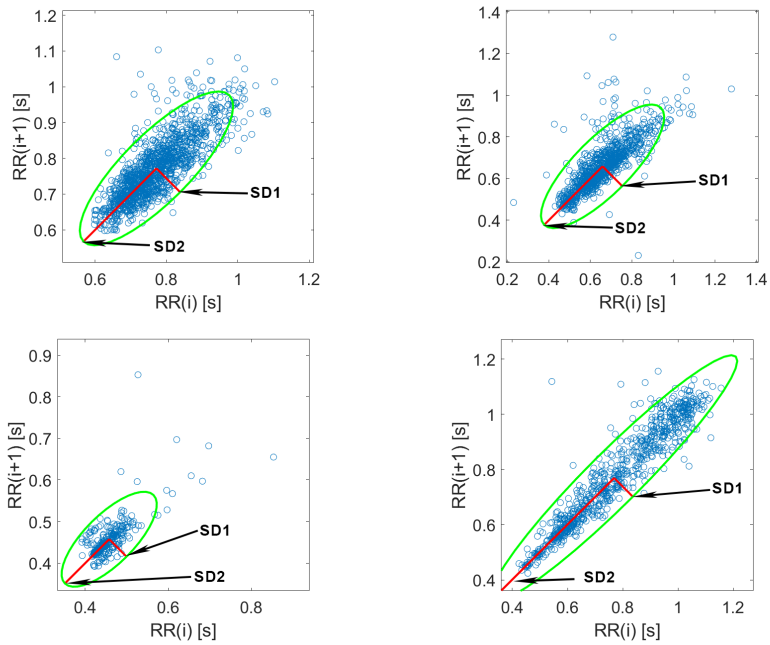
délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	104	0.592	0.101	0.051	0.051	35	13.89

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
92	36.51	0.036	0.138	0.261	0.769	0.381	2.017	3.518

Tabulka B.6: Parametry HRV po dopadu 150s pro subjekt 1, letní signál



Obrázek B.1: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 1 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)



Obrázek B.2: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)

B.1.2 Podzimní signál první

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	73	0.853	0.149	0.071	0.071	266	37.84

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
506	71.98	0.05	0.205	0.245	0.68	0.345	1.968	3.5

Tabulka B.7: Parametry HRV v klidu pro subjekt 1, podzimní signál první

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	72	0.857	0.143	0.071	0.071	264	37.77

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
504	72.1	0.05	0.196	0.256	0.654	0.371	1.764	3.501

Tabulka B.8: Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 1, podzimní signál první

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	79	0.795	0.168	0.073	0.073	63	33.51

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
132	70.21	0.052	0.232	0.223	0.798	0.235	3.397	3.526

Tabulka B.9: Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 1, podzimní signál první

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
94	105	0.583	0.089	0.057	0.057	45	28.13

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
95	59.38	0.04	0.119	0.338	1.295	0.445	2.913	2.822

Tabulka B.10: Parametry HRV při skoku pro subjekt 1, podzimní signál první

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	86	0.726	0.143	0.059	0.059	275	33.29

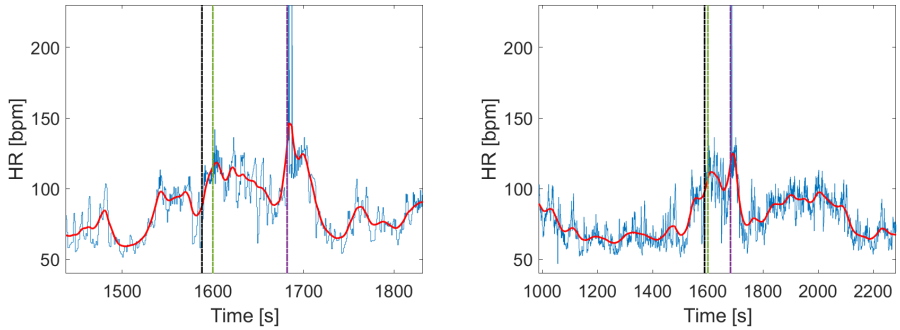
NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
605	73.24	0.042	0.198	0.211	0.421	0.164	2.565	3.497

Tabulka B.11: Parametry HRV po dopadu 600s subjekt 1, podzimní signál první

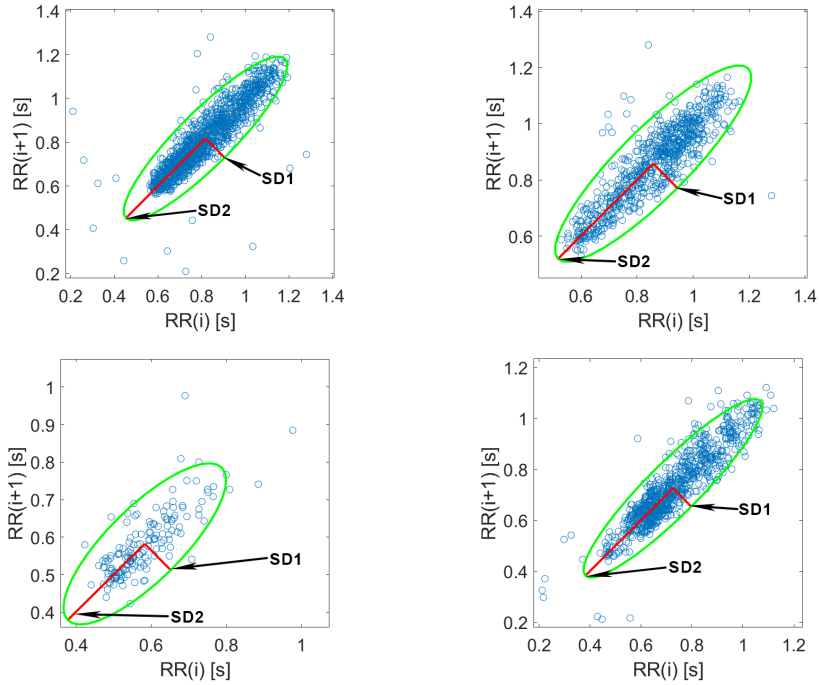
délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	92	0.703	0.172	0.073	0.072	78	36.79

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
161	75.94	0.052	0.238	0.217	0.462	0.266	1.739	3.512

Tabulka B.12: Parametry HRV po dopadu 150s subjekt 1, podzimní signál první



Obrázek B.3: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 1 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)



Obrázek B.4: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)

B.1.3 Podzimní signál druhý

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	73	0.853	0.149	0.071	0.071	266	37.84

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
506	71.98	0.05	0.205	0.245	0.68	0.345	1.968	3.5

Tabulka B.13: Parametry HRV v klidu pro subjekt 1, podzimní signál druhý

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	83	0.743	0.131	0.056	0.056	268	33.25

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
591	73.33	0.04	0.181	0.219	0.492	0.165	2.977	3.505

Tabulka B.14: Parametry HRV 600 sekund před výskokem subjekt 1, podzimní signál druhý

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	74	0.83	0.132	0.067	0.067	62	34.44

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
126	70	0.047	0.181	0.262	0.846	0.377	2.243	3.522

Tabulka B.15: Parametry HRV 150 sekund před výskokem subjekt 1, podzimní signál druhý

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
82	107	0.571	0.075	0.041	0.041	32	22.38

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
94	65.73	0.029	0.102	0.284	0.493	0.192	2.571	3.228

Tabulka B.16: Parametry HRV při skoku pro subjekt 1, podzimní signál druhý

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	76	0.844	0.215	0.061	0.061	234	32.96

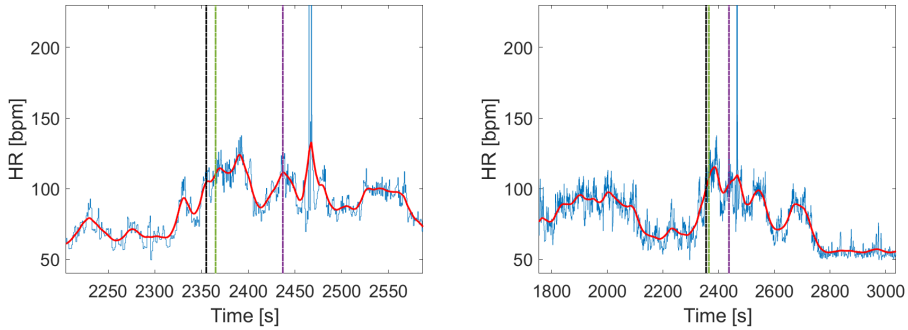
NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
492	69.3	0.043	0.301	0.143	0.167	0.093	1.801	3.501

Tabulka B.17: Parametry HRV 600 sekund po dopadu pro subjekt 1, podzimní signál druhý

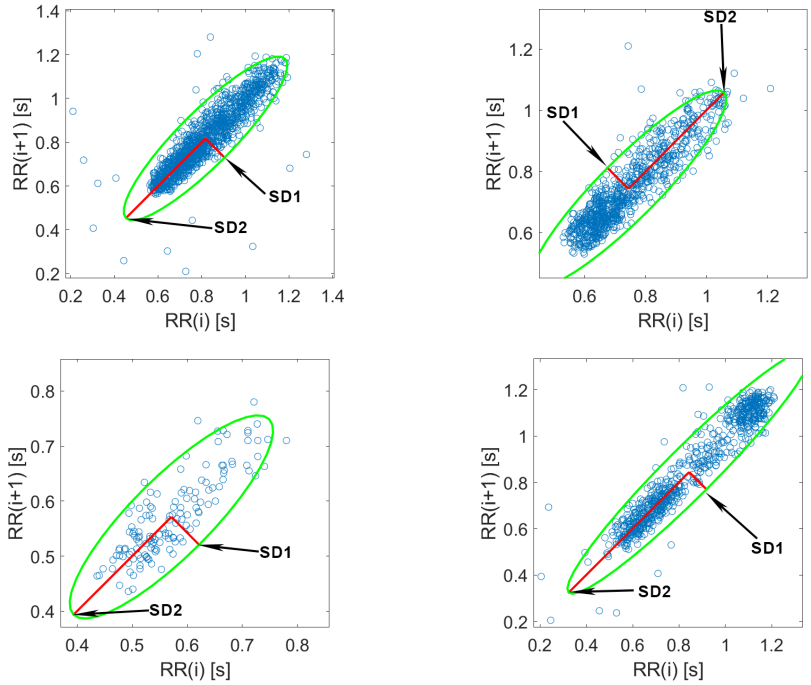
délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	97	0.636	0.093	0.064	0.064	62	26.38

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
150	63.83	0.045	0.123	0.366	1.018	0.409	2.489	3.491

Tabulka B.18: Parametry HRV 150 sekund po dopadu pro subjekt 1, podzimní signál druhý



Obrázek B.5: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 1 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)



Obrázek B.6: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)

B.2 Subjekt 2

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	99	0.615	0.065	0.031	0.031	104	10.68

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
408	41.89	0.022	0.089	0.246	0.868	0.649	1.338	3.503

Tabulka B.19: Parametry HRV klid pro subjekt 2

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	129	0.469	0.04	0.023	0.023	79	6.18

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
301	23.53	0.016	0.054	0.3	0.898	0.384	2.338	3.463

Tabulka B.20: Parametry HRV 600s před momentem u dveří pro subjekt 2

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	136	0.445	0.047	0.033	0.033	52	15.52

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
141	42.09	0.023	0.062	0.375	1.208	0.406	2.976	3.446

Tabulka B.21: Parametry HRV 150s před momentem u dveří pro subjekt 2

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
200	158	0.384	0.033	0.033	0.033	75	14.4

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
235	45.11	0.023	0.04	0.577	0.23	0.193	1.191	2.379

Tabulka B.22: Parametry HRV moment u dveří pro subjekt 2

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	120	0.506	0.059	0.027	0.027	86	7.26

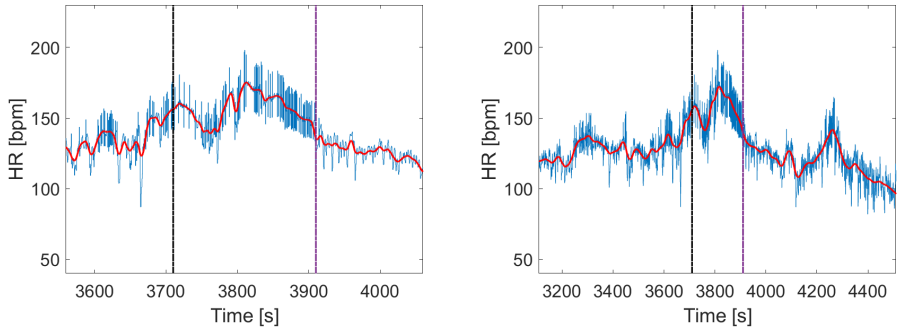
NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
399	33.7	0.019	0.081	0.235	0.41	0.558	0.736	3.495

Tabulka B.23: Parametry HRV po momentu u dveří 600s pro subjekt 2

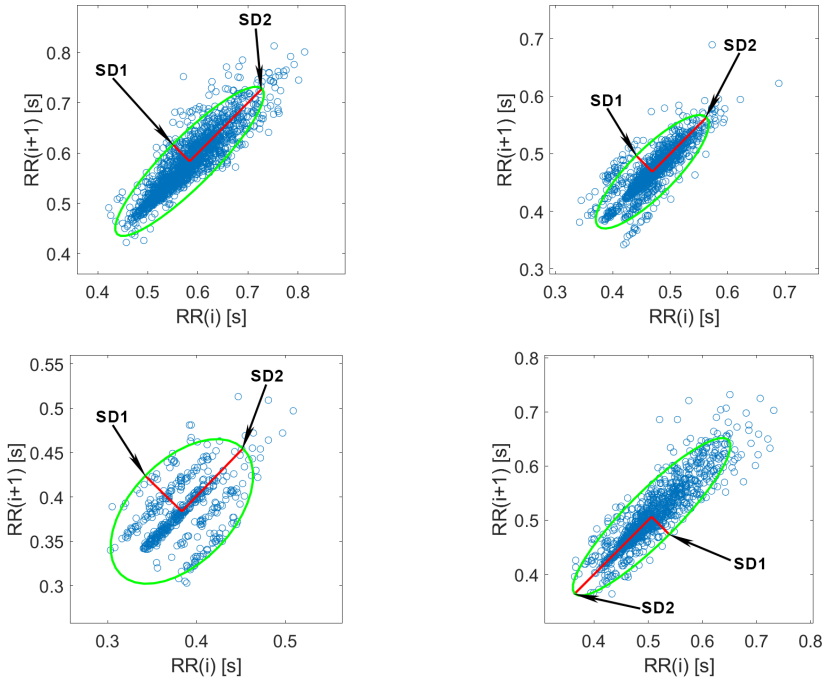
délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	127	0.475	0.028	0.014	0.014	3	0.96

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
37	11.78	0.01	0.038	0.258	1.011	1.076	0.94	3.515

Tabulka B.24: Parametry HRV po momentu u dveří 150s pro subjekt 2



Obrázek B.7: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 2 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)



Obrázek B.8: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)

B.3 Subjekt 4

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	118	0.509	0.03	0.028	0.028	65	5.52

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
166	14.1	0.02	0.038	0.528	0.742	0.206	3.594	3.412

Tabulka B.25: Parametry HRV v klidu pro subjekt 4

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	120	0.502	0.035	0.029	0.029	72	6.03

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
203	16.99	0.021	0.045	0.455	0.635	0.159	3.991	3.424

Tabulka B.26: Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 4

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	126	0.479	0.037	0.022	0.022	23	7.37

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
79	25.32	0.016	0.05	0.311	0.567	0.079	7.137	3.457

Tabulka B.27: Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 4

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
179	150	0.409	0.052	0.079	0.079	140	32.04

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
325	74.37	0.056	0.048	1.168	0.172	0.425	0.405	2.24

Tabulka B.28: Parametry HRV výskok pro subjekt 4

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	116	0.537	0.091	0.034	0.034	106	9.83

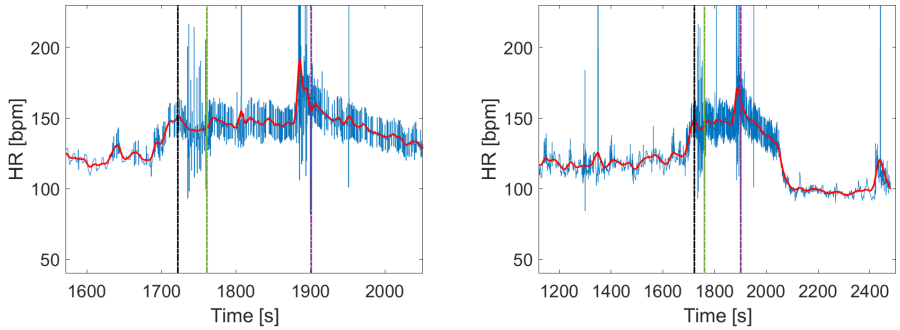
NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
306	28.39	0.024	0.126	0.19	0.103	0.053	1.933	3.608

Tabulka B.29: Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 4

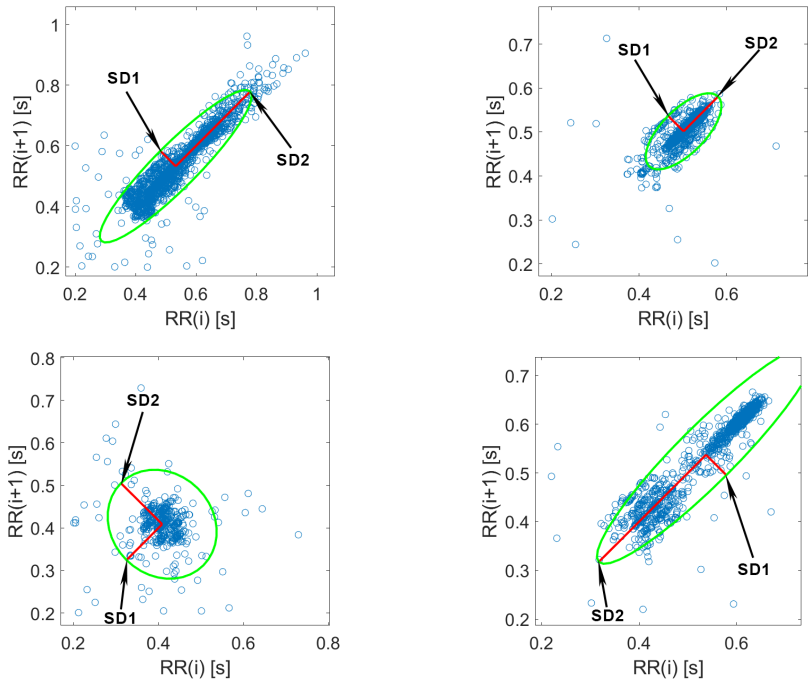
délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	143	0.422	0.038	0.046	0.046	80	22.54

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
231	65.07	0.033	0.043	0.76	0.149	0.183	0.816	3.164

Tabulka B.30: Parametry HRV po dopadu 150s pro subjekt 4



Obrázek B.9: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 4 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)



Obrázek B.10: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)

B.4 Subjekt 5

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	99	0.626	0.095	0.057	0.057	195	20.35

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
494	51.57	0.04	0.128	0.314	1.083	0.36	3.005	3.492

Tabulka B.31: Parametry HRV v klidu pro subjekt 5

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	97	0.627	0.08	0.033	0.033	109	11.4

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
415	43.41	0.023	0.111	0.211	0.996	0.306	3.259	3.501

Tabulka B.32: Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 5

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	107	0.578	0.09	0.033	0.033	28	10.81

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
97	37.45	0.023	0.125	0.186	0.783	0.236	3.312	3.515

Tabulka B.33: Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 5

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
246	139	0.434	0.037	0.032	0.032	37	6.55

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
119	21.06	0.023	0.047	0.48	0.296	0.353	0.838	2.068

Tabulka B.34: Parametry HRV výskok pro subjekt 5

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	105	0.609	0.131	0.077	0.077	175	19.4

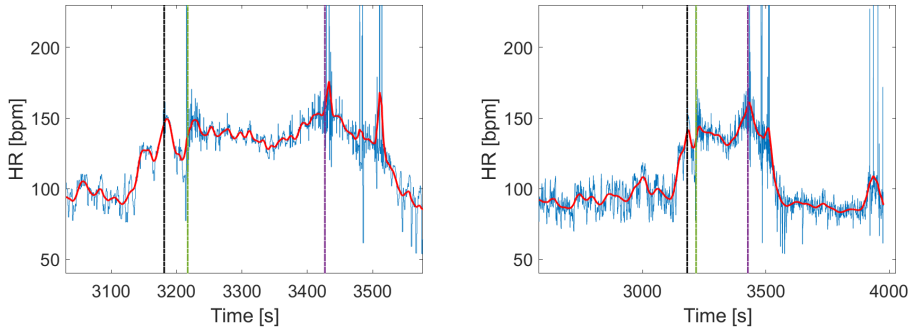
NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
461	51.11	0.054	0.177	0.307	0.46	0.367	1.253	3.798

Tabulka B.35: Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 5

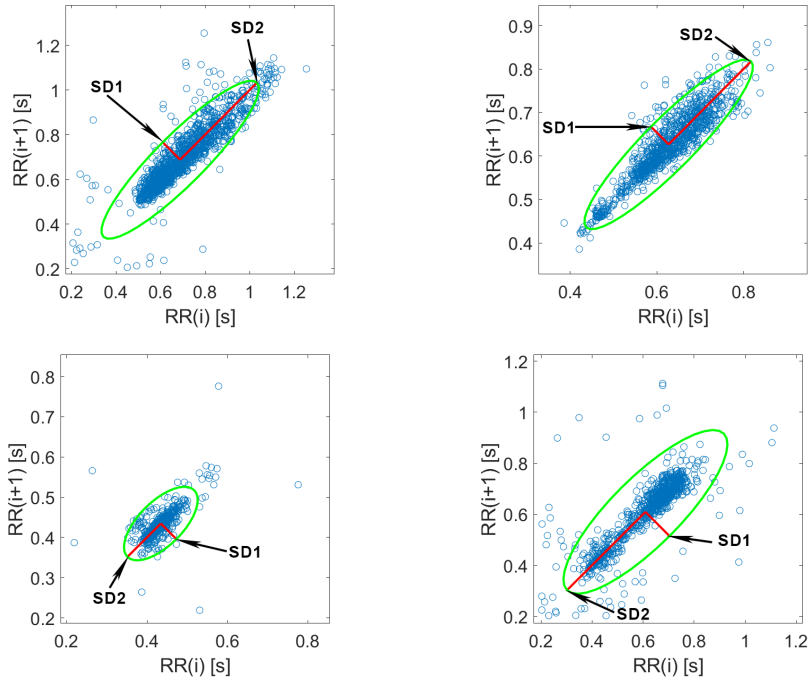
délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	133	0.481	0.123	0.09	0.089	75	24.19

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
159	51.29	0.064	0.162	0.393	0.519	0.522	0.993	3.457

Tabulka B.36: Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 5



Obrázek B.11: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 5 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)



Obrázek B.12: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)

B.5 Subjekt 6

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	64	0.951	0.099	0.051	0.051	169	26.83

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
418	66.35	0.036	0.135	0.267	1.102	0.203	5.434	3.506

Tabulka B.37: Parametry HRV v klidu pro subjekt 6

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	85	0.723	0.096	0.031	0.031	79	9.53

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
370	44.63	0.022	0.134	0.164	1.052	0.121	8.689	3.501

Tabulka B.38: Parametry HRV před výskokem 600s pro subjekt 6

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	95	0.647	0.101	0.025	0.025	16	6.93

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
79	34.2	0.018	0.142	0.125	0.598	0.079	7.611	3.519

Tabulka B.39: Parametry HRV před výskokem 150s pro subjekt 6

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
252	135	0.448	0.029	0.018	0.018	26	4.63

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
93	16.55	0.013	0.039	0.326	0.062	0.041	1.518	2.048

Tabulka B.40: Parametry HRV při výskoku pro subjekt 6

délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
600	86	0.736	0.168	0.034	0.034	103	12.65

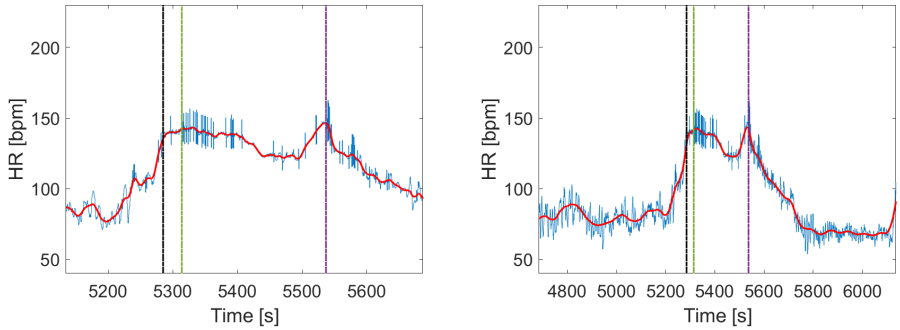
NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
358	43.98	0.024	0.236	0.102	0.225	0.076	2.956	3.499

Tabulka B.41: Parametry HRV po dopadu 600s pro subjekt 6

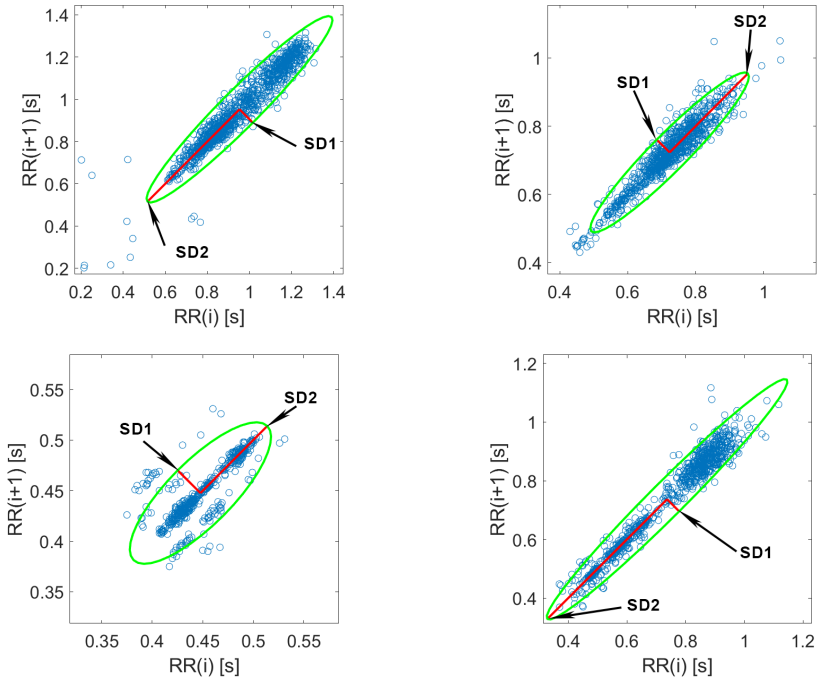
délka signálu [s]	BPM [1/s]	průměr RR [s]	SDNN [s]	SDSD [s]	RMSSD [s]	NN50 [-]	pNN50 [%]
150	114	0.536	0.065	0.025	0.025	24	8.6

NN20 [-]	pNN20 [%]	SD1 [s]	SD2 [s]	SD1/SD2 [-]	LF [ms^2]	HF [ms^2]	LF/HF [-]	TP [ms^2]
68	24.37	0.018	0.09	0.196	0.378	0.07	5.391	3.504

Tabulka B.42: Parametry HRV po dopadu 150s pro subjekt 6



Obrázek B.13: Vizualizace HRV bpm 150 / 600 s pro subjekt 6 (černě - výskok, zeleně - otevření padáku, fialově - dopad, červeně - klouzavý průměr)



Obrázek B.14: Příklad Poincaré grafů (v klidu, před skokem, při skoku a po skoku)