



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**  
Katedra biomedicínské techniky

**Hodnocení kognitivní zátěže v extrémním prostředí**

**Assessment of cognitive load in extreme environment**

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínské inženýrství

Vedoucí práce: Mgr. Ksenia Sedova, Ph.D.

**Bc. Marek Sokol**

---

**Kladno 2023**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sokol** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **483417**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**  
Studijní program: **Biomedicínské inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Hodnocení kognitivní zátěže v extrémním prostředí**

Název diplomové práce anglicky:

**Assessment of cognitive load in extreme environment**

Pokyny pro vypracování:

Vyhodnoťte vliv extrémního prostředí na projevy kognitivní zátěže v biosignálech. Analyzujte data získaná v průběhu simulované vesmírné mise, studující vliv izolace na člověka. Vyhodnoťte vliv úloh navozujících zvýšenou kognitivní zátěž na EKG, dechovou frekvenci a kožní vodivost. Pro analýzu použijte časové, frekvenční a nelineární parametry sledovaných signálů. Srovnajte projevy kognitivní zátěže v prostředí s vysokým a standardním atmosférickým tlakem.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Solhjoo S, Haigney MC, McBee E, van Merrienboer JGG, Schuwirth L, Artino AR Jr, Battista A, Ratcliffe TA, Lee HD, Durning SJ. , Heart Rate and Heart Rate Variability Correlate with Clinical Reasoning Performance and Self-Reported Measures of Cognitive Load, Scientific Reports, ročník 9, číslo 1, 2019, 14668 s., doi: 10.1038/s41598-019-50280-3
- [2] Massaro S, Pecchia L., Heart Rate Variability (HRV) Analysis: A Methodology for Organizational Neuroscience, Organizational Research Methods, ročník 22, číslo 1, 2019, 354-393 s., doi: 10.1177/1094428116681072
- [3] Sun FT., Kuo C., Cheng HT., Buttpitiya S., Collins P., Griss M., Activity-Aware Mental Stress Detection Using Physiological Sensors, Gris, M., Yang, G. (eds) Mobile Computing, Applications, and Services. MobiCASE 2010. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, ročník 76, číslo -, 2012, 211-230 s., [https://doi.org/10.1007/978-3-642-29336-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-29336-8_12)

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

**Mgr. Ksenia Sedova, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Jan Hejda, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2023**

Platnost zadání diplomové práce: **20.09.2024**

doc. Ing. Martin Rožánek, Ph.D.  
vedoucí katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA  
děkan

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Hodnocení kognitivní zátěže v extrémním prostředí“ vypracoval/a samostatně a použil/a k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně dne .....

.....

**Bc. Marek Sokol**

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta biomedicínského inženýrství

© 2023 Bc. Marek Sokol. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě biomedicínského inženýrství. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí a nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení na předchozí straně, je nezbytný souhlas autora.*

## **Odkaz na tuto práci**

Sokol, Marek. *Hodnocení kognitivní zátěže v extrémním prostředí*. Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, 2023. Dostupné z: <https://github.com/sokolmarek/masters-thesis>.

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucí své diplomové práce, Mgr. Ksenii Sedové, Ph.D. za odborné vedení práce, za pomoc, vstřícnost a rady při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. et Ing. Janu Hejdovi, Ph.D. za všestrannou pomoc, množství cenných a inspirativních rad, podnětů a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky. V neposlední řadě děkuji své rodině a všem přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili.

# Abstrakt

## Hodnocení kognitivní zátěže v extrémním prostředí:

Diplomová práce se věnuje hodnocení kognitivní zátěže v extrémních prostředích, což je kritické pro úspěch a bezpečnost jednotlivců a týmů při náročných a důležitých úkonech. Tradiční metody monitorování pomocí dotazníků nebo behaviorální analýzy mohou být v extrémních podmínkách nepraktické až neproveditelné. Z tohoto důvodu stále více roste zájem o využití periferních biosignálů pro hodnocení kognitivní zátěže v reálném čase. Práce konkrétně zkoumá vliv extrémního prostředí v podobě vesmírné analogové mise na projevy kognitivní zátěže v elektrické srdeční, respirační a elektrodermální aktivitě. Pro účely hodnocení kognitivní zátěže je představen nový multimodální způsob založený na tvorbě fyziologických příznaků ve formě vícerozměrných časoprostorových kauzálních vzorů, které umožňují unikátní kódování specifického kognitivního stavu. Kapsulární neuronová síť je navržena pro synergické sjednocení vytvořených fyziologických příznaků využitím autoenkodérové komprese do jednotného latentního prostoru k zachycení časoprostorových kauzálních relací. Navržené řešení je otestováno na populárních veřejně dostupných benchmarkovacích datasetech včetně dat z analogové vesmírné mise.

## Klíčová slova

kognitivní zátěž, fyziologický signál, elektrokardiogram, dechová aktivita, elektrodermální aktivita, strojové učení, neuronové sítě, vesmír, analogové mise

# **Abstract**

## **Assessment of cognitive load in extreme environment:**

The thesis focuses on the assessment of cognitive load in extreme environments, which is critical for the success and safety of individuals and teams performing demanding and essential tasks. Traditional monitoring methods using questionnaires or behavioral analysis may be impractical or even impossible in extreme conditions. For this reason, there is a growing interest in using peripheral biosignals for real-time cognitive load assessment. Specifically, the thesis examines the impact of extreme environments, such as an analog space mission, on the manifestations of cognitive load in electrical cardiac, respiratory, and electrodermal activity. To assess the cognitive load, a new multimodal approach is introduced based on the creation of physiological features in the form of multivariate spatiotemporal causal patterns, allowing for a unique encoding of specific cognitive states. A capsular neural network is designed for synergic uniform integration of the physiological features to capture spatiotemporal causal relations by exploiting autoencoder compression capability. The proposed solution is tested on popular publicly available benchmark datasets, including data from an analog space mission.

## **Key words**

cognitive load, physiological signal, electrocardiogram, respiratory activity, electrodermal activity, machine learning, neural networks, space, analog missions

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk	10
<b>1 Úvod</b>	<b>14</b>
<b>2 Přehled současného stavu</b>	<b>16</b>
2.1 Extrémní prostředí . . . . .	16
2.1.1 Vesmírné explorace . . . . .	17
2.1.2 Analogové mise . . . . .	18
2.1.3 Faktory prostředí ovlivňující CNS . . . . .	20
2.2 Kognitivní neurovědy . . . . .	22
2.2.1 Terminologie . . . . .	22
2.2.2 Kognitivní zátěž . . . . .	23
2.2.3 Fyziologické projevy . . . . .	23
2.2.4 Detekce a hodnocení kognitivní zátěže . . . . .	25
2.3 Neuroviscerální integrace . . . . .	26
2.3.1 Kognitivní regulace . . . . .	29
2.4 Variabilita srdeční frekvence . . . . .	30
2.4.1 Trendy v analýze HRV . . . . .	31
2.4.2 Struktura HRV indexů . . . . .	31
2.5 Periferní biosignály . . . . .	33
2.5.1 Měření biosignálů . . . . .	34
2.5.2 Postupy zpracování biosignálů . . . . .	38
2.6 Strojové učení . . . . .	40
2.6.1 Typy systémů strojového učení . . . . .	40
2.6.2 Trénování a testování modelů . . . . .	41
2.6.3 Optimalizace hyperparametrů . . . . .	43
2.6.4 Kombinování modelů . . . . .	44
2.6.5 Hodnocení modelů . . . . .	44
2.6.6 Umělé neuronové sítě . . . . .	44
<b>3 Cíle práce</b>	<b>49</b>
<b>4 Metody</b>	<b>50</b>
4.1 Mise DIANA . . . . .	50
4.1.1 Projekt Hydronaut . . . . .	50
4.1.2 Výběr posádky . . . . .	50
4.1.3 Posádka pro misi DIANA . . . . .	51
4.1.4 Popis lokality a podmínky prostředí . . . . .	51



4.1.5	Hlubinná laboratoř H03 DeepLab . . . . .	52
4.1.6	Infrastruktura mise . . . . .	53
4.1.7	Neuropsychofyziologická baterie . . . . .	54
4.1.8	Monitorování a měření posádky . . . . .	55
4.1.9	Studie . . . . .	57
4.2	Použité datasety . . . . .	57
4.2.1	WESAD . . . . .	57
4.2.2	CLAS . . . . .	58
4.2.3	Data z vesmírné analogové mise DIANA . . . . .	59
4.3	Zpracování biosignálů . . . . .	59
4.3.1	Zpracování elektrické srdeční aktivity . . . . .	59
4.3.2	Zpracování respirační aktivity . . . . .	61
4.3.3	Zpracování elektrodermální aktivity . . . . .	61
4.4	Zpracování a analýza dat z mise DIANA . . . . .	62
4.4.1	Zpracování exportovaných segmentů biosignálů . . . . .	63
4.4.2	Čistění dat . . . . .	63
4.4.3	Sledované veličiny . . . . .	63
4.4.4	Analýza dat mise . . . . .	64
4.4.5	Statistické modelování . . . . .	65
4.5	Explorační analýza a předzpracování datasetů . . . . .	65
4.5.1	Předzpracování datasetů . . . . .	65
4.5.2	Explorace dat . . . . .	66
4.5.3	Augmentace dat využitím SMOTE-Tomek . . . . .	68
4.6	Hodnocení kognitivní zátěže využitím vícerozměrných časoprostorových kauzálních vzorů . . . . .	69
4.6.1	Formulace problému . . . . .	69
4.6.2	Tvorba kauzálních vícerozměrných matic . . . . .	69
4.6.3	Konstrukce časoprostorových polí . . . . .	71
4.6.4	Kapsulární neuronová síť . . . . .	73
4.6.5	Self-attention směřování . . . . .	75
4.6.6	Marginální ztrátová funkce . . . . .	75
4.6.7	Trénování a evaluace modelů . . . . .	75
4.7	Statistické metody . . . . .	76
4.7.1	Lineární smíšené modely . . . . .	76
4.7.2	Grangerova kauzalita . . . . .	76
4.7.3	Lasso regrese . . . . .	77
4.7.4	Teorie kopulí . . . . .	78
4.7.5	Metriky hodnocení v strojovém učení . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Výsledky</b>	<b>81</b>
5.1	Srovnání QRS detektorů . . . . .	81

5.2	Analýza dat z mise DIANA . . . . .	82
5.2.1	Sledované veličiny během NPF stimulace . . . . .	84
5.2.2	Statistické modelování . . . . .	87
5.3	Modely pro hodnocení kognitivní zátěže . . . . .	89
5.3.1	Hodnocení přesnosti modelů pro WESAD . . . . .	90
5.3.2	Hodnocení přesnosti modelů pro CLAS . . . . .	91
5.3.3	Hodnocení přesnosti modelů pro sjednocená data . . . . .	92
5.3.4	Srovnání na úrovni použitých modalit . . . . .	93
5.3.5	Srovnání se současným stavem . . . . .	93
5.3.6	Testování na datech z mise DIANA . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Diskuse</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>103</b>
7.1	Budoucí práce . . . . .	103
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>105</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Informovaný souhlas</b>	<b>128</b>
<b>B</b>	<b>Matice záměn</b>	<b>130</b>
<b>C</b>	<b>Obsah přiloženého ZIP souboru</b>	<b>131</b>

# Seznam symbolů a zkratek

## Seznam symbolů

---

Symbol	Význam
$\beta_0$	Intercept
$\hat{\beta}_i$	Vektor odhadů koeficientů
$\beta_i$	Vektor koeficientů
$\mathcal{C}$	Prostor všech možných tříd
$c$	Počet snímaných signálů
$E$	Množina hran
$\epsilon$	Člen reziduální chyby
$\mathcal{F}$	Multidimenzionální množina segmentovaných fyziologických signálů
$F$	Vícerozměrná distribuční funkce
$\hat{F}_i$	Empirické marginální rozdělení
$G$	Orientovaný graf
$\gamma$	Rychlost učení
$p_{\mathcal{N}}$	Gaussova funkce
$\mathcal{H}$	Prostor hypotéz
$h$	Mapovací funkce
$H$	Výška
$\mathcal{L}$	Ztrátová funkce
$L$	Maximální časové zpoždění
$\lambda$	Hyperparametr
$\nabla \mathcal{L}$	Gradient ztrátové funkce
$\mu$	Střední hodnota
$N$	Konstantní faktor pro regulaci rozpětí polárního souřadného systému
$\mathcal{P}$	Neznámé rozdělení
$\Phi$	Kumulativní distribuční funkce Gaussova rozdělení
$\Phi^{-1}$	Inverzní kumulativní distribuční funkce Gaussova rozdělení
$\phi_i$	Úhlová složka
$\mathbb{R}^d$	$d$ -rozměrný příznakový prostor
$r_i$	Radiální složka
$\sigma^2$	Rozptyl
$u$	Náhodný efekt
$V$	Množina vrcholů
$W$	Šířka

---

## Seznam zkratek

---

Zkratka	Význam
AIC	Akaikeho informační kritérium (Akaike information criterion)
ANN	Umělé neuronové sítě (Artificial neural networks)
ANS	Autonomní nervová soustava (Autonomic nervous system)
AUC	Plocha pod křivkou (Area under the curve)
AURL	Podmořská Výzkumná Laboratoř (Aquarius Undersea Research Laboratory)
AV	Atrioventrikulární uzel
CAN	Centrální autonomní síť (Central autonomic network)
CDF	Kumulativní distribuční funkce (Cumulative distribution function)
CeA	Centrální jádro amygdaly (Nucleus amygdalae centralis)
CL	Kognitivní zátěž (Cognitive load)
CLT	Teorie kognitivní zátěže (Cognitive load theory)
CNS	Centrální nervová soustava
CP	Capula Granger
CSA	Kanadská kosmická agentura (Canadian Space Agency)
CV	Křížová validace (Cross-validation)
CVLM	Kaudální ventrolaterální medulární jádro (Caudal ventrolateral medullary)
dACC	Dorzální anteriorní cingulární kůra (Dorsal anterior cingulate cortex)
DBSCAN	Hustotní prostorové shlukování aplikací s šumem (Density-based spatial clustering of applications with noise)
DT	Rozhodovací stromy (Decision trees)
DVN	Dorzální vagové motorické jádro (Nucleus dorsalis nervi vagi)
EDA	Elektrodermální aktivita
EDR	Respirace odvozená z EKG (ECG-Derived Respiration)
EEG	Elektroencefalografie
EFA	Faktorová analýza (Exploratory factor analysis)
EFPA	Evropská federace psychologických asociací
EKG	Elektrokardiografie
ESA	Evropská kosmická agentura (European Space Agency)
EVA	Extravehikulární aktivita
FBMI	Fakulta biomedicínského inženýrství
FF UPOL	Filozofická fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

---

Zkratka	Význam
FIU	Mezinárodní Univerzita na Floridě (Florida International University)
fMRI	Funkční magnetická rezonance
FPR	Falešně pozitivní míra (False positive rate)
GADF	Gramian angular difference fields
GAF	Gramian angular fields
GC	Grangerova kauzalita (Granger causality)
GD	Gradientní sestup (Gradient descent)
HDBR	Head-down bed rest
HR	Srdeční rytmus (Heart rate)
HRV	Variabilita srdeční frekvence (Heart rate variability)
ICE	Izolované, stísněné a extrémní prostředí (Isolated, confined and extreme environment)
IML	Visceromotorická jádra v segmentech C7–L2 (Nucleus intermediolateralis)
LDA	Gradientní sestup (Linear discriminant analysis )
LEO	Nízká oběžná dráha (Low-earth orbit)
LMM	Lineární smíšené modely (Linear mixed models)
LR	Rychlost učení (Learning rate)
ML	Strojové učení (Machine learning)
mPFC	Mediální prefrontální kůra (Medial prefrontal cortex)
MRI	Magnetická rezonance
NA	Somatomotorické jádro pro n. IX a X. (Nucleus ambiguus)
NASA	Americký Národní úřad pro letectví a vesmír (National Aeronautics and Space Administration)
NEEMO	Operace NASA v extrémním prostředí (NASA Extreme Environment Mission Operations)
NN50	Počet párů sousedních N–N intervalů, které se od sebe liší o více než 50ms (Number of times successive heartbeat intervals exceed 50ms)
NPF	Neuropsychofyziologie
NTS	Jádro solitárního traktu (Nucleus tractus solitarius)
NVI	Neuroviscerální integrace (Neurovisceral integration)

Zkratka	Význam
pACC	Pregenuální přední cingulární kůra (Pregenua anterior cingulate cortex)
PCA	Analýza hlavních komponent (Principal component analysis)
pCC	Posteriovní cingulární kůra (Posterior cingulate cortex)
pNN50	Poměr NN50 k počtu všech N–N intervalů (Proportion of NN50 divided by the total number of N–N)
PNS	Parasympatický nervový systém
PPG	Fotoplethysmografie (Photoplethysmography)
RMSSD	Odmocnina průměru umocněných rozdílů po sobě jdoucích N–N intervalů (Root mean square of the successive differences)
ROC	Receiver operating characteristic curve
RSP	Respirační aktivita
RVLM	Rostrální ventrolaterální medulární jádro (Rostral ventrolateral medullary)
SA	Sinoatriální uzel
SCL	Úroveň kožní vodivosti (Skin conductance level)
SCR	Odezva kožní vodivosti (Skin conductance response)
SMOTE	Synthetic Minority Oversampling Technique
SNS	Sympatický nervový systém
SOM	Samoorganizující mapy (Self organizing maps)
SVM	Gradientní sestup (Support vector machines)
SWT	Stacionární vlnková transformace (Stationary wavelet transform)
TNR	Pravdivě negativní míra (True negative rate)
TPJ	Temporoparietální spojení
TPR	Pravdivě pozitivní míra (True positive rate)
UMAP	Uniform Manifold Approximation and Projection
VAR	Model vektorové autoregrese (Vector autoregressive model)
ZC	Průchod nuly (Zero crossing)

## Úvod

Sledování a hodnocení kognitivní zátěže v extrémním prostředí je kritické pro zajištění bezpečnosti a úspěchu jednotlivců a týmů působících v takovém prostředí během náročných a důležitých úkonů. Monitorování kognitivních funkcí pomocí tradičních dotazníkových metod nebo behaviorální analýzy může být v izolovaném, uzavřeném a extrémním prostředí nepraktické až neproveditelné zejména kvůli komunikačním a časovým omezením. Proto čím dál více vzrůstá zájem o využití periferních biosignálů, mezi které patří elektrická srdeční nebo elektrodermální aktivita, k hodnocení kognitivní zátěže v reálném čase.

Paradigma většiny dosavadních přístupů detekce těží primárně z extrahovaných příznaků v podobě statistických ukazatelů nebo často například parametrů vypočtených z variability srdeční frekvence. Interpretace těchto parametrů v souvislosti s kognitivní zátěží je však nejasná a náročná vzhledem k tomu, že se do periferních biosignálů promítají veškeré kognitivní funkce. Velké množství těchto parametrů také vyžaduje poměrně dlouhé časové úseky pro svůj výpočet a jsou velmi citlivé na různorodé typy artefaktů.

Jako klíčem k interpretaci těchto vztahů se jeví inkorporace komplexního modelu neuroviscerální integrace, který vychází ze skutečnosti, že autonomní nervový systém hraje klíčovou roli v regulaci periferní fyziologie a poskytuje teoretický rámec pro pochopení vztahů mezi periferními biosignály s kognitivními funkcemi. Obecně tento model předpokládá, že kognitivní zátěž několikaúrovňově moduluje aktivitu autonomního nervového systému, což vede právě ke změnám periferní fyziologie. Rozklíčování interpretace takovým způsobem by ale vyžadovalo velké množství patřičně popsanych dat, bylo velmi časově náročné a pravděpodobně by trpělo nedostatečnou generalizací.

Nedostatky předešlého přístupu překonávají metody hlubokého učení, jejichž vstup tvoří samotné biosignály, ze kterých jsou potřebné příznaky pro účely detekce kognitivní zátěže extrahovány automaticky. Detektory tohoto typu bývají obvykle

---

robustní a schopné v datech nalézt nespočetné množství relací. V důsledku toho je pro účely rozpoznání kognitivní zátěže extrahováno a použito ohromné množství parametrů. Objevuje se tak často nevýhoda v podobě vysoké výpočetní náročnosti. Zároveň prisma tohoto přístupu nijak nezohledňuje kauzalitu v rámci použitých příznaků a naopak vychází z předpokladu jejich nezávislosti. Tato skutečnost opět činí interpretaci výsledků včetně určení klíčových faktorů pro hodnocení kognitivní zátěže obtížné a nejasné. Obecně se mezi další problémy také řadí například individuální rozdíly v charakteru biosignálů, vliv faktorů prostředí nebo nedostatečná standardizace sběru a analýzy dat. Řešení těchto problémů je také zásadní pro vývoj spolehlivých a platných metod pro hodnocení kognitivní zátěže.

Tato práce zkoumá vliv extrémního prostředí na projevy kognitivní zátěže v periferních biosignálech. Pro tyto účely diplomová práce představuje nový způsob hodnocení kognitivní zátěže pomocí takzvaných vícerozměrných časoprostorových kauzálních vzorů společně s využitím kapsulární neuronové sítě. Tyto vzory zachycují temporální příčinné relace a umožňují unikátní kódování specifického kognitivního stavu v podobě charakteristické konfigurace v prostorové doméně.



---

## Přehled současného stavu

Přehled současného stavu je nejprve věnován popisu extrémního prostředí a jeho vlivu na neuropsychofyziologii (dále jen „NPF“) člověka. Dále je na tuto oblast navázáno popisem kognitivní zátěže (CL) v dílčí kapitole kognitivních neurověd, která společně s navazujícími kapitolami o neuroviscerální integraci a variabilitě srdečního rytmu tvoří důležitou část problematiky ročníkového projektu a diplomové práce. Následně jsou blíže rozebrány periferní biosignály využité v rámci této práce, způsoby jejich měření a zpracování. Jejich znalost a informační obsah jsou nezbytnými kritérii pro hodnocení kognitivní zátěže. Závěr kapitoly tvoří náhled do vybraných teoretických základů strojového učení.

### 2.1 Extrémní prostředí

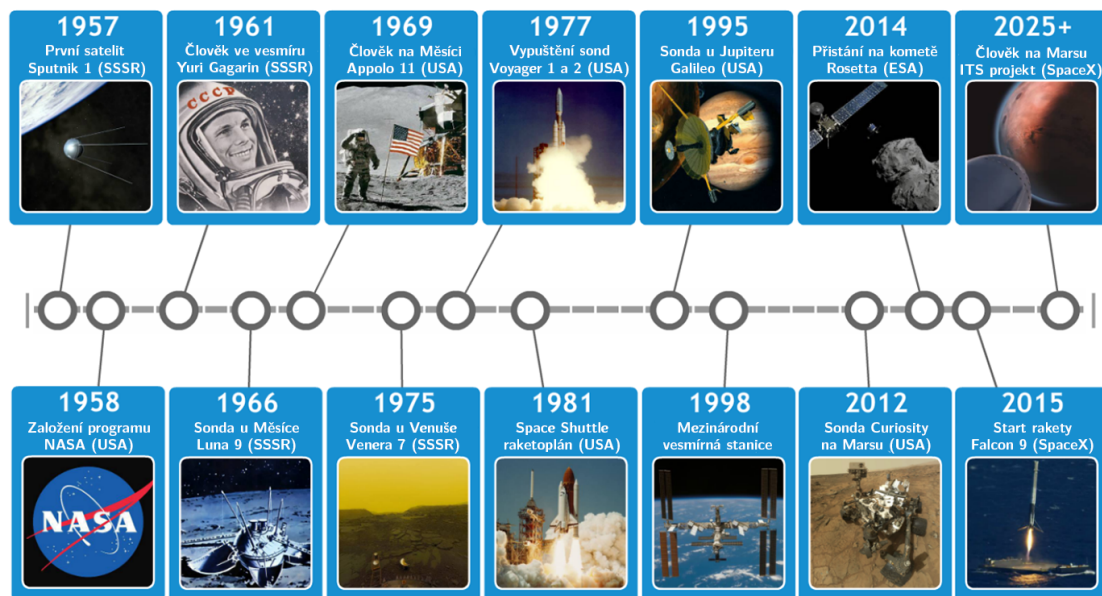
Vzhledem k nejednoznačné definici pojmu „*extrémní prostředí*“ je potřeba stanovit vhodnou interpretaci v souvislosti s problematikou této práce. Mezi rané definice přispěli Harrison a Connors [1], kteří publikovali, že extrémní prostředí se vyznačuje nebezpečnými a nepřívětivými klimatickými, životními nebo pracovními podmínkami a možnou sociální izolací. Bell et al. [2] definovali extrémní situace jako okolnosti, za kterých má nedostatečný výkon, ať už mentální nebo fyzický, vážné následky (např. časová tíseň, nebo nebezpečí). Všechny tyto koncepty se týkají náročných fyzických nebo mentálních výkonnostních situací, na které se pojí další již formulované pojmy jako mimořádné situace [3, 4], psychický a fyzický nátlak [5] nebo stres [6]. Další formulace byly již uvedeny v [7–9]. V této práci je na definici extrémního prostředí nahlíženo jako na izolované atypické prostředí, v němž jsou kladeny značné nároky na plnění úkolů, které s sebou nesou vysokou míru rizika a katastrofické důsledky při chybném či nedostatečném výkonu.

Současné studie se v rámci tematiky extrémního prostředí často zabývají vlivem izolovaného a stísněného prostředí (ICE, isolated, confined, and extreme) na člověka [9, 10] nebo vlivem různorodých enviromentálních podmínek [11–13]. Do výzkumu

v této oblasti se začalo aktivně přispívat kolem první poloviny 20. století, což bylo podmíněno vědecko-technologickým pokrokem. Mezi hlavní iniciační milníky patřil vojenský zájem o dlouhodobé ponory jaderných ponorek, na který navázal podvodní výzkum [14, 15], vznik vesmírných programů (vesmírný závod) a polární výzkum [16, 17]. Pro potřeby této práce je dále detailněji rozebíráno extrémní prostředí z hlediska vesmírné explorace, konkrétně dlouhodobých vesmírných letů a analogových vesmírných misí.

### 2.1.1 Vesmírné explorace

Za hlavní hnací historický faktor, který posouval vědecko-technickou sféru v rámci výzkumu vesmíru rychle kupředu lze považovat tzv. vesmírný závod, jenž začal vypuštěním družice Sputnik 1 Sovětským svazem v roce 1957. Rok poté byl založen Americký Národní úřad pro letectví a vesmír (NASA), což vedlo k prvním vesmírným misím, kterých se později účastnily i posádky. Byl tak vytvořen nový prostor a vzbuzen výzkumný zájem v oblasti analogových vesmírných misí, jelikož otázky ohledně průzkumu vesmíru odhalily spoustu vědomostních nedostatků potřebných pro úspěšný pobyt v kosmu [15]. Nejedná se však ani tolik o technické překážky, ale o nedostatky znalostí zejména v oboru neurověd a experimentálního nastavení.



**Obrázek 2.1:** Časová osa výzkumu vesmíru od Sputniku po Mars (Přeloženo a převzato z [18])

Vzhledem k tomu, že budoucnost výzkumu vesmírné explorace sahá za hranice oběžné dráhy Země [19, 20], je třeba brát v úvahu obtíže budoucích misí, které se budou primárně týkat člověka. Dlouhodobé kosmické lety a mise jsou předmětem mnoha zásadních okolností, jež kladou vysoký a rizikový neuropsychofyziologický nátlak [21]. Extrémní prostředí, komunikační latence a problémy (např. dlouhodobý

výpadek komunikace) nebo fyziologické změny vlivem vesmírných aspektů [22–24] mohou během dlouhodobých misí překračovat lidské psychické i fyzické hranice a vést ke katastrofickým následkům [21, 25]. Toto riziko se uplatňuje i přestože se v těchto případech skládají posádky z vybraných trénovaných jedinců (astronautů). Stresory, vnitřní nebo vnější stimuly vznikající při vystavení lidského organismu mimořádným podmínkám (extrémnímu prostředí) při dlouhodobých vesmírných letech, již popsal Morpew [26]. Zdravotní a výkonnostní rizika lze řešit právě výběrem a výcvikem posádky nebo například návrhem mise a vybavení. Naskytuje se ale také možnost tato rizika predikovat s využitím diagnostických neinvazivních metod, mezi které patří funkční magnetická rezonance (fMRI) nebo elektrokardiografie (EKG), spolu s širokými znalostmi lidského nervového systému. Je tedy třeba realizovat experimenty, které pomohou lépe chápat, ne-li přímo definovat NPF vztahy při vlivu extrémního prostředí. Takové experimenty však nemohou probíhat za normálních laboratorních podmínek, jelikož se nejedná o prostředí, které by odrazilo skutečné provozní podmínky a účinně napodobilo kosmickou misi [10, 21].

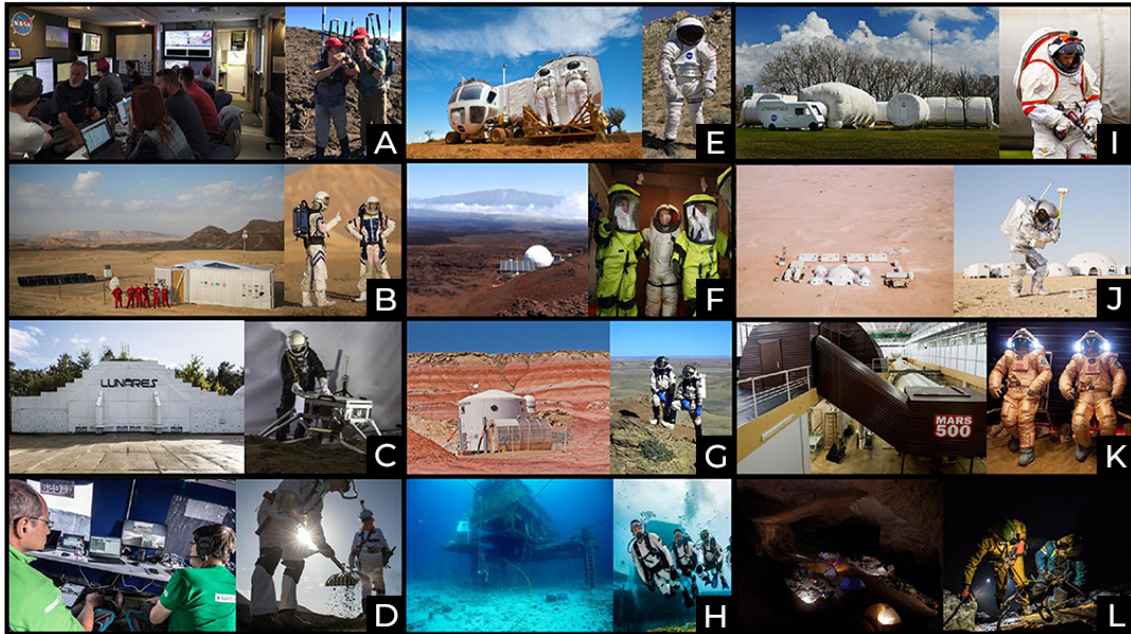
Ke studiu neuropsychofyziologických adaptací člověka vystavenému mikrogravitaci se využívají data zaznamenaná před a po vesmírném letu, kde se také sledují změny jako distribuce tělesných tekutin, hustota kostí nebo úbytek svalové hmoty [27]. Kromě mikrogravitace lze mnoho vědeckých otázek týkajících se kognitivních neurověd zodpovědět i na Zemi díky vesmírným analogovým misím, které simulují komplexní interakce vznikající během vesmírných misí [10, 21].

### 2.1.2 Analogové mise

Jak již bylo zmíněno, laboratorní experimenty plně nereprezentují reálné podmínky dlouhodobých kosmických misí, avšak různá analogová prostředí (analogové mise) přinášejí právě tu možnost sledovat a zkoumat NPF člověka v jedinečných situacích [21]. Situace, které napodobují reálné okolnosti budoucích vesmírných misí – přistání kosmické lodi, extravehikulární aktivity (EVA), lékařské zákroky aj. – vystavují jedince pozorovatelným změnám například v cirkadiánním<sup>1</sup> rytmu, hladinách stresových hormonů, imunitních funkcích nebo neurokognitivním změnám [10, 11]. Faktory prostředí a jejich vliv na NPF jsou detailněji popsány v následující kapitole.

Přehled několika analogových misí, na jejichž vzniku a vývoji se převážně podílejí: Evropská kosmická agentura (ESA), Státní korporace pro kosmické aktivity (ROSCOMOS), Kanadská kosmická agentura (CSA) a NASA, lze vidět na obrázku 2.2. Každá analogová mise vznikla primárně pro simulaci a studium určitých vlivů vesmírných podmínek nebo k testování specifického vybavení. Antarktické mise slouží k testování astrobiologických hypotéz [21] a studiu dopadů izolace na člověka

<sup>1</sup>Cirkadiánní rytmus je biologický rytmus s cyklem trvajícím přibližně jeden den.

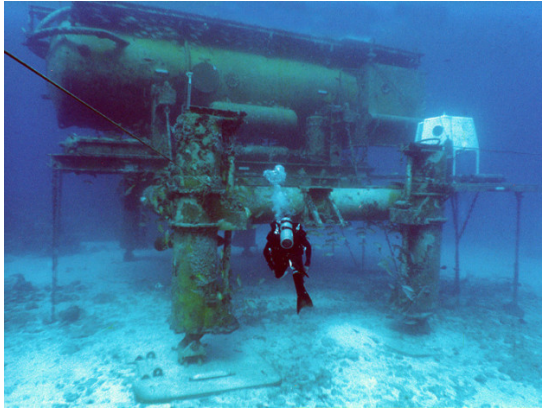


**Obrázek 2.2:** Příklady analogových misí. **(A)** NASA BASALT (USA), **(B)** D-MARS (Izrael), **(C)** LUNARES (Polsko), **(D)** ESA/PANGEA (Španělsko), **(E)** NASA/D-RATS (USA), **(F)** HI-SEAS (USA), **(G)** Mars Desert Research Station (USA), **(H)** NASA/NEEMO (USA), **(I)** NDU Habitat (USA), **(J)** OeWF/AMADEE-program (Rakousko, Omán), **(K)** Mars-500 (Rusko), **(L)** ESA/CAVES (Španělsko/Itálie). (Upraveno a převzato z [28])

během extrémních podmínek, které jsou dané drsným polárním podnebím a rozsáhlou tundrou [29, 30]. Významnou misí je projekt Mars-500, kde byla šestičlenná posádka uzavřena 520 dní v napodobeně kosmické lodi pro účely simulace vesmírného letu na Mars. Během této mise došlo k řadě experimentů, které se například zabývaly vlivem fyzického cvičení na aktivitu prefrontální kortexu a kognitivní výkonnost [31] nebo změnami nálady a plazmatických hladin hormonů [32]. Na základě problematiky této práce jsou nadále popsány vybrané podvodní analogové mise.

### Projekt NEEMO

Operace NASA v extrémním prostředí neboli NEEMO (NASA Extreme Environment Mission Operations) jsou analogové vesmírné mise, které probíhají v Mezinárodní Univerzitní Podmořské Výzkumné Laboratoři na Floridě (Florida International University's Aquarius Undersea Research Laboratory, FIU AURL). Podvodní laboratoř s rozlohou zhruba 43 m<sup>2</sup>, umístěná 19 m pod mořskou hladinou přesně nenapodobuje vesmírné podmínky, ale primárně stresové faktory spojené s bezpečností, komunikací a technologickou logistikou při dlouhodobých kosmických letech a průzkumu. Zároveň zde probíhají testy vybavení a trénování výstupu do vesmíru mimo kosmickou loď [33, 34]. Poslední mise v podvodní laboratoři, NEEMO 23, proběhla v červnu 2019 a byla primárně zaměřena na průzkumné výstupy do vesmíru.



**Obrázek 2.3:** Podvodní habitat AURL [35]



**Obrázek 2.4:** Hydronaut H03 DeepLab [36]

### Projekt Hydronaut

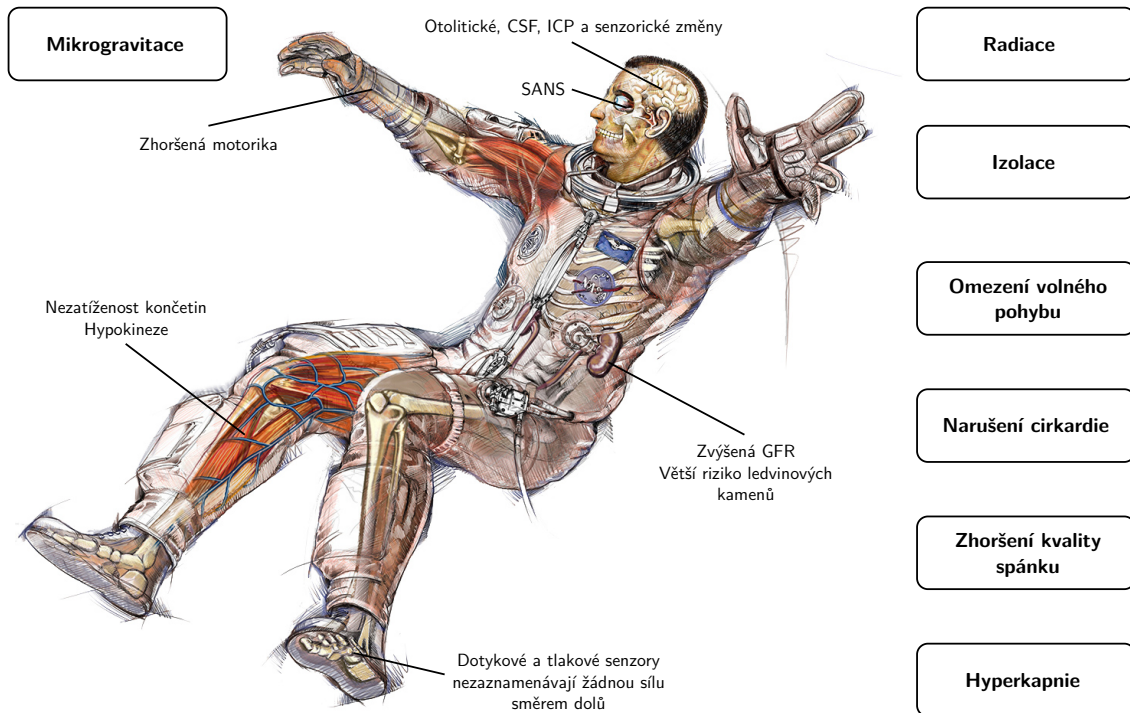
Skromnější verze mobilního podvodního habitatu vznikla i v České republice za účelem výcviku astronautů Evropské kosmické agentury. Projekt byl představen roku 2010 a jeho primárním cílem bylo umožnit menším posádkám dlouhodobý pobyt v hyperbarickém ICE prostředí a simulaci vesmírných scénářů pro potřeby výzkumu a vývoje. Podvodní stanice Hydronaut je plně mobilní a lze měnit její umístění a hloubku zanoření. Současná stanice (H03 DeepLab) je vybavena několika systémy pro sledování stavu habitatu a posádky. Jedním ze systémů je platforma Common Tongue, který umožňuje nejen komunikaci s posádkou ale také sledování fyziologických funkcí. V roce 2020 proběhla desetidenní mise (Mission One), která včetně účelů kosmického ICE výzkumu sloužila jako zátěžový test habitatu [37].

### 2.1.3 Faktory prostředí ovlivňující CNS

Vzhledem k tomu, že vesmír je jedinečné prostředí, je studium změn neurofyzilogického stavu člověka souvisejících s kosmickými misemi obtížné. Předchozí studie ukázaly, že po letu do vesmíru dochází ke změnám ve vnímání, pohybu, koordinaci a kognici [38]. Mikrogravitace je jedním z hlavních faktorů, které ovlivňují mozek včetně kosmického záření (radiace), izolace nebo hyperkapnie [24]. Důsledky působení mikrogravitace na mozek popsal Torre v [39]. Souhrn faktorů lze vidět na Obrázku 2.5 a jejich počet nasvědčuje, že pozorované NPF změny u astronautů mohou být důsledkem kombinace více stresorů na jednotlivé oblasti mozku [24].

Nedávné MRI studie poukázaly na změny polohy mozku, objemu tkáně, objemu mozkových komor, distribuce a dynamiky mozkomíšního moku, mikrostruktury tkáně a funkční konektivity po letu do vesmíru [40–44]. Přehled MRI studií provedených na amerických astronautech a ruských kosmonautech před a po kosmickém letu se zjištěnými poznatky byl vypracován v [24]. Mezi tyto studie jako jeden z prvních

přispěli Demertzi et al. [43] s objevem snížené konektivity v pravé insule<sup>2</sup>, který se podílí na vestibulárním zpracování a kognitivní kontrole.



**Obrázek 2.5:** Souhrn stresových faktorů vesmírného ICE prostředí, které mohou ovlivnit mozek během kosmického letu. Radiace v tomto případě odkazuje na radiaci v otevřeném kosmickém prostoru, nikoli na nízké oběžné dráze (LEO). (Upraveno a převzato z [24, 45] se souhlasem Beua Danielse)

Neurozobrazovací studie na zvířecích modelech a lidech vystavených analogovým vesmírným letům prokázaly změny mozku související s reálným kosmickým letem [44, 46]. Analogové vesmírné mise nacházejí tedy uplatnění při zkoumání vlivů stresorů spojených s vesmírným prostředím na centrální nervovou soustavu (CNS). Při srovnání změn CNS souvisejících s kosmickou misí se změnami pozorovanými u pozemských analogů se naskytuje příležitost do budoucna navrhnout strategie a opatření, které by předcházely nežádaným NPF účinkům. Během analogových misí se podařilo reprodukovat například zjištění spojené se změnami mozkové konektivity, objemu šedé hmoty, dynamiky mozkomíšního moku a objemu mozkových komor [24]. Metoda, která věrně napodobuje podmínky kosmických letů vystavováním subjektů posunu tělních tekutin, odlehčení axiálního tlaku nebo hypokinezi, se nazývá Head-Down Bed Rest (HDBR). Subjekt je během metody na lůžku hlavou dolů, pod určitým náklonem. HDBR zároveň vyvolává podobné změny v mozkové konektivitě, včetně změny konektivity motorických, somatosenzorických a vestibulárních oblastí mozku jako při vesmírných letech [47, 48].

<sup>2</sup>Insula neboli insulární kortex je složitá struktura s rozsáhlou sítí korových a podkorových oblastí mozku, které slouží smyslovým, emočním a kognitivním funkcím.

Mozek je kromě fyziologických stresorů ovlivněn také dlouhodobým pobytem v ICE prostředí. Po 520denní misi Mars-500 ukázaly snímky participantů pozměněnou mikrostrukturu šedé hmoty v pravém temporoparietálním spojení<sup>3</sup> (TPJ), což je přisuzováno vlivu izolovaného prostředí [49]. Během dlouhodobých vesmírných misí mohou mít změny TPJ za následek zhoršení neuropsychofyziologické adaptace člověka na nové ICE prostředí. Další nežádoucí změny byly prokázány v rámci studií antarktických expedic, které demonstrovaly snížení objemu šedé hmoty v orbitofrontální kůře, prefrontální kůře a hipokampu. Vzhledem k povaze antarktického prostředí a expedic lze usuzovat, že jsou tyto změny podmíněné také vlivem ICE [50]. Možné snížení neurogeneze hipokampu vlivem extrémního prostředí může mít vliv na paměť a sociální interakci členů posádky [24]. Délka kosmické mise či letu také hraje rozdíl, jelikož větší míra změn struktury mozku byla pozorována u dlouhodobých vesmírných misí [42].

## 2.2 Kognitivní neurovědy

Lidský mozek je schopen se neustále přizpůsobovat měnícím se okolnostem a požadavkům prostředí. Astronauti se musí aklimatizovat na zcela nové prostředí podobně jako malé děti procházejí svými vývojovými fázemi. V podmínkách stavu beztlíže nebo mikrogravitace dochází mimo jiné k ovlivnění mozkových procesů. Cílem kognitivních neurověd ve vesmíru je pochopit, jak mozek a mysl reagují na tyto jedinečné okolní podmínky. První výzkumy v oblasti neurověd ve vesmíru byly provedeny v roce 1962 během ruské mise Vostok-3. Na Zemi je oproti vesmíru možné díky neurozobrazovacím technikám snadno studovat mozkovou aktivitu a kognitivní funkce. Pro neurovědce i psychology je velmi důležité pochopit základní neurokognitivní a neuropsychologické aspekty kosmického letu. Neefektivní mentální výkon jedince či posádky je známou hrozbou pro vesmírné mise. Pozemský výzkum zdůrazňuje nutnost porozumět kognitivním procesům, jelikož CL zhoršuje kognitivní a percepční motorické schopnosti. Srovnatelné dopady lze předpokládat i při vesmírných misích v náročných ICE podmínkách a simulacích (analogové mise) [39]. Pro potřeby diplomové práce je rozsáhlá kapitola kognitivních neurověd vymezena popisem kognitivní zátěže.

### 2.2.1 Terminologie

Obor kognitivních neurověd se nachází na pomezí psychologie a neurověd, ale překrývá se s dalšími obory jako kognitivní a biologická psychologie, fyziologie nebo neuropsychologie. Tyto obory často studují podobné procesy ale z jiného pohledu a pomocí jiné metodiky. Synonymem oblasti kognitivních neurověd byl v této

<sup>3</sup>Temporoparietální spojení je část mozku, kde se setkávají spánkový a temenní lalok.

práci zvolen termín neuropsychofyziologie pro usnadnění popisu fyziologických změn v důsledku kognitivních procesů. Cílem této práce není rozlišovat mezi jednotlivými obory, ale zaměřit se na vědecké otázky z jejich průniků, které jsou spojené s vlivem ICE prostředí na člověka.

### 2.2.2 Kognitivní zátěž

Prvotní pojetí kognitivní zátěže (CL, Cognitive Load) pochází z oblasti výuky a vzdělávání, kterou se intenzivně zabýval Sweller et al. [51–53] kolem přelomu 19. a 20. století. Sweller [51] jako první formuloval teorii kognitivní zátěže (CLT, Cognitive Load Theory), podle které je CL definována jako zvýšené požadavky na ukládání a zpracování informací v pracovní paměti člověka. Chen et al. [54] definovali kognitivní zátěž jako proměnnou, jež určuje míru požadavků kladených úkolem na dostupné mentální zdroje pro zpracování informací. Míra požadavků vychází z vnímané námahy při učení, myšlení a uvažování jakožto ukazatel zatížení pracovní paměti během plnění úkolu. Tato míra zároveň popisuje interakce mezi nároky na zpracování úkolu a lidskou mentální výkonností [55]. Ačkoli se definice kognitivní zátěže v jednotlivých oborech mohou lišit, všechny mají jeden základní prvek: procento využití kapacity lidské pracovní paměti. Na rozdíl od naší smyslové a dlouhodobé paměti, které mohou v podstatě neomezeně zpracovávat informace, je tato kapacita omezená [56].

Chen et al. [54] publikovali, že vysoká kognitivní zátěž (kognitivní přetížení) může mít negativní dopad na výkonnost pracovní paměti. Vliv kognitivní zátěže zároveň ovlivňuje mozkové procesy a kognitivní přetížení pravděpodobně bezprostředně předchází vyhoření [56]. Většina kognitivních funkcí, jako je například selektivní pozornost nebo sebekontrola, závisí na pracovní paměti. Pracovní paměť zahrnuje aktivní krátkodobé ukládání, zpracování a manipulaci s informacemi a její efektivní fungování je kriticky závislé na inhibičních nervových procesech. Nervové středisko pracovní paměti sestává hlavně z distribuované sítě struktur zahrnující prefrontální kortex jako důležité ohnisko.

Variabilita srdeční frekvence (HRV) souvisí s aktivitou prefrontální kůry a je inverzně spojena s aktivitou subkortikálních struktur jako je amygdala [57]. Vliv kognitivní zátěže se také promítá do elektrodermální (EDA) a respirační (RSP) aktivity [21]. Díky periferním biologickým signálům se tedy naskytuje jednodušší možnost hodnocení či predikce kognitivních procesů bez nutnosti použití realizačně a finančně náročnějších neurozobrazovacích metod nebo elektroencefalografie (EEG). Detailněji jsou fyziologické změny spojené s vlivem CL popsány v následující sekci.

### 2.2.3 Fyziologické projevy

Z předchozího textu již může být zřejmé, že kognitivní zátěž je velmi úzce spojena s fyziologickými změnami v lidském organismu. U jedince, kde dojde k stimulaci CL,



může docházet k řadě změn, například v mozkové aktivitě, krevním tlaku, srdečním rytmu, rychlosti pulzní vlny, dýchání nebo činnosti potních žláz [55–60]. Vybrané fyziologické funkce, do kterých se promítá kognitivní zátěž, jsou společně s jejich krátkým popisem a neurobiologickým vztahem uvedeny v Tabulce 2.1. Tabulka zároveň poukazuje na rozdílné vztahy fyziologických parametrů s kognitivní zátěží.

**Tabulka 2.1:** Přehled vybraných nejčastěji studovaných fyziologických změn a stručné teoretické zdůvodnění jejich souvislosti s kognitivní zátěží (Upraveno a převzato z [56])

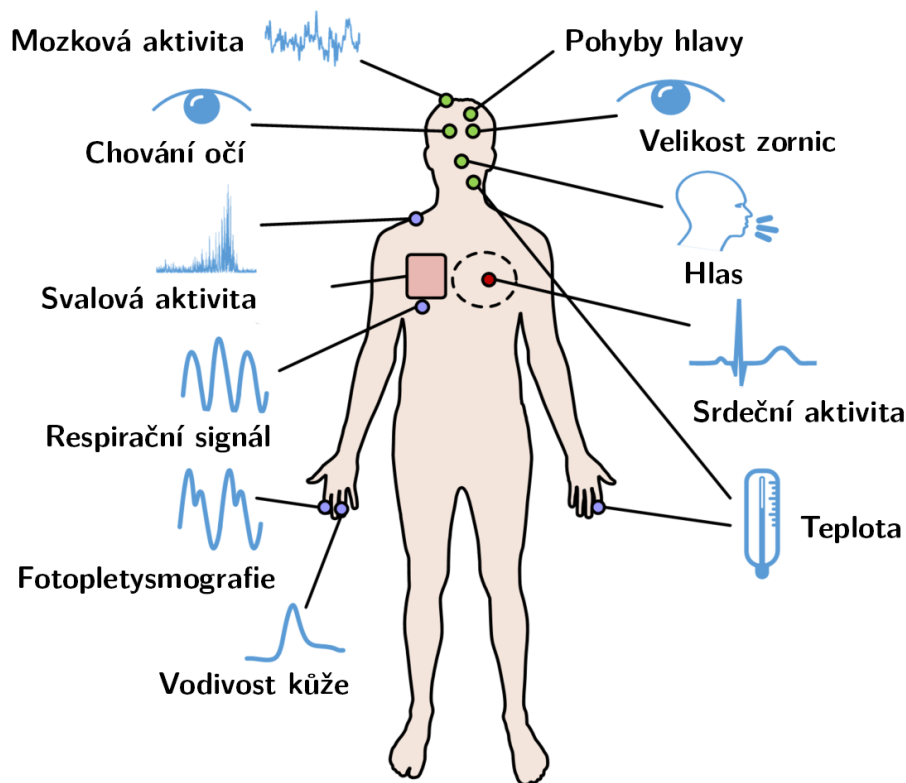
Fyziologická funkce	Stručný popis a teoretické zdůvodnění předpokládaného vztahu mezi fyziologickým měřením a kognitivní zátěží
EEG	<i>Popis:</i> EEG umožňuje měřit mozkovou aktivitu neinvazivně. Provedení spektrální analýzy naměřených rozdílů elektrických potenciálů umožňuje analyzovat výkon různých frekvenčních pásem, která jsou v signálu <i>Hypotéza:</i> Zvýšení kognitivní zátěže lze měřit zvýšením mozkové aktivity, tj. oscilací v určitém frekvenčním pásmu s větší amplitudou [61]
Eye-tracking	<i>Popis:</i> Měření průměru zornice, latence mrknutí a charakteristik sakád <i>Hypotéza:</i> Sledování očí bylo v předchozích studiích spojeno s kognitivní zátěží prostřednictvím neurobiologických mechanismů, jako je inervace neuronů autonomního nervového systému radiálními vlákny duhovky [62]
EDA	<i>Popis:</i> Elektrodermální aktivita, hodnotí elektrické charakteristiky kůže, aby bylo možné odvodit změny vlivem sympatického nervového systému. <i>Hypotéza:</i> Kognitivní zátěž má vliv na stres nebo vzrušení a vede ke zvýšení kožní vodivosti [63]
Teplota pokožky	<i>Popis:</i> Měření teploty vnějšího povrchu lidského těla <i>Hypotéza:</i> Kognitivní zátěž má vliv na stres nebo vzrušení a vede k vazokonstrikci, což snižuje teplotu kůže [64]
EKG	<i>Popis:</i> Srdeční frekvenci a variabilitu srdeční frekvence lze hodnotit pomocí elektrokardiogramu nebo fotopletysmografie <i>Hypotéza:</i> Tepová frekvence je měřítkem aktivity sympatického i parasympatického autonomního nervového systému. Stres nebo vzrušení způsobí zvýšení krevního tlaku a snížení variability srdeční frekvence [65, 66]
RSP	<i>Popis:</i> Kognitivní zátěž vede ke zrychlenému dýchání a vyšší minutové ventilaci, přičemž dechová amplituda zůstává stejná <i>Hypotéza:</i> Při soustředění pozornosti nebo plnění náročného úkolu dochází ke změnám v dýchání [67]

Příkladem rozdílností může být EEG, u kterého je vztah s kognitivní zátěží přímější než u srdeční nebo elektrodermální aktivity. Hodnocení pomocí tohoto biosignálu je tedy v některých případech spolehlivější. Pouze v některých, protože se vychází z předpokladu, že veškeré změny v kognitivních funkcích člověka se odrážejí v jeho fyziologii [56]. To znamená, že žádná měřicí technika nemůže sama o sobě zachytit všechny aspekty kognitivních funkcí nebo o nich jednoznačně vypovídat. Problematika těchto vztahů je nadále rozebírána v kapitole 2.3. Na tuto vícerozměrnou povahu kognitivní zátěže poukázali Kramer et al. [68]. Dále definoval kritéria: citlivost, diagnostičnost, rušivost, spolehlivost a obecnost použití, v rámci kterých bude mít každé fyziologické měření jinou povahu. V případě kognitivní zátěže a její spolehlivém hodnocení z fyziologických projevů je proto vhodný multimodální<sup>4</sup> přístup, který může poskytnout její robustnější reprezentaci [54].

<sup>4</sup>Multimodálním přístupem je myšleno využití více biosignálů.

### 2.2.4 Detekce a hodnocení kognitivní zátěže

Mezi tři nejčastěji používané způsoby detekce a hodnocení kognitivní zátěže patří dotazníkové metody subjektivního hodnocení a hodnocení založené na výkonnosti jedince. Třetím způsobem je právě využití periferních biosignálů. Subjektivní hodnocení vychází z předpokladu, že hodnocený subjekt je schopen vnímat své vlastní kognitivní procesy a informovat o případné kognitivní zátěži nebo o množství vynaloženého mentálního úsilí [69, 70]. K subjektivnímu hodnocení se dále využívají specifické dotazníky, mezi které patří například NASA-TLX. Jedná se o vícerozměrnou stupnici používanou k měření pracovní zátěže operátorů v rámci úkonů, například během vesmírných analogových misí [71]. Tyto metody ale nejsou předmětem této práce a jsou detailně popsány v [70].



**Obrázek 2.6:** Vybrané proměnné související s CL (Přeloženo a převzato z [72])

Na kognitivní zátěž lze nahlížet jako na multidimenzionální konstrukt, který reprezentuje zátěž vyvinutou na jedince [69]. Zároveň se efekt stimulace kognitivních funkcí u každého jedince projevuje jinak. Nelze tedy vytvořit žádnou univerzální metodu, která by byla schopná stejně spolehlivě detekovat kognitivní zátěž u různých subjektů. Proto se v tomto odvětví nabízejí a velmi často využívají metody strojového učení v rámci kterých nachází výhodné uplatnění dříve zmíněný multimodální přístup. Biologická data využívaná pro účely detekce CL lze vidět na Obr. 2.6.

Vzhledem k tomu, že je strojové učení širokou oblastí, byla tomuto tématu věnována samostatná sekce 2.6. Od roku 2010 je hojně využívána metoda učení

s učitelem (viz 2.6.1.1) pro účely klasifikace různých patologických stavů a symptomů [73]. Nejčastěji využívaným biosignálem je srdeční aktivita, konkrétně variabilita srdeční frekvence, které se mnohdy používá v kombinaci s elektrodermální aktivitou [69]. Použité příznaky pro klasifikaci (anglicky features) však hrají důležitou roli při rozlišování základní funkce spojené s jakýmkoli fyziologickým signálem. Z variability srdeční frekvence je v současnosti možné vypočítat desítky parametrů, resp. příznaků, se kterými je v těchto úlohách nutné zacházet velmi opatrně. Jednotlivé HRV parametry společně s jejich pravděpodobným významem byly již popsány v [55, 74–76]. Blíže je problematika HRV parametrů popsána v samotné podkapitole 2.4.2.

Dříve mezi často používané metody pro účely klasifikace patřili hlavně rozhodovací stromy (DT), lineární diskriminační analýza (LDA) nebo metoda podpůrných vektorů (SVM) [73]. Od roku 2018 se ve výzkumu HRV však stále častěji používá hluboké učení, jehož cílem je zlepšit automatickou klasifikaci v reálném čase. Tyto techniky poskytují efektivnější způsob extrakce relevantních informací a zvyšují přesnost klasifikace a současně snižují počet příznaků potřebných pro klasifikaci v reálném čase [77, 78]. O rok později se stalo novým trendem používání technik učení bez učitele pro klasifikaci psychického stresu s využitím technologie autoenkodéru [79]. Dále se mimo jiné začaly hojně používat samoorganizující mapy (SOM), které dokáží efektivně redukovat dimenzionalitu dat a zároveň indikovat nejčastější<sup>5</sup> příznaky pro klasifikaci kognitivní zátěže s vysokou přesností [80]. V rámci předzpracování biosignálů pro potřeby zmíněných technik však neexistuje žádná sjednaná metodika. Stejně tak ani pro výběr příznaků nebo z jaké metodiky pro detekci vůbec CL ideálně vycházet. Proto se stále zkouší variace různých algoritmů se snahou o zlepšení přesnosti klasifikace.

## 2.3 Neuroviscerální integrace

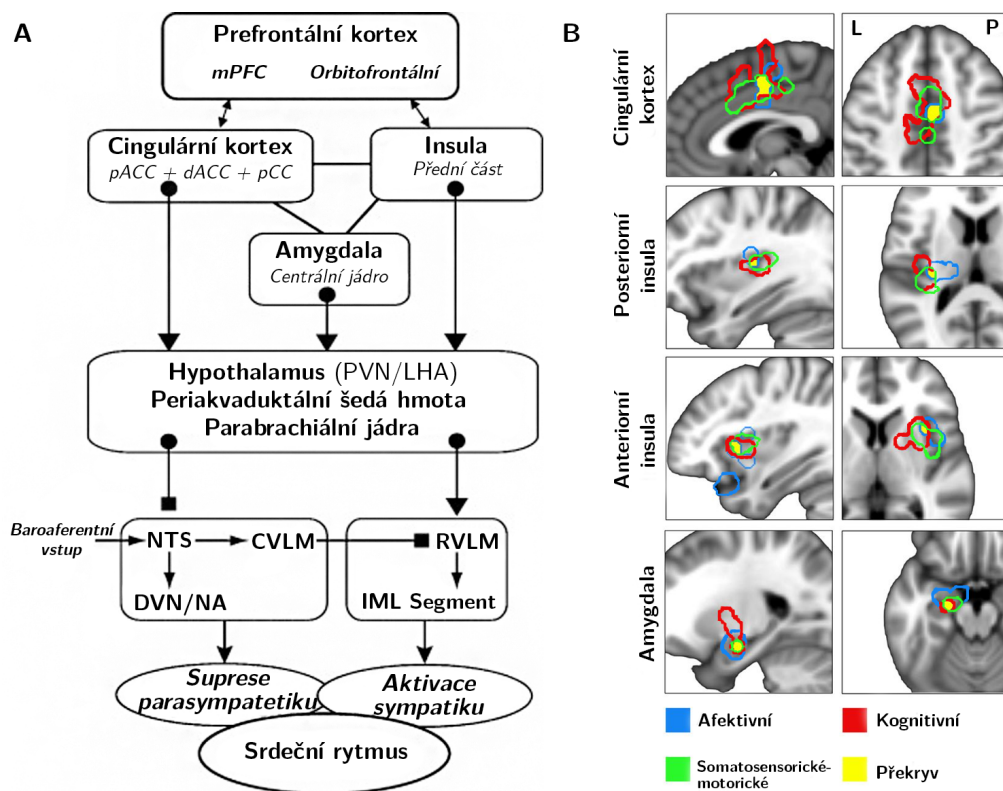
Z minulých kapitol vyplývá, že se veškeré kognitivní funkce člověka promítají zároveň do těch fyziologických. Většina studií, které se věnují detekci a hodnocení kognitivní zátěže však tento širší kontext nebere v úvahu. Díky tomu je nedostatek systematického porovnávání indexů HRV (viz následující kapitola 2.4), což činí interpretaci a vyhodnocování výsledků zdlouhavým a sporným. Problémem je také samozřejmě dříve zmíněný nedostatek dat. Tato kapitola slouží k zasazení úlohy této práce do širšího obrazu a zároveň pro zdůraznění důležitosti problematiky samotné.

V současné době existuje mnoho studií, které vypovídají o tom, že parasympatický neboli vagový tonus, souvisí s psychologickými a behaviorálními proměnnými i zdravotním stavem. Studie například odhalily velký počet konzistentních zjištění, která ukazují, že jedinci s vyšší variabilitou srdeční frekvence mají větší schopnosti

<sup>5</sup>Implikuje, jak moc přispívá každý příznak k predikci modelu.

v oblasti regulace emocí [81–86] a dosahují lepších výsledků v kognitivních úkolech zahrnujících pozornost, pracovní paměť a inhibiční kontrolu [57, 87–89]. Pokud bychom kategorizovali HRV pouze na dvě úrovně, vyšší a nižší, tak lze s postupem let pozorovat množství poznatků z hlediska prognostického významu:

- **vyšší HRV** — lepší regulace glukózy, lepší funkce osy hypotalamus-nadledviny-hypofýza (HPA), snížení zánětu a snížení rizika mrtvice, kardiovaskulárních onemocnění a úmrtnosti ze všech příčin [90–93]
- **nižší HRV** — afektivní poruchy, deprese a úzkost, špatná kardiovaskulární kondice, vyšší riziko infarktu, zvýšená kognitivní zátěž [94–96]



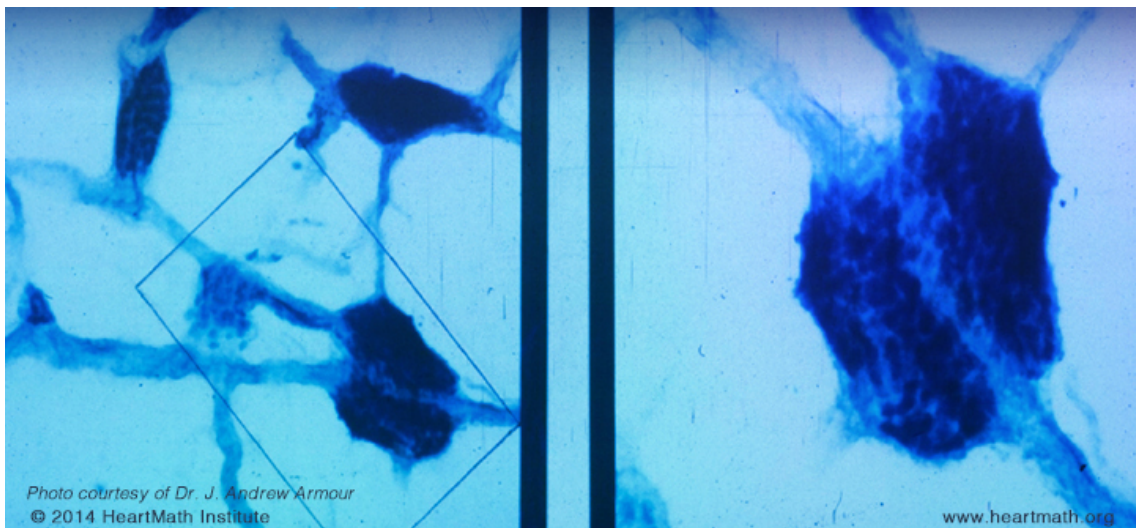
**Obrázek 2.7:** (A) Složené schéma znázorňující dráhy, kterými může prefrontální kůra ovlivňovat řízení srdeční frekvence; (B) Jádrové oblasti CAN, jak je odhalila konjunkční analýza<sup>6</sup> autonomních modulačních oblastí ve třech kategoriích úkolů (barevně označeny). L, levá strana; P, pravá strana (Upraveno a převzato z [97, 98])

Objasnění pozorovaných vztahů mezi HRV a psychologickými/behaviorálními proměnnými může v rámci mentálního a fyziologického stavu jedince zlepšit porozumění a praktickou využitelnost nejen v medicíně. Model „neuroviscerální integrace“ (NVI), který v roce 2000 navrhli Thayer a Lane [99], je pokusem o integraci poznatků o mentálních stavech, autonomních funkcích a zdravotních výsledcích do jednotného rámce, jehož středobodem je „centrální autonomní síť“ (CAN) v mozku.

<sup>6</sup>Společné testování více účinků u jednoho subjektu využitím fMRI.

CAN je síť vzájemně propojených oblastí mozkových struktur [100]. Hlavní části této sítě ukázali pomocí experimentu Beissner et al. [98] (viz Obr. 2.7B).

Na diagramu 2.7A lze vidět prefrontální, cingulární a insulární kůru, jež tvoří propojenou síť s obousměrnou komunikací s amygdalou. Amygdala je pod tonickou inhibiční kontrolou prostřednictvím prefrontálních vagových drah k interkalárním buňkám v amygdale. Aktivace centrálního jádra amygdaly (CeA) inhibuje jádro solitárního traktu (NTS: plný čtverec), které následně inhibuje inhibiční vstupy kaudálního ventrolaterálního medulárního jádra (CVLM) do rostrálního ventrolaterálního medulárního jádra (RVLM) sympatoexcitačních neuronů (plný čtverec) a současně inhibuje vagové motorické neurony v nucleus ambiguus (NA) a dorzálním vagovém motorickém jádru (DVN). Kromě toho může CeA přímo aktivovat sympatoexcitační neurony v RVLM [97].



**Obrázek 2.8:** Mikroskopický obraz propojených vnitřních srdečních ganglií v lidském srdci. Tenké, světle modré struktury jsou vícenásobné axony, které ganglie propojují (Převzato z [101] se souhlasem HeartMath Institutu)

Centrální autonomní síť, tvořena pregangliovými sympatickými a parasympatickými neurony, inervuje srdce prostřednictvím hvězdicových ganglií a n. vagus. Vlivy těchto drah na sinoatriální uzel (SA) jsou hlavním faktorem určujícím HRV. Vzhledem k rozsáhlým aferentním informacím této autonomní sítě se promítá úroveň integrace mezi periferním a centrálním nervovým systémem do HRV a poskytuje kontextově specifickou regulaci srdce. Změny autonomních funkcí, zejména v kognitivních a afektivních souvislostech, odrážejí především vagový vliv, protože časové měřítko změn tonu sympatiku je relativně pomalejší než u tonu parasympatiku [57, 100].

Obrázek 2.7A znázorňuje dráhy, které umožňují prefrontální kůře regulovat srdeční frekvenci a její variabilitu. ANS má jak tonickou excitační, tak inhibiční kontrolu nad HR, kterou může modulovat frontální kůra prostřednictvím CeA. To umožňuje přesnou regulaci variability srdečního rytmu, která na srdeční úrovni

probíhá pomocí intrakardiálních neuronů (viz Obrázek 2.8). Prefrontální kůra rovněž vykonává tonickou inhibiční kontrolu nad těmito obvody, jak dokládá inverzní korelace mezi aktivitou ventromediálního prefrontální a orbitofrontální kortexu a úrovní kožní vodivosti během výchozího stavu mozku<sup>7</sup>. To podporuje současný NVI model a je v souladu s pozorováním, kde tyto oblasti jsou deaktivovány během kognitivních úkolů při současném zvýšení hladiny kožní vodivosti [100, 102, 103].

Souhrnně lze říci, že NVI model integruje podstatu periferních fyziologických změn vlivem specifických mozkových struktur do jednotného frameworku, který se tyto adaptivní pochody snaží vysvětlit. Podle Thayera a Lanea [99] je tento framework spojen s psychologickými a fyziologickými procesy prostřednictvím kortiko-subkortikálního neuronálního okruhu, který lze indexovat pomocí HRV. Prefrontální kůra může inhibovat podkorové struktury, což umožňuje organismu účinně reagovat na požadavky prostředí [100]. Model NVI představuje a popisuje víceúrovňovou funkční strukturu vagové kontroly, jejíž kompletní rozbor ale přesahuje rozsah této práce. Jednotlivé úrovně dokládají důkazy o souvislosti mezi HRV a fyziologickou, afektivní a kognitivní regulací. Zbytek kapitoly je proto věnován pouze souhrnu kognitivní regulace. Důkladně byl NVI model rozebrán v literatuře [57, 100, 104].

### 2.3.1 Kognitivní regulace

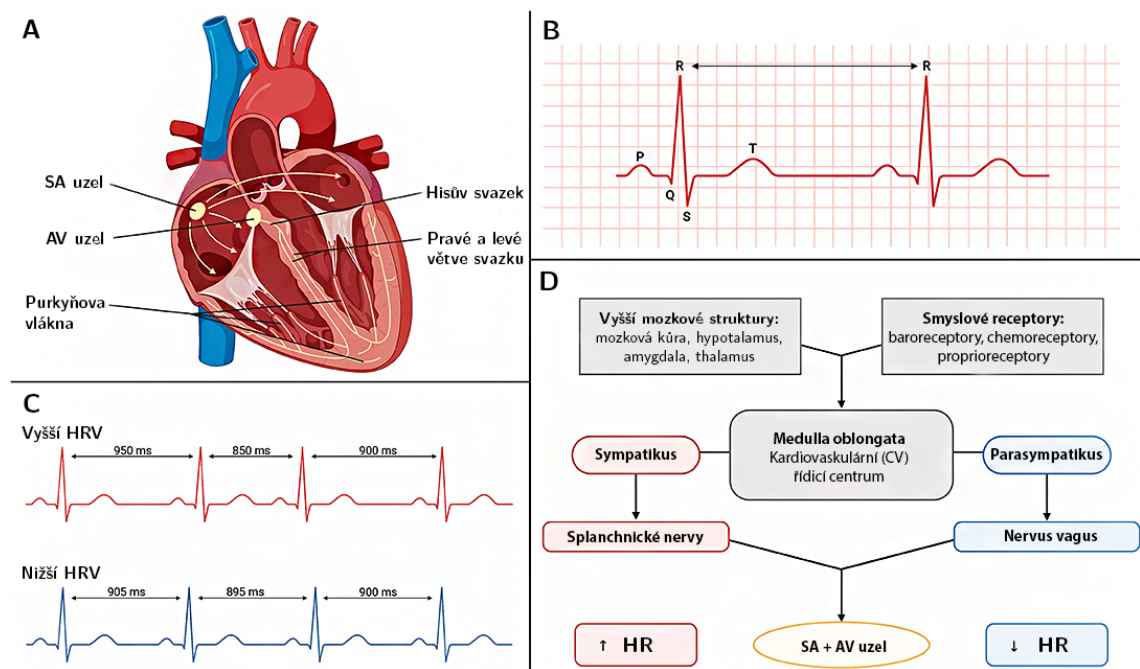
Schopnost regulovat pozornost a potlačovat nežádoucí reakce (negativní afektivní stavy) je nezbytná pro přizpůsobení se například právě ICE prostředí. Prefrontální korová aktivita je důležitá pro úkoly vyžadující pracovní paměť, trvalou pozornost, inhibici chování a mentální flexibilitu [100]. Předchozí studie prokázaly, že jedinci s vyšší klidovou HRV dosahovali lepších výsledků při řešení úkolů (n-back test, Stroopův test) vyžadujících exekutivní funkce než jedinci s nižší klidovou HRV [87, 88]. Stres může také zhoršovat kognitivní funkce, přičemž jedinci s nižší klidovou variabilitou vykazovali horší výkonnost při řešení určitých úkolů, kde byli vystaveni ohrožení a také větší reakci kortizolu na mírné kognitivní výzvy, které přetrvávaly i v období zotavení, ve srovnání s jedinci s vysokou klidovou HRV [100].

Saus et al. [89] ukázali na realističtějších scénářích zahrnující příslušníky policie, kteří plnili úkoly ve virtuální realitě, že jedinci s vyšší klidovou HRV vykazovali větší situační povědomí a lepší výkon v plnění úkolu. Kromě toho byl tento krátký tréninkový program spojen s méně významným snížením HRV během plnění úkolu, což naznačuje snížení mentální zátěže. Tyto výsledky naznačují, že jedinci s vyšší klidovou HRV jsou lépe vybaveni pro plnění úkolů, které zahrnují exekutivní a inhibiční funkce, a to jak v laboratorním, tak v reálném prostředí. Navíc naznačují, že trénink může ovlivnit variabilitu srdečního rytmu a kognitivní výkon.

<sup>7</sup>Základní stav fyziologického mozku dospělého člověka z hlediska frakce extrakce kyslíku z mozku neboli OEF [102].

## 2.4 Variabilita srdeční frekvence

Variabilita srdeční frekvence (HRV) vypovídá o časové variabilitě mezi jednotlivými srdečními stahy a umožňuje nahlédnout do regulace různých tělesných funkcí autonomním nervovým systémem. Následující kapitola se zabývá způsoby jakými je možné takové nahlédnutí realizovat a zároveň poukazuje na současné nedostatky této problematiky, které je třeba brát v úvahu. Nejdříve je na místě uvést obecné objasnění vzniku a souvislosti variability srdeční frekvence s funkcionalitou srdce. Regulační pochody autonomního nervového systému spojené s HRV byly popsány v minulé kapitole (zjednodušeně viz Obr. 2.9D).



**Obrázek 2.9:** (A) Převodní systém srdeční; (B) Schéma EKG záznamu elektrické aktivity; (C) Vysoká vs. nízká variabilita srdeční frekvence; (D) Schéma znázorňující různé faktory ovlivňující HR a HRV resp. zjednodušená část NVI modelu (Upraveno a převzato z [105])

Jak již bylo řečeno, HRV lze získat jako časovou diferenci mezi jednotlivými srdečními údery, přičemž úder označujeme jako depolarizaci komor. To je část srdečního cyklu, během které dochází ke genezi QRS komplexu. Aby bylo možné tuto časovou diferenci vypočítat, je potřeba zmíněný komplex detekovat. K tomu se využívá elektrokardiogram neboli záznam elektrické aktivity srdce, na kterém QRS komplex představuje vývoj elektrické aktivace komor myokardu. Srdeční cyklus a anatomie srdce již byly detailně popsány v [106–108]. EKG záznam společně s QRS komplexem lze vidět na ilustraci 2.9B.

K detekci QRS komplexu se primárně využívá jeho pozitivní kmit neboli R vlna, která se v EKG signálu za fyziologických podmínek vyskytuje periodicky, v závislosti na srdečním rytmu, konkrétně na autorytmických buňkách. Tyto srdeční

buňky generují stimulační elektrické potenciály, jež iniciují srdeční stah. Hlavním iniciátorem (pacemakerem), určující srdeční frekvenci, je sinoatriální (SA) uzel. Převodní systém srdeční byl již podrobně popsán v [106, 107, 109] a lze jej vidět na Obr. 2.9A. Za účelem samotné detekce se využívá mnoho algoritmů založených například na: vlnkové nebo Hilbertově transformaci, prahování nebo neuronových sítích. Každý algoritmus zároveň samozřejmě využívá a těží ze svého vlastního způsobu předzpracování EKG. Některé populární algoritmy popsali Porr a Howell v [110]. Fluktuaci časových diferencí mezi po sobě jdoucími R vlny a náležitou změnu HRV lze pozorovat na Obr. 2.9C.

### 2.4.1 Trendy v analýze HRV

Oblast vývoje problematiky analýzy variability srdečního rytmu je možné rozdělit na několik podskupin. První podskupinu tvoří příznaky použité k analýze. Výběr HRV příznaků (parametrů) hraje významnou roli v rámci mapování vnějších vlivů na funkci biosignálu. Z počátku se využívalo pouze deskriptivní statistiky na řady nasbíraných hodnot srdečního rytmu pro účely odhalení srdečních patologií. Zlom ale nastal v 70. letech 20. století, kdy se k analýze začaly využívat R–R intervaly, a došlo tak k vývoji nových časových parametrů, například RMSSD, pNN50 nebo SDNN, které se stále hojně využívají. Poté přišla na řadu spektrální a nelineární analýza, tedy frekvenční a nelineární parametry, které s sebou přinesly i nový vizuální náhled. V poslední době se používá hlavně časově-frekvenční analýza, během které se aplikují spektrální metody na specificky dlouhá časová okna a získají se tak frekvenční parametry jako LF (Low Frequency) nebo HF (High Frequency). Je tak umožněno sledování okamžitých změn HRV, což může účinně diagnostikovat například kardiovaskulární onemocnění [73, 101].

Do další podskupiny lze zařadit způsoby měření HRV. Od 90. let 20. století se výzkum HRV rozšířil o analýzu využitím krevního tlaku a dýchání prostřednictvím fotopletysmografie (PPG) a hrudních pásů. Došlo tak k prohloubení HRV výzkumu vzhledem k multimodálnímu přístupu měření. Současně se využívá nositelných technologií (tzv. wearables) v podobě například hodinek na zápěstí, které však často měřené parametry poskytují pouze agregovaně za určité časové úseky. Výhodou těchto zařízení je sice jejich mobilita ale na úkor přesnosti poskytovaných dat. Detailní popis zmíněných podskupin společně s dalšími trendy byl již uveden v [73].

### 2.4.2 Struktura HRV indexů

Vzhledem k popularitě analýzy HRV napříč obory vznikla problematika týkající se interpretace dostupných metrik. Jedním z hlavních problémů je nedostatečné pochopení funkčního vztahu mezi HRV ukazateli a fyziologickými procesy. Také se tyto ukazatele často používají zaměnitelně, což jen přispívá k nejasnostem



**Tabulka 2.2:** Vybrané parametry z časové a frekvenční oblasti [73]

Parametr	Popis
SDNN	Směrodatná odchylka intervalů mezi dvěma normálními srdečními tepy (N–N). Snižuje se v reakci na CL
RMSSD	Střední kvadratická hodnota po sobě jdoucích N–N intervalů. Primárně se řídí aktivitou PNS
pNN50	Vyjadřuje poměr rozdílů N–N intervalů, které se liší o více než 50 ms. Korelace s aktivitou PNS, RMSSD, HF
SD1	Nelineární proměnné odvozené z Poincarého grafu. Sdílí vysokou korelaci s HF, RMSSD. Snižuje se v důsledku CL
SD2	Nelineární proměnné odvozené z Poincarého grafu. Sdílí vysokou korelaci s LF. Zvyšuje se v reakci na CL
GSR std	Směrodatná odchylka spojená s elektrodermální aktivitou. Zvyšuje se během CL
GSR mean	Průměrná hodnota získaná měřením rychlosti změn spojených s aktivitou EDA. Zvyšuje se během CL
RSP rate	Představuje frekvenci dýchání, zvýšení respirační frekvence vede ke zvýšení aktivity PNS, VF a snížení LF a aktivity SNS. Zvýšení v reakci na CL
LF	Reprezentuje 0,04–0,15 Hz v rámci PSD <sup>1</sup> a většinou se používá k označení aktivity SNS ale může specifikovat i aktivitu PNS
HF	Představuje frekvenční rozsah 0,15–0,40 Hz a označuje výhradně aktivitu PNS

<sup>1</sup> Výkonová spektrální hustota (anglicky Power Spectral Density) — vyjadřuje výkon obsažený v určitém intervalu spojitého frekvenčního spektra

ohledně jejich skutečného významu [111, 112]. Zároveň se často HRV metriky používají kombinovaně. To představuje problém při interpretaci výsledků výzkumu a může být příčinou nekonzistentních výsledků. Stěžejním procesem se také stává reprodukovatelnost, jelikož různé studie zkoumající stejný jev mohou při popisu vztahu s variabilitou srdeční frekvence vycházet z různých ukazatelů. Také se často nebere ohled na podobnost a překrývání mnoha těchto ukazatelů. Studie například ukázaly, že indexy v časové a frekvenční oblasti, jako je RMSSD a pNN50, spolu silně korelují a jsou vysoce spojeny s výkonem HF. V důsledku toho lze tyto míry považovat za zaměnitelné při hodnocení parasympatické modulace HRV. Nejasnosti ohledně fyziologických důsledků těchto ukazatelů zvyšují právě náročnost objasnění jejich výsledků [73, 74, 113, 114].

Je také třeba poznamenat, že výpočet RMSSD zahrnuje výpočet rozdílů mezi po sobě jdoucími R–R (N–N) intervaly. V důsledku toho tento index odráží především vysokofrekvenční oscilační vzorce srdečního rytmu a není ovlivněn dlouhodobými změnami. Naproti tomu SDNN, o němž se předpokládá, že zachycuje jak sympatickou, tak parasympatickou aktivitu, je silně spojen s celkovým výkonem ve výkonovém spektru HRV [73, 113–115].

V posledních letech se parametry SD1 a SD2 konvenčně interpretují jako nelineární. Toto tvrzení bylo však znehodnoceno matematickým důkazem, který potvrdil, že metriky RMSSD a SD1 jsou ekvivalentní [116]. Tím pádem studie, které uvádějí tyto dva krátkodobé HRV indexy často vágně dospívají k podobným statistickým výsledkům, aniž by tuto ekvivalenci rozpoznaly [74, 117–119].

Některé studie navíc zaznamenaly podobnosti mezi poměrovými parametry SD1/SD2 a LF/HF při hodnocení rovnováhy mezi krátkodobou a dlouhodobou variabilitou srdečního rytmu. Nezhlednění těchto překryvů v analýzách může vést ke statistickým chybám. Ty mohou zahrnovat přílišnou důvěru v závěry (projevující se falešně vysokým počtem parametrů shodujících se s určitým trendem), problémy s kolinearitou (pokud je jako prediktory použito více metrik současně), potenciální nadměrnou korekci (např. prostřednictvím metod úpravy p-hodnoty Bonferroniho typu) a zbytečnou složitost výsledků [74, 117, 120–122].

## 2.5 Periferní biosignály

Kromě elektrické srdeční aktivity, která byla diskutována v minulé sekci a je hlavní zkoumanou proměnnou, se mezi další periferní biosignály zkoumané v této práci řadí také elektrodermální a respirační aktivita. V následující podkapitole jsou tyto periferní biosignály uvedeny do souvislosti s problematikou práce a předchozími kapitolami. Dále je stručný přehled jak lze zkoumané signály zaznamenat a zpracovat.

O elektrodermální aktivitě lze hovořit jako o fyziologickém procesu úzce spojeném s aktivitou potních žláz, jež je ovlivňován ANS. Aktivita potních žláz vede ke změnám elektrického kožního odporu. Zvýšením této aktivity tak dochází k poklesu elektrického odporu kůže (zvýšení kožní vodivosti) a naopak [123–125]. Fredrikson et al. [126] ukázali, že EDA je úzce spojená s aktivitou cingulární, sekundární zrakové a pravé inferiorní parietální kůry, přičemž nejsilnější korelace byla pozorována v pravém insulárním kortexu, jež je součástí CAN. Další studie naznačují mnohočetné souvislosti mezi změnami kožní vodivosti a CAN regiony [124, 127–129]. EDA tedy nachází velké uplatnění v neuropsychofyziologickém výzkumu, ale stejně jako u HRV se zde vyskytují problémy s interpretací metrik, které z ní vycházejí [130]. Z anatomického, fyziologického a biofyzikálního hlediska je elektrodermální aktivita důkladně rozebrána v [123]. Úzká provázanost kožní vodivosti a kognitivní zátěže s využitím EDA pro její detekci a hodnocení je podložena studii [131–138].

Respirační aktivitou se rozumí proces dýchání, při kterém dochází k výměně kyslíku a oxidu uhličitého mezi plícemi a okolím. Dýchací ústrojí je důkladně popsáno například v [139]. Respirační signál jako takový odráží cyklické změny objemu plic během dýchání. Dýchací aktivita je ovlivněna celou řadou faktorů, včetně fyzické aktivity, stresu, emocí i kognitivních nároků. Například kognitivní úkoly vyžadující trvalou pozornost nebo vyšší nároky na pracovní paměť mohou zvýšit dechovou námahu a spotřebu kyslíku v mozku. Obecně se amplituda a frekvence dechového signálu zvyšuje s rostoucí kognitivní zátěží [140]. Existují studie, které byly popsány v [67] a vypovídají o významném vztahu mezi respiračním signálem a CL, avšak oproti srdeční a elektrodermální aktivitě je tento signál mnohem častěji zanedbáván.

To může vysvětlovat větší počet protichůdných a negativních studií, které popírají význam RSP při detekci a hodnocení kognitivní zátěže [67, 140].

## 2.5.1 Měření biosignálů

V následujících sekcích jsou popsány principy měření a postupy zpracování periferních biosignálů, které byly využívány pro účely této diplomové práce. Těmi jsou konkrétně srdeční, elektrodermální a respirační aktivita.

### 2.5.1.1 Elektrická srdeční aktivita

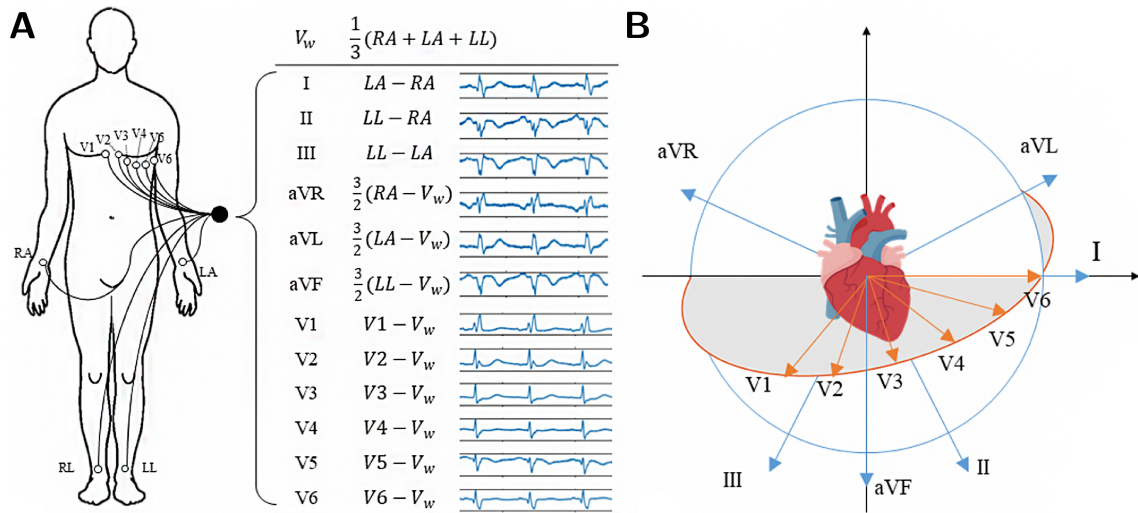
Záznam elektrické srdeční aktivity (elektrokardiogram) je výstupem komplexních fyziologických a technologických procesů. Z fyziologického hlediska je třeba nahlédnout na celulární úroveň, kde díky toku iontů přes buněčné membrány a mezi sousedními buňkami vznikají transmembránové iontové proudy. Geneze těchto proudů je synchronizována díky srdečnímu cyklu, během kterého dochází k tvorbě časově závislého elektrického pole v myokardu. Toto elektrické pole pak podléhá interferenci různých dalších struktur, jako jsou plíce, krev a kosterní svalstvo až kůže. Na kůži jsou poté proudy měřeny elektrodami umístěnými na určitých místech končetin a trupu v takové konfiguraci, aby vytvářely bipolární svody [141]. Elektrofyziologie myokardu byla již detailně popsána v [106–109].

Svody zaznamenávají rozdíl potenciálů mezi dvěma elektrodami, přičemž jedna je označována jako kladná a druhá záporná. Bipolární potenciál se následně získává jako rozdíl potenciálů kladné a záporné elektrody. U některých konfigurací je elektricky spojeno více elektrod, které představují záporný člen bipolárního páru, označovaný jako referenční elektroda. Výstupní potenciály elektrod jsou ve finále zesíleny a filtrovány [109, 141].

Jednou z konfigurací je standardní klinické EKG, které zahrnuje záznamy z 12 svodů. Svody v tomto případě sestávají ze standardních končetinových svodů (svody I, II a III), šesti prekordiálních svodů (svody V1 až V6) a ze tří rozšířených (augmentovaných) končetinových svodů<sup>8</sup> (svody aVR, aVL a aVF) [109, 141].

**Standardní končetinové svody.** Standardní končetinové svody zachycují rozdíly potenciálů mezi dvěma končetinami. Elektroda na pravé noze slouží jako referenční, snižuje šum a není tak součástí konfigurace svodů. Svody jsou uspořádány do trojúhelníku, který se často nazývá jako Einthovenův trojúhelník. Toto uspořádání zajišťuje, že potenciál snímaný ve svodu II odpovídá součtu potenciálů měřených ve svodech I a III [109, 141].

<sup>8</sup>Prekordiální a rozšířené končetinové elektrody jsou často označovány jako „unipolární“ svody.



**Obrázek 2.10:** Ilustrace 12svodového EKG systému. **A)** Prostorové rozmístění 10 elektrod: tři končetinové svody, tři rozšířené končetinové svody a šest prekordiálních (hrudních) svodů, které byly vytvořeny mezi fyzickými elektrodami a virtuální elektrodou známou jako Wilsonův centrální terminál ( $V_w$ ). **B)** Rozdíly elektrických potenciálů mezi elektrodami odrážejí elektrickou aktivitu srdce z různých prostorových úhlů (Přeloženo a převzato z [142])

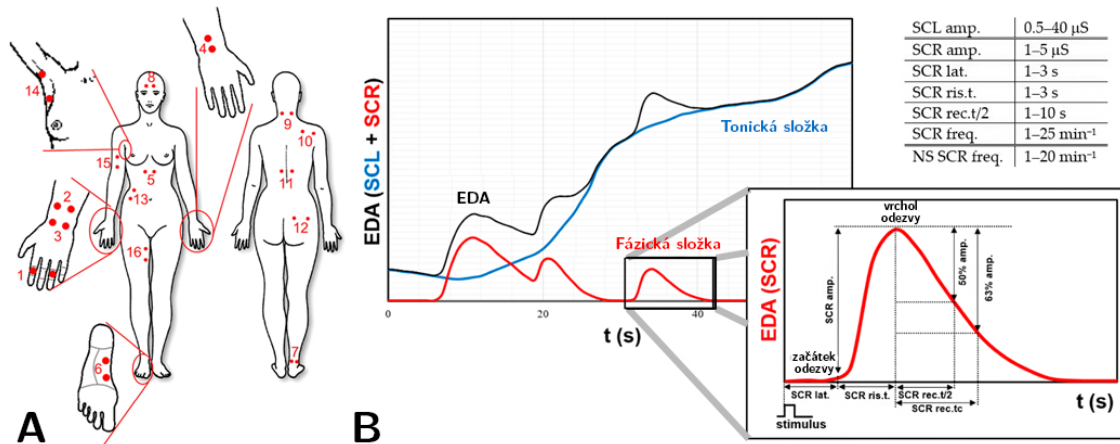
**Prekordiální svody a wilsonův centrální terminál.** Prekordiální svody se používají k záznamu potenciálu v každém ze šesti určených míst trupu vzhledem k referenci. Na každé místo se umístí aktivní elektroda připojená ke kladnému vstupu záznamového systému. Referenčním vstupem je složená elektroda známá jako Wilsonova centrální svorka, která je vytvořena kombinací výstupu elektrod levé paže (LA), pravé paže (RA) a levé nohy (LL) prostřednictvím odporů ( $5000 \Omega$ ) [109, 141].

**Rozšířené končetinové svody.** Jak již bylo zmíněno, třemi augmentovanými svody jsou aVR, aVL a aVF. U svodu aVR je aktivní elektrodou sloužící jako pozitivní vstup elektroda pravé paže, zatímco u svodu aVL je to elektroda levé paže a u svodu aVF elektroda levé nohy. Referenční potenciál je zde vytvořen spojením dvou končetinových elektrod, které se nepoužívají jako aktivní. Účelem tohoto modifikovaného referenčního systému je generovat signál s vyšší amplitudou než při použití Wilsonovy centrální svorky jako referenční elektrody [109, 141].

**Další svodové systémy.** Byly vyvinuty různé svodové systémy, které umožňují detekovat diagnosticky významné informace, jež nemusí být zachyceny standardním 12svodovým EKG, a zlepšit efektivitu záznamu, přenosu a ukládání EKG. Používají se například levé zadní svody k detekci akutních posterolaterálních infarktů nebo elektrodová pole o 80 nebo více elektrodách k zobrazení potenciálů povrchu těla jako izopotenciálních map [109, 141]. Přehled dalších svodových systému včetně nositelných byl popsán v [143–145].

### 2.5.1.2 Elektrodermální aktivita

V úvodu kapitoly bylo řečeno, že princip měření EDA je založen na skutečnosti, že činnost potních žláz, která je regulována sympatickým nervovým systémem, vede ke změnám vodivosti kůže. Díky tomu je měření elektrodermální aktivity běžně používanou metodou pro hodnocení fyziologických reakcí souvisejících s emočními a kognitivními procesy.



**Obrázek 2.11:** **A)** Možná místa měření kožní vodivosti. **B)** Typická odezva elektrodermální aktivity (Upraveno a převzato z [146, 147])

Měření elektrodermální aktivity zahrnuje umístění dvou elektrod na kůži, přičemž jedna měří rozdíly potenciálů mezi dvěma body na kůži a druhá slouží jako referenční elektroda. Elektrody se obvykle umísťují na prsty nebo dlaň ruky, i když lze použít i jiná místa, například chodidla nebo čelo (viz Obr. 2.11A). Měří se elektrická vodivost kůže v reakci na malý stejnosměrný nebo střídavý proud [123, 128].

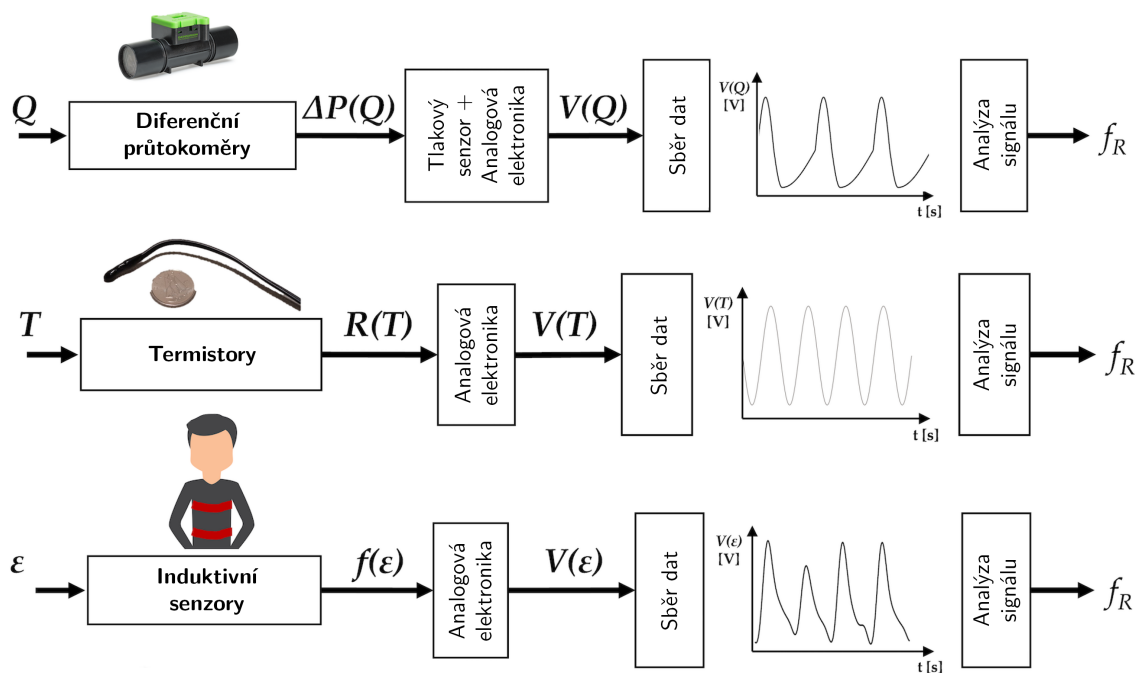
Z pohledu způsobu měření elektrodermální aktivity lze tedy rozlišovat dvě hlavní kategorie: endosomatická a exosomatická měření. V rámci endosomatického měření se zaznamenává pouze potenciál generovaný kůží bez použití vnějšího zdroje. U exosomatického měření se využívají externí zdroje, jako je právě střídavý nebo stejnosměrný proud přiváděný na kůži. Aplikace konstantního stejnosměrného napětí nebo proudu umožňuje měření vodivosti kůže (resp. odporu kůže podle Ohmova zákona). Pokud se aplikuje konstantní střídavé napětí nebo proud, lze měřit kožní admitanci (resp. kožní impedanci). Nejpoužívanější metodou pro exosomatická měření je metoda stejnosměrného konstantního napětí díky jednoduššímu procesu vyhodnocování a interpretace [123, 128, 148, 149].

Měřená kožní vodivost nebo kožní potenciál se vyjadřují v jednotkách vodivosti (mikrosiemens,  $\mu\text{S}$ ) a napětí (mV). V naměřeném signálu se odrážejí změny v různých časových škálách, které se běžně dělí na dvě složky: tonickou (SCL) a fázickou (SCR). Tonická složka představuje velikost kožní vodivosti nebo potenciálu v nepřítomnosti

sudomotorické nervové aktivity<sup>9</sup>, zatímco fázická se týká rychlých změn kožní vodivosti nebo potenciálu jako přímého důsledku sudomotorického vzruchu. Fázická složka je charakterizován nástupem (SCR ris.), dobou nárůstu (SCR ris. t.), amplitudou (SCR amp.) a dobou zotavení (SCR rec. tc.). Na Obr. 2.11 lze vidět průběh EDA složek společně s jejich korespondujícím popisem. Tonické a fázické složky lze oddělit pomocí technik zpracování signálu [123, 128, 148, 149].

### 2.5.1.3 Respirační aktivita

Pro měření dechové aktivity (resp. dechové frekvence) je k dispozici mnoho metod, od přímého měření ventilace až po nepřímé měření pohybů souvisejících s dýcháním. V této sekci je stručný přehled často používaných metod měření dechové aktivity.



**Obrázek 2.12:** Různé technologie pro měření dechové frekvence ( $f_R$ ). Nahoře z kategorie snímačů proudění vzduchu, kde  $\Delta P(Q)$  je změna úbytku tlaku způsobená prouděním vzduchu  $Q$ . Uprostřed z kategorie snímačů teploty, kde  $R(T)$  je změna odporu způsobená vlivem teploty  $T$ . Dole z kategorie tenzometrických snímačů, kde  $f(\epsilon)$  je změna odporu způsobená deformačním tlakem  $\epsilon$ .  $V(X)$  je výstupní napětí (Upraveno a převzato z [150])

Jednou z nejběžnějších metod měření dechové aktivity je přímé měření ventilace. Ventilace je celkový objem vzduchu, který se během každého nádechu přesune do plic a z plic ven, a lze ji měřit pomocí několika technik včetně spirometrie, pletysmografie a kapnometrie. Spirometrie měří objem vzduchu, který je vdechován a vydechován, zatímco pletysmografie měří změny tlaku v uzavřené komoře během dýchání. Kapnometrie měří koncentraci oxidu uhličitého ve vydechovaném vzduchu,

<sup>9</sup>Sudomotorická nervová aktivita se vztahuje k ANS kontrole aktivity potních žláz v reakci na různé environmentální a individuální faktory.

což úzce souvisí s ventilací. Tyto techniky umožňují přesné měření dechové aktivity, ale mohou být invazivní a vyžadují specializované vybavení [150–152].

Alternativní metodou měření dechové aktivity je nepřímé měření pohybů souvisejících s dýcháním. Tyto pohyby lze detekovat pomocí senzorů jako jsou piezoelektrické senzory, tenzometry nebo akcelerometry, přičemž jsou umístěny na hrudníku nebo bříše. Snímače detekují změny tvaru nebo pohybu hrudníku nebo břicha během dýchání a lze je použít k odhadu dechové frekvence a objemu. Tyto metody jsou méně invazivní než přímé měření ventilace a lze je použít v reálném prostředí, avšak u některých populací nebo za určitých podmínek mohou být méně přesné [150–153].

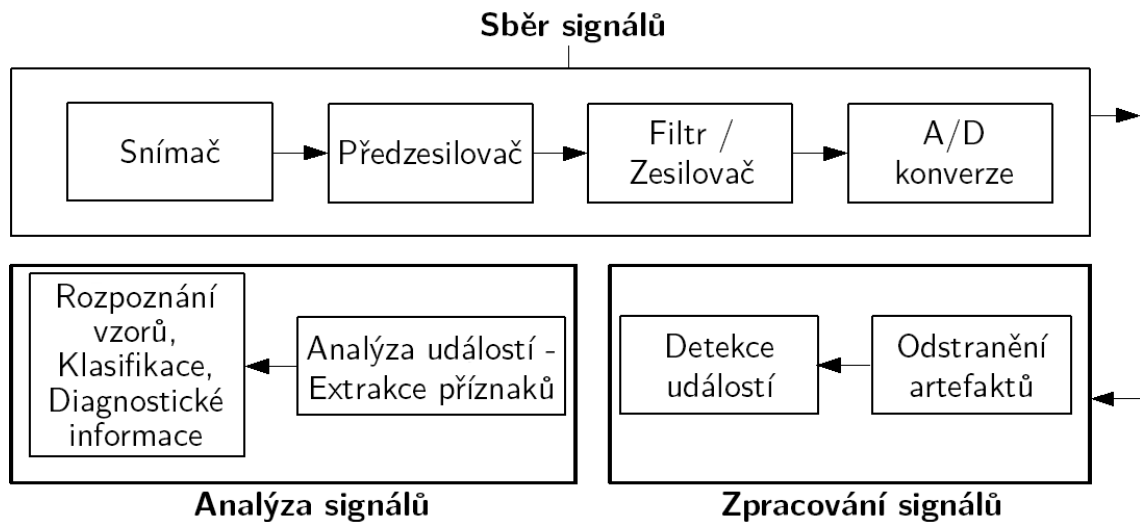
Další nově se objevující metodou měření dechové aktivity je používání nositelných zařízení, jako jsou chytré hodinky, které mohou detekovat změny dechových vzorců pomocí fotopletysmografie nebo akcelerometrie. Fotopletysmografie měří změny objemu krve pomocí světelných senzorů, zatímco akcelerometrie měří pohyb pomocí pohybových senzorů. Tyto metody jsou neinvazivní a lze je použít v přirozeném prostředí s tím, že mohou být omezené ve své přesnosti a preciznosti [150–156].

## 2.5.2 Postupy zpracování biosignálů

Zpracování biosignálů označuje techniky a postupy používané k získání informací z biosignálů ke zvýšení jejich kvality a k interpretaci jejich významu. V této sekci je uveden přehled hlavních postupů zpracování biosignálů, včetně jejich akvizice, předzpracování, extrakce příznaků a klasifikace.

V návaznosti na předchozí sekci, sběr signálu znamená tedy proces záznamu biosignálů z lidského těla pomocí měřicích zařízení, jako jsou senzory nebo elektrody. Kvalita zaznamenaných signálů závisí na různých faktorech, jako je typ a umístění snímačů, odstup signálu od šumu a vzorkovací frekvence. Například signály EKG se zaznamenávají pomocí elektrod a jejich umístění ovlivňuje kvalitu zaznamenaných signálů, protože různé oblasti srdce mohou mít různou sílu nebo frekvenci signálu. Kromě toho se odstup signálu od šumu týká poměru žádoucího signálu a nežádoucího šumu v zaznamenaných signálech. Čím vyšší je poměr signál/šum, tím jsou zaznamenané signály jasnější a spolehlivější. A konečně vzorkovací frekvence označuje frekvenci, s jakou jsou signály vzorkovány nebo digitalizovány. Čím vyšší je vzorkovací frekvence, tím přesnější je digitální reprezentace signálů [157, 158].

Předzpracování se týká postupů používaných k přípravě zaznamenaných signálů pro další analýzu. Mezi postupy předzpracování patří především filtrování signálu. Žádoucí je často navržení takového filtru, který rovnou koriguje kolísání nulové izoliny a potlačuje nežádoucí artefakty (síťový šum, svalové artefakty, apod.). V některých případech však nestačí pouze frekvenčně selektivní filtrace a volí se jiné přístupy.



**Obrázek 2.13:** Řetězec procesů od získání biomedicínského signálu po fázi analýzy (Přeloženo a převzato z [158])

Zvolený přístup závisí na zdroji a charakteru signálu. Porovnání metod předzpracování srdeční, elektrodermální a respirační aktivity bylo vypracováno v [157, 159–161].

Extrakce příznaků označuje postupy používané k extrakci relevantních informací nebo charakteristik z předzpracovaných signálů. Extrakce příznaků je důležitým krokem při zpracování biosignálů, protože snižuje dimenzionalitu signálů a zvýrazňuje relevantní informace. Z biosignálů lze extrahovat různé typy příznaků, například z časové, z frekvenční nebo nelineární oblasti [157, 158]. Krishnan a Athavale popsali trendy v extrakci příznaků biomedicínských signálů v [162].

Klasifikací se rozumí postupy používané k přiřazení značky (anotace) nebo kategorie biosignálu na základě jeho extrahovaných vlastností (příznaků). Klasifikace je dalším důležitým krokem při zpracování biosignálů, protože umožňuje identifikovat vzory nebo trendy v signálech a předpovídat fyziologický stav nebo kondici subjektu [157, 158]. Možnosti využití klasifikace (resp. metod strojového učení) pro biomedicínské aplikace byly popsány v [163–165].

Zpracování biosignálů se potýká s různými problémy a omezeními, jako je variabilita signálů, složitost postupů zpracování a interpretace výsledků. Variabilitou signálů je myšleno, že biosignály se mohou lišit od subjektu k subjektu, od sezení k sezení nebo dokonce v rámci jednoho sezení. Tato variabilita může ovlivnit kvalitu a spolehlivost zaznamenaných signálů a může vyžadovat použití sofistikovanějších metod předzpracování a klasifikace [157, 158].



## 2.6 Strojové učení

Strojové učení (anglicky Machine Learning, ML) představuje odvětví umělé inteligence, které se zaměřuje na vytváření matematických modelů a zvyšování jejich přesnosti predikce na základě předchozích zkušeností. Tyto zkušenosti se získávají retrospektivně z dostupných dat (trénovacích dat), která se využívají k formulaci pravidel a identifikaci charakteristických rysů nebo vztahů v datech. Proces učení zahrnuje techniky, které vyplývají z oborů informatiky, statistiky, pravděpodobnosti nebo optimalizace. Využití algoritmů strojového učení se neustále rozšiřuje v mnoha oblastech díky rostoucí dostupnosti online dat a snižování nákladů na výpočetní zdroje. Rozsah oblastí použití zahrnuje široké spektrum oborů, včetně zdravotnictví.

Tato kapitola slouží jako úvod do vybraných základních pojmů strojového učení s cílem vytvořit teoretický náhled pro podporu pochopení problematiky v korespondujících částech práce. Detailněji byly principy a náležitosti strojového učení již popsány v literatuře [166–168].

### 2.6.1 Typy systémů strojového učení

Různorodost scénářů strojového učení je charakterizována rozdíly v povaze trénovacích dat, způsobem trénování a kritérii hodnocení. Každý přístup je vhodný pro řešení určité kategorie problémů a představuje své vlastní charakteristické výhody a omezení. V následujících podkapitolách jsou rozebrány primárně dvě nejrozšířenější formy přístupů k učení, tj. učení s učitelem (anglicky Supervised Learning) a učení bez učitele (anglicky Unsupervised Learning).

#### 2.6.1.1 Učení s učitelem

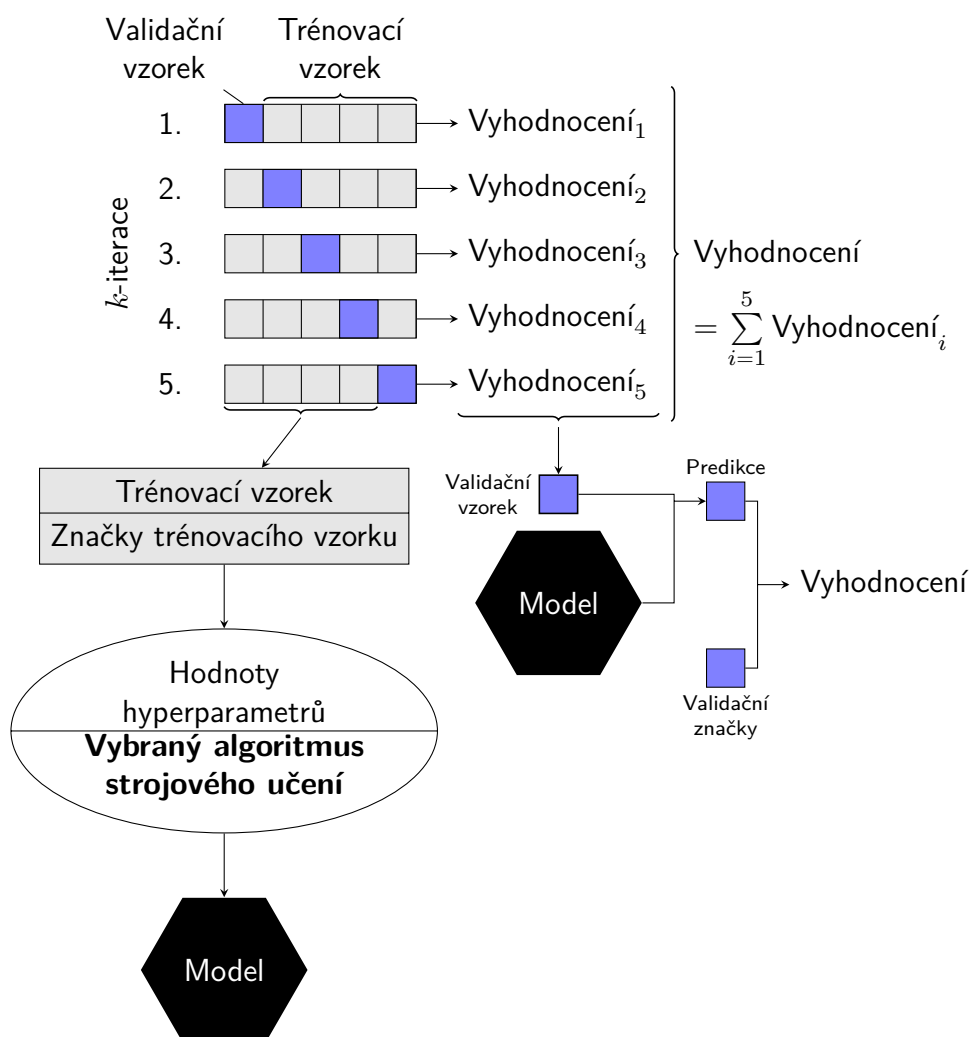
Učení s učitelem je typ strojového učení, během kterého se využívají právě taková trénovací data, která mají anotovanou výstupní proměnnou. Úkolem je zde aproximovat mapovací funkci  $h$ , která predikuje výstupní proměnnou na základě vstupní proměnné  $X$ . K aproximaci mapovací funkce jsou použita označená trénovací data, která se skládají z  $n$  párů vstupních a výstupních proměnných. Cílem je získat přesné predikce jak pro trénovací, tak pro úplně nová data. Formálně lze tedy tvrdit, že hledáme zobrazení:

$$h : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathcal{C} \quad (2.1)$$

tak, že pro každou novou dvojici vstupu a výstupu  $(x, y)$  vybranou z  $\mathcal{P}$  platí  $h(X) \approx y$ , kde  $\mathbb{R}^d$  je  $d$ -rozměrný příznakový prostor a  $\mathcal{C}$  je prostor všech možných tříd. Zároveň předpokládáme, že tyto dvojice pocházejí z neznámého rozdělení  $\mathcal{P}$  [167].

### 2.6.1.2 Učení bez učitele

Cílem učení bez učitele je najít vzory v neanotovaných datech bez definovaného výstupu. Výsledkem tohoto typu učení mohou být struktury nebo vztahy v datech. Vyhodnocování výkonu natrénovaného modelu je v tomto případě, bez označených dat, často náročné. Běžnou úlohou pro tento typ učení je shlukování, které seskupuje podobná data do shluků. Shlukování se používá například pro segmentaci obrazových dat a provádí se pomocí algoritmů, jako je hustotní prostorové shlukování (DBSCAN), k-means nebo hierarchické shlukování.



**Obrázek 2.14:** Obecné schéma procesu trénování modelu a optimalizací hyperparametrů s využitím k-násobné křížové validace [169]

### 2.6.2 Trénování a testování modelů

Vyhodnocování modelů strojového učení je pro jejich úspěšnost klíčové. Aby bylo zajištěno, že model dokáže efektivně predikovat i nová data, nikoli pouze data využitá během jeho trénování, provádí se tzv. *train-test* rozdělení. To zahrnuje ponechání

části dat jako testovací množiny, kterou model během trénování nepoužil, a její následné použití k vyhodnocení schopnosti modelu generalizace porovnáním jeho predikce se skutečnými hodnotami.

Běžně se využívá rozdělení trénovací a testovací množiny v poměru 80:20 z náhodně vybraných dat. Dále se někdy využívá validační množina (15-20 % trénovací množiny) pro účely ladění hyperparametrů. Nejúspěšnější model se na základě validační množiny natrénuje pomocí nalezených hyperparametrů. Nakonec se model vyhodnotí na dosud nevyužité testovací množině. Hyperparametry a jejich optimalizace jsou rozebrány v samostatné podkapitole 2.6.3.

### 2.6.2.1 Křížová validace

Přístup rozdělení dat z předchozí sekce je efektivní, ale opomíjí jeden problém: existuje mnoho možných kombinací trénovací a testovací sady a tato metoda zkoumá pouze jednu. Data mohla být tedy náhodně rozdělena nereprezentativním způsobem. Odpovědí na tento problém je křížová validace (anglicky cross-validation, CV), která eliminuje závislost na rozdělení dat. Cílem křížové validace je vyhodnotit a porovnat výkon různých modelů na stejném datovém souboru a najít tak optimální nastavení hyperparametrů pro daný model. Na Obr. 2.14 je znázorněno obecné schéma procesu trénování s využitím křížové validace.

Křížová validace se skládá ze tří hlavních kroků: rozdělení datového souboru na  $k$  částí, trénování modelu na  $k - 1$  částech dat a vyhodnocování výkonu modelu na zbývajících (validace) částí dat. Tyto kroky se opakují  $n$  krát, přičemž každá část dat se použije jednou jako validace. Výsledkem křížové validace je průměrný výkon modelu na všech  $k$  částech validace. Existuje celá řada způsobů provedení křížové validace: K-Fold, Leave One Out (LOO), Stratified Shuffle Split, Leave P Groups Out, a další, které byly již popsány v [166].

Křížová validace má řadu výhod oproti jiným metodám optimalizace hyperparametrů, jako je například mřížkové nebo náhodné vyhledávání popsané v dalších kapitolách. Mezi tyto výhody patří:

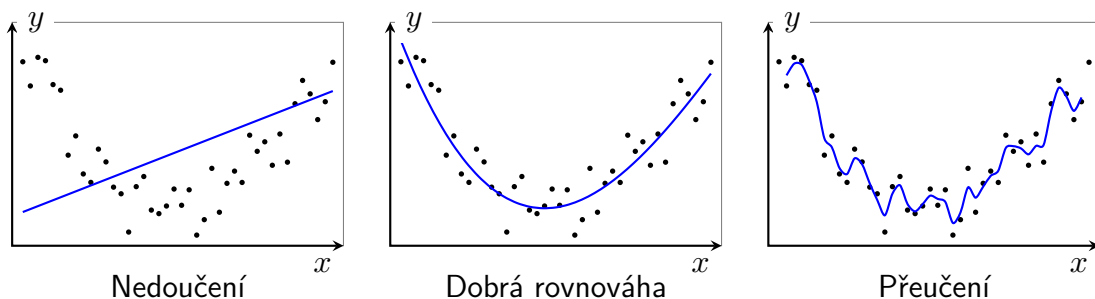
- Objektivní hodnocení výkonu modelu na stejných datech [170].
- Minimalizace rizika přeučení [171].
- Efektivní využití všech dat k hodnocení výkonu modelu [172].

V praxi se křížová validace často používá pro optimalizaci hyperparametrů nejen jednoho, ale i více modelů současně a následně porovnání jejich výkonu.

### 2.6.2.2 Přeučení a nedoučení

Přeučení (anglicky overfitting) a nedoučení (anglicky underfitting) jsou dva hlavní problémy, které se mohou vyskytnout při trénování modelů strojového učení. Tyto problémy ovlivňují schopnost modelu generalizovat na nová data, což způsobuje snížení jeho přesnosti.

K přeučení dochází, když model příliš pečlivě přizpůsobuje svůj výstup trénovacím datům a nezachycuje skutečné vztahy v datech. Vzniká tak velmi složitý model, což vede k vyššímu rozptylu a snížené vypovídací schopnosti. Přeučení je charakterizováno výrazným rozdílem mezi výkonností modelu na trénovací a testovací množině, známým jako generalizační mezera (anglicky Generalization Gap). Tento rozdíl je způsoben vysokou schopností modelu zapamatovat si specifické detaily trénovacích dat, místo aby zachycoval požadované vzorce [173].



**Obrázek 2.15:** Příklad nedoučeného modelu s vysokým biasem vlevo, přeučného modelu vysokým rozptylem vpravo a dobře přizpůsobeného modelu uprostřed [174]

Těmto problémům lze předcházet různými způsoby, například:

- použitím vhodných metod regularizace (např. L1 nebo L2 regularizace),
- použitím vhodného algoritmu strojového učení (např. kNN má tendenci k nedoučení, zatímco složité modely jako např. neuronové sítě k přeučení),
- použitím CV k hodnocení výkonu modelu a optimalizaci hyperparametrů,
- zvýšením počtu trénovacích dat.

### 2.6.3 Optimalizace hyperparametrů

Ve strojovém učení jsou hyperparametry (HP) nastaveny před trénováním a nejsou určeny učícím algoritmem. Tyto parametry musí být zadány jako vstupy a jejich určení může být stěžejním faktorem, protože různé problémy vyžadují různé přístupy. Proces hledání optimální konfigurace modelu se označuje jako optimalizace hyperparametrů (HPO).

Metoda vyhledávání v mřížce (anglicky Grid Search Method), je běžným způsobem optimalizace hyperparametrů. Definuje sadu diskrétních hodnot pro každý hyperparametr a pro každou kombinaci vyhodnocuje ztrátovou funkci modelu. Za optimální je považována konfigurace s nejnižší validační ztrátou. Počet vyhodnocení však rychle roste s počtem hyperparametrů, tudíž je tato metoda vhodná pouze pro jednoduché modely, u nichž není trénování a hodnocení výpočetně náročné [175].

Alternativou k mřížkovému vyhledávání je náhodné vyhledávání (anglicky Random Search Method). Namísto úplného vyhodnocení všech kombinací jako v předešlé metodě kontroluje pouze určitý počet náhodných vzorků z hyperparametrického prostoru. Metoda je efektivnější než prohledávání v mřížce, přičemž poskytuje srovnatelné výsledky [175–177]. Existují i další způsoby HPO mezi které se řadí například Bayesovská optimalizace, genetické algoritmy nebo využití neuronových sítí. Jejich využití přichází v úvahu zejména u více-dimenzionálních problémů [175, 178].

#### 2.6.4 Kombinování modelů

Kombinované modely (anglicky Ensemble Models) skládají předpovědi z více různých základních modelů, aby se zvýšila přesnost predikce. Toho lze dosáhnout zprůměrováním predikce u regrese nebo výběrem nejčastější predikce u klasifikace. Váhu předpovědi každého základního modelu lze upravovat na základě jeho individuální přesnosti. Klíčovým faktorem úspěchu kombinovaných modelů je různorodost a nezávislost základních modelů, které lze dosáhnout pomocí různých trénovacích dat, hyperparametrů nebo algoritmů. Ačkoli tomu tak není vždy, četné studie ukázaly, že kombinované modely často dosahují lepších výsledků než jednotlivé základní modely [179].

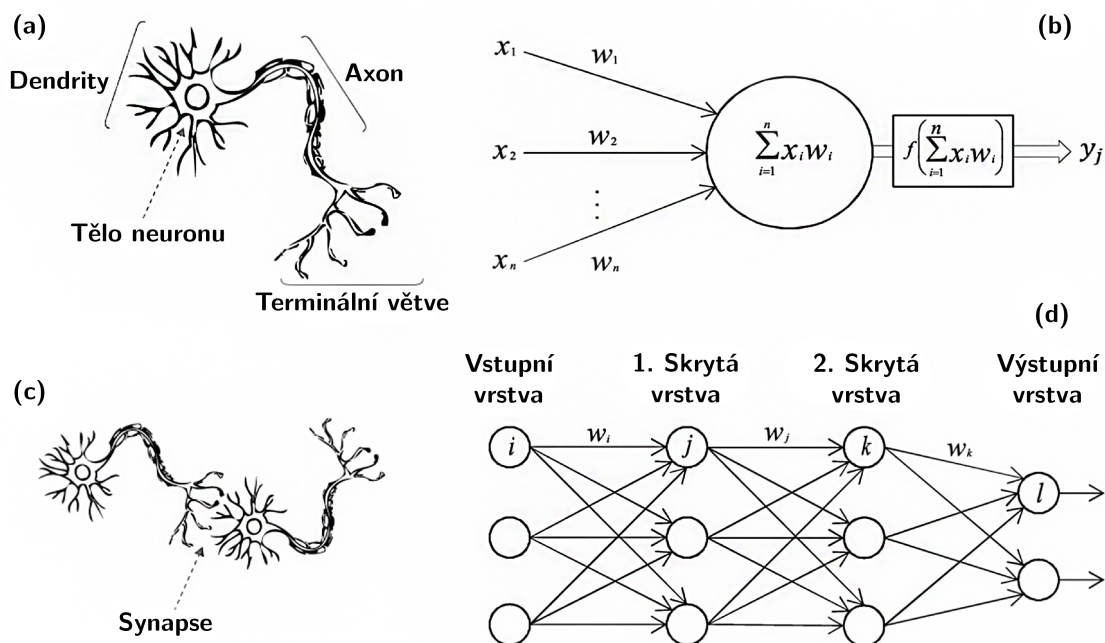
#### 2.6.5 Hodnocení modelů

K hodnocení modelu lze použít různé metriky v závislosti na dané úloze. Vyhodnocování natrénovaného modelu je klíčovým aspektem procesu strojového učení. Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá především úlohou klasifikace učení s učitelem, nebudou zde popsány všechny hodnotící metriky. Vybrané a použité metriky jsou blíže popsány v samotných metodách, v kapitole 4.7.5.

#### 2.6.6 Umělé neuronové sítě

Umělé neuronové sítě (anglicky Artificial Neural Networks, ANN) jsou významným nástrojem pro strojové učení a jsou často používány pro řešení složitých úloh, jako jsou klasifikace, regrese, segmentace obrazu a jazykové zpracování. Jedná se o výpočetní modely, které napodobují strukturu biologických neuronů. Stejně jako biologické neurony zpracovávají ANN vstupy, přenášejí impulsy a vytvářejí výstupy na základě

aktivačních funkcí. Učení probíhá upravováním ANN vah spojení mezi neurony pomocí optimalizačních algoritmů. Srovnání umělé neuronové sítě s biologickým neuronem je znázorněno na Obr. 2.16.



**Obrázek 2.16:** Biologický neuron ve srovnání s umělou neuronovou sítí: **(a)** lidský neuron; **(b)** umělý neuron; **(c)** biologická synapse; a **(d)** synapse ANN. (Upraveno a převzato z [180])

V průběhu let se ANN významně rozvinuly a byly použity k řešení široké škály úloh. Dnes hrají umělé neuronové sítě klíčovou roli v různých akademických i komerčních aplikacích při řešení problémů, které jiné metody nezvládají. Historie a základní koncepty ANN, mezi které patří například perceptrony nebo zpětná propagace a gradientní sestup byly již rozebrány v [166–168].

### 2.6.6.1 Ztrátová funkce

Začátkem této podkapitoly o strojovém učení (viz 2.6.1.1) byla definována funkce  $h$ , před jejímž hledáním je potřeba učinit předpoklad o jaký typ funkce se jedná (lineární, polynomická, aj.). Tímto předpokladem vzniká vymezení na určitý prostor hypotéz, označovaný  $\mathcal{H}$ , které velmi ovlivňuje generalizaci.

S vymezením přichází na řadu ztrátová funkce  $\mathcal{L} : \mathcal{H} \rightarrow \mathbb{R}$ , jež přiřazuje ztrátu každému  $h \in \mathcal{H}$ . Ztrátu si lze představit jako číslo, které vypovídá o tom, jak přesně je nalezená  $h$  aproximována vzhledem k použitým datům. Se ztrátovou funkcí tak vzniká nový optimalizační problém:

$$\arg \min_{h \in \mathcal{H}} \mathcal{L}(h) = \arg \min_{h \in \mathcal{H}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l(\mathbf{x}_i, y|h) \quad (2.2)$$

kde  $\mathcal{L}$  je ztráta pro danou  $h$  v rámci používaných dat a  $l$  je ztráta pro dvojici vstupu a výstupu při dané  $h$ . Díky takovému způsobu hodnocení je umožněno modelu se učit. Existuje řada ztrátových funkcí, jejichž použití závisí na typu problému (regrese, klasifikace, aj.). Tyto funkce společně s detailnějším popisem optimalizačního problému již byly popsány v [167].

### 2.6.6.2 Numerická optimalizace

Obecně je numerická optimalizace technika, která se používá k nalezení optimálního řešení výpočetně náročných problémů. Ve strojovém učení se numerická optimalizace často používá k optimalizaci parametrů modelu. V rámci ANN se k optimalizaci vah spojení mezi neurony běžně využívá gradientní sestup (GD) v různých podobách.

---

#### Algoritmus 1: Gradientní sestup

---

**Vstup:** váhy  $w_0$ , # iterací  $T$

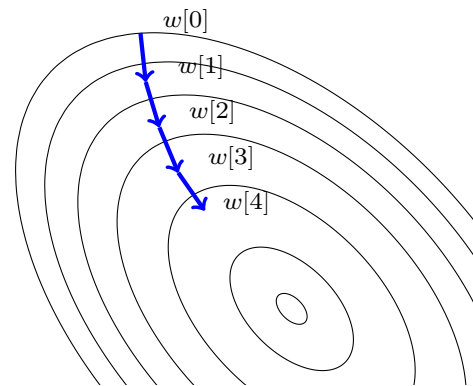
**Výstup:** konečné váhy  $w_T$

```

1 for  $t \in \{0, \dots, T - 1\}$  do
2   odhad  $\nabla \mathcal{L}(w_t)$ 
3   výpočet  $\Delta w_t = -\nabla \mathcal{L}(w_t)$ 
4   výběr rychlosti učení  $\gamma$ 
5    $w_{t+1} := w_t + \gamma \Delta w_t$ 
6 end
7 return  $w_T$ 

```

---



Obrázek 2.17: Postup GD [181]

Výše lze vidět obecný popis gradientního sestupu (Algoritmus 1). Jeho cílem je najít minimum funkce tím, že se postupně pohybuje v opačném směru gradientu funkce. Gradient je vektor, který ukazuje směr největšího nárůstu funkce. Při pohybu v opačném směru tohoto vektoru, nastává oblast s největší změnou funkce a lze tedy minimalizovat cílovou funkci. Postupné kroky v opačném směru gradientu funkce vedou k nalezení optimálního řešení. Na Obr. 2.17 je vizualizována přirozená aktualizace vah gradientního sestupu ve výstupním prostoru (pro náhodně inicializovanou síť). Jednotlivé vrstevnice znázorňují množiny úrovní hodnot ztrátové funkce podél vertikálního a horizontálního směru. Uprostřed vrstevnic se nachází minimum ztrátové funkce. Z algoritmu výše lze aktualizaci vah GD popsat následovně:

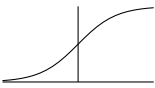
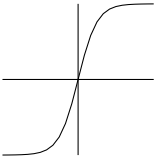

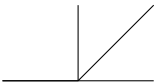
$$w_{t+1} = w_t - \gamma \nabla L(w_t) \quad (2.3)$$

kde  $w_t$  je aktuální hodnota vektoru vah v čase  $t$ ,  $\gamma$  je rychlost učení (anglicky Learning Rate) a  $\nabla \mathcal{L}(w_t)$  je gradient cílové funkce v čase  $t$ . Různé volby rychlosti učení  $\gamma$  a techniky odhadu pro  $\nabla \mathcal{L}(w)$  mohou vést k různým implementacím. Gradientní sestup má proto řadu variant, včetně stochastického gradientního sestupu a mini-batch gradientního sestupu, které se liší v způsobu, jakým jsou gradienty vypočítávány a aktualizovány. Tyto algoritmy již popsal Goodfellow et al. v [168].

### 2.6.6.3 Aktivační funkce

Aktivační funkce jsou jednou z nejdůležitějších součástí ANN. Tyto funkce zpracovávají vstupní signály a generují výstupy neuronů, které se dále šíří do dalších vrstev sítě. Musí také splňovat některé předpoklady, jako je diferencovatelnost. Aktivační funkce musí být také nelineární, aby se rozšířil rozsah mapovacích funkcí, které lze aproximovat. Existují různé aktivační funkce, které mají své výhody a nevýhody. Jejich výběr je podstatnou součástí procesu optimalizace hyperparametrů [168, 182].

**Tabulka 2.3:** Vybrané aktivační funkce [183]

Název	Funkce	Derivace	Obrázek
Sigmoid	$\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$	$f'(x) = f(x)(1 - f(x))^2$	
Softmax	$f(x) = \frac{e^x}{\sum_i e^x}$	$f'(x) = \frac{e^x}{\sum_i e^x} - \frac{(e^x)^2}{(\sum_i e^x)^2}$	
tanh	$\sigma(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	$f'(x) = 1 - f(x)^2$	
ReLU	$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ x & \text{if } x \geq 0. \end{cases}$	$f'(x) = \begin{cases} 0 & \text{if } x < 0 \\ 1 & \text{if } x \geq 0. \end{cases}$	

Logistická funkce, neboli sigmoida, je jednou z nejstarších aktivačních funkcí a má tvar S-křivky. Sigmoida má nelineární charakter, což umožňuje neuronové síti modelovat složité vztahy mezi vstupy a výstupy. Nicméně, sigmoida má některé nevýhody, mezi které patří tzv. „*vanishing gradient*“, kdy se gradient funkce blíží nule, což brání učení sítě. Tato funkce také může způsobit saturaci neuronů, což znamená, že se jejich výstupy blíží k hodnotě 0 nebo 1, a brání tak dalšímu učení [182].

Hyperbolická funkce tangens (tanh) je podobná sigmoidě, ale má symetrický tvar s rozsahem mezi -1 a 1. Tanh může být lepší volbou než sigmoida pro určité typy sítí, protože umožňuje výstupy neuronů, které jsou jak kladné, tak záporné [182].

Aktivační funkce ReLU (anglicky Rectified Linear Unit) vrací vstupní hodnotu, pokud je kladná, a nulu, pokud je záporná. Jedná se o velmi populární a efektivní funkci, která umožňuje rychlé učení sítí. Navíc, ReLU může snížit výskyt saturace neuronů a dříve zmíněného problému – „*vanishing gradient*“. Nicméně, tato funkce může mít problém s tzv. „*mrtvými neurony*“, kdy neuron má výstup vždy roven nule a stává se tak neaktivní [182, 184].

Leaky ReLU je modifikace ReLU, která řeší problém „*mrtvých neuronů*“ tím, že má nenulovou hodnotu pro záporné vstupy. Existuje řada dalších aktivačních funkcí,



jako je softmax, která se často používá jako aktivační funkce pro poslední vrstvu neuronové sítě a používá se v úlohách klasifikace [182].

#### 2.6.6.4 Regularizace

Z předešlých kapitol vyplývá, že jedním z hlavních cílů učení neuronové sítě je minimalizace chyby predikce. Často ale dochází k přeučení neuronové sítě, tedy síť se naučí velmi přesně předpovídat data použitá pro trénování, ale ztrácí schopnost generalizace. To je způsobeno tím, že síť se snaží přizpůsobit každému jednotlivému trénovacímu datovému bodu a následně nedokáže předpovídat data, která se od těch trénovacích liší. K tomuto jevu dochází, protože neuronová síť má příliš mnoho parametrů (viz 2.6.2.2). Řešením tohoto problému je použití regularizace. Regularizace je technika, která snižuje rozptyl modelu sítě, a snaží se tak minimalizovat riziko přeučení. Existuje několik technik regularizace, z nichž nejčastěji používanými jsou L1 a L2 regularizace, dropout a early stopping.

Metody regularizace L1 a L2 omezují optimalizační metody během procesu minimalizace ztrátové funkce modelu. Tato omezení penalizují váhy, což vede ke zjednodušení modelu. Při L1 regularizaci se k nákladové funkci přidává regularizační člen, který je součtem absolutních hodnot vah. Tento přístup způsobí, že některé příznaky jsou považovány za méně důležité a je jim přiřazena nulová váha, čímž se model účinně zjednoduší. Váhy byly dříve indexovány na základě neuronů a vrstev, které spojují. U L2 je zaveden regularizační člen za účelem minimalizace součtu čtverců vah. Tento přístup nevede k vynulování vah, ale snižuje je o faktor úměrný jejich velikosti během každé iterace gradientního sestupu [166, 168].

Dropout je metoda, která náhodně „vypne“ některé neurony v síti během trénování, což má za následek omezení relací mezi neurony a snížení rizika přeučení. Early stopping je technika, která sleduje vývoj chyby při trénování sítě na validačním datasetu a zastaví trénování, jakmile se chyba na validačním datasetu začne zvyšovat. Umožňuje tak včasné ukončení trénování a minimalizaci rizika přeučení [166, 168].

---

## Cíle práce

Cílem diplomové práce je vyhodnocení vlivu extrémního prostředí na projevy kognitivní zátěže v biosignálech analýzou dat získaných v průběhu simulované vesmírné mise, studující vliv izolace na člověka. Dále má být hodnocen vliv úloh navozujících zvýšenou kognitivní zátěž na elektrickou srdeční, dechovou a elektrodermální aktivitu společně s využitím časových, frekvenčních a nelineárních parametrů sledovaných signálů. Výsledky hodnocení se srovnají v rámci prostředí s vysokým a standardním atmosférickým tlakem. Pro účely práce je tedy nezbytný návrh a realizace metod pro hodnocení kognitivní zátěže.

---

## Metody

### 4.1 Mise DIANA

Tato diplomová práce těží z již druhé vesmírné analogové mise, která simulovala přistání na měsíci a uskutečnila se v rámci projektu Hydronaut v létě roku 2022. Jednotlivé kompartmenty mise měly následující role: řídicí věž byla stanoviště na Zemi, mateřská loď obíhala na oběžné dráze Měsíce a přistávací modul byl na povrchu Měsíce. Blíže jsou dílčí kompartmenty popsány v následujících sekcích.

Mise primárně sloužila pro zkoumání vlivu osobnostních charakteristik a vnějších faktorů na dynamiku týmu při dlouhodobém pobytu v ICE prostředí (projekt TAČR ÉTA č. TL05000228). Mise DIANA byla podpořena Evropskou kosmickou agenturou, vzhledem k jejímu potenciálu pro výcvik astronautů simulací extrémního prostředí.

#### 4.1.1 Projekt Hydronaut

Projekt Hydronaut začal jako podvodní komora, která se postupně proměnila v laboratoř s celým logistickým a vědeckým zařízením. Nyní slouží pro různorodé výzkumné účely, včetně zkoumání vlivu izolace a extrémního prostředí na psychiku člověka a testování technologií za extrémního tlaku.

#### 4.1.2 Výběr posádky

Výběr posádky pro misi DIANA začal s půlročním předstihem v podobě týmové a individuální diagnostiky posádky. Tato část byla primárně realizována psychologickým týmem Filozofické fakulty Univerzity Palackého v Olomouci. Byly využity neuropsychologické, dotazníkové a škálové metody, přičemž také proběhli motivační rozhovory na téma pobytu v ICE prostředí. Výsledky testů byly zároveň použity pro ladění všech psychologických nástrojů a aspektů pro samotnou misi včetně realizace mise samotné.

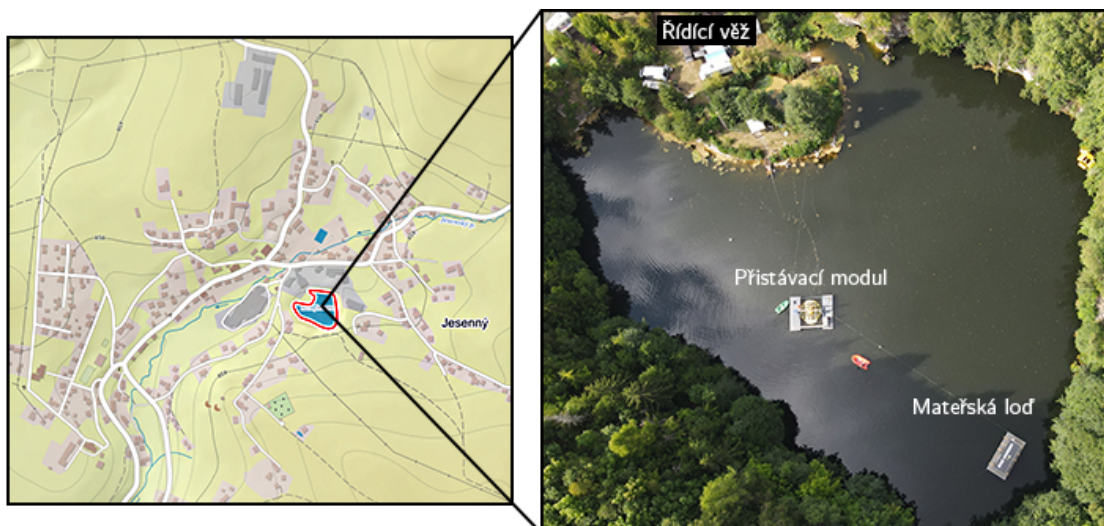
Při této příležitosti také proběhly i různorodé technické testy. Všechny výsledky byly důležité primárně pro přípravu detailního programu celé mise tak, aby co nejdůvěrohodněji simulovala pobyt v ICE prostředí, včetně minutového harmonogramu zaměřeného na technická, lékařská, psychologická a sociální hlediska pobytu. Harmonogram je dále popsán v sekci 4.1.6.1.

### 4.1.3 Posádka pro misi DIANA

Pro misi DIANA byla vybraná šestice členů posádky. Tři jedinci na plovoucí platformě (mateřská loď) a další tři pro podvodní stanici (přistávací modul). Vybraný vzorek se skládal z mužů ve věkovém rozmezí 25–58 let, kteří předem podstoupili vstupní lékařskou prohlídku. Výběr proběhl na základě preselektce popsané v předchozí sekci. Žádnému jedinci nebyla diagnostikována žádná kardiovaskulární onemocnění, ani jiné zdravotní problémy, které by mohly být stěžejní pro misi. V rámci posádky přistávacího modulu se jednalo o trénované potápěče vzhledem k saturačnímu pobytu pod hladinou.

### 4.1.4 Popis lokality a podmínky prostředí

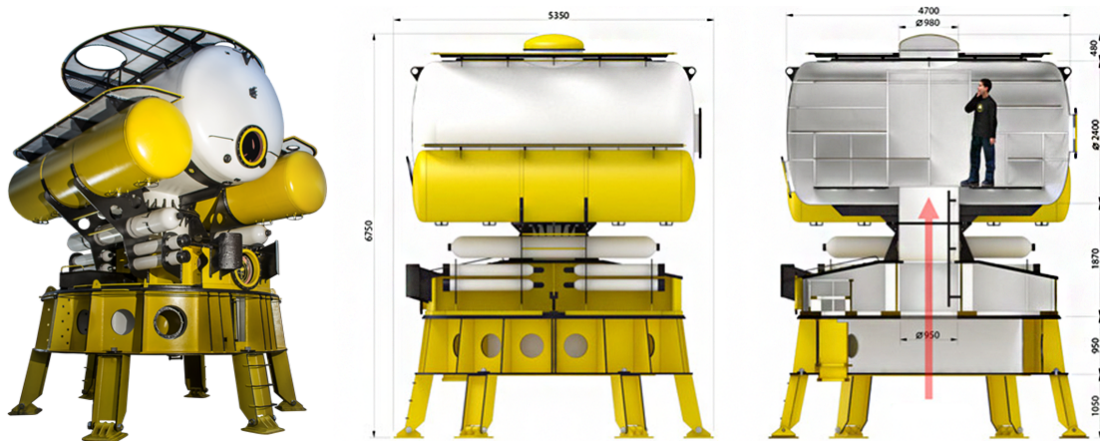
Stanice H03 DeepLab je lokalizována v lomu Jesenný. Obec Jesenný se nachází v okrese Semily (Liberecký kraj). Jedná se o zatopený vápencový lom s rozlohou 130x90 m a maximální hloubkou 13,5 m. Vzhledem k tomu, že mise probíhala pod vodní hladinou, tak nadále nebude uveden geologický kontext lokality. V průběhu celého experimentu byly příznivé podmínky počasí a nevyskytly se žádné extrémní události, které by misi ohrožovaly.



**Obrázek 4.1:** Detail a lokalita lomu v obci Jesenný (zdroj mapového podkladu: Mapy.cz)

### 4.1.5 Hlubinná laboratoř H03 DeepLab

Hydronaut H03 DeepLab je jedinečná výzkumná podvodní laboratoř pro výcvik posádek v ICE podmínkách. Stanice byla zřízena tak, aby umožnila dlouhodobý pobyt tří členů posádky pod vodní hladinou, přičemž její konstrukce kombinuje kesonový a ponorkový princip. Díky této unikátní laboratoři bylo tak umožněno vytvořit podmínky pro dlouhodobý výzkum a sledování vlivu tlaku, vlhkosti, stresu, umělého osvětlení a izolovaného prostředí na člověka, nebo použité materiály a vybavení. V rámci mise DIANA plnila stanice roli přistávacího modulu.



**Obrázek 4.2:** Hlubinná laboratoř H03 DeepLab a její schéma (zdroj: Hydronaut Project a.s.)

#### 4.1.5.1 Vybavení stanice

Po hardwarové stránce je stanice vybavena systémy pro monitorování stavu prostředí uvnitř habitatu a pro monitorování fyziologických funkcí jednotlivých členů posádky. Součástí je také systém pro přenos dat do řídicího stanoviště.

Pro potřeby komunikace nebo monitorování fyziologických dat je stanice vybavena i potřebným softwarem, který je integrován do škálovatelného palubního systému. Systém umožňuje vizualizaci, administraci a hodnocení měřených environmentálních a biomedicínských veličin (data prostředí, biomedicínská data) společně s obousměrnou komunikací se všemi zapojenými účastníky s možností volby různých komunikačních omezení (např. pro potřeby simulace výpadku komunikace). Vybrané dílčí části vybavení stanice jsou detailněji popsány v následujících sekcích.

#### 4.1.5.2 Řízení stanice a mise

Stanice H03 DeepLab má hlavní komunikační systém zvaný *Common Tongue*. Ten zajišťuje komunikaci mezi posádkou a podpůrným týmem a umožňuje živé sledování životních funkcí posádky a vnitřního prostředí. Pomocí tohoto systému byly subjektům experimentu zadávány úkoly. Jednotlivé úkoly byly sledovány za účelem vyhodnocení změn chování vlivem stresu na soustředění a výkonnost mozku.

### 4.1.5.3 Monitorování atmosféry habitatu

Jedním z důležitých východisek pobytu v habitatu jsou podmínky prostředí, které je nezbytné nepřetržitě a spolehlivě monitorovat. Jednou z těchto podmínek je atmosféra pro jejíž monitorování slouží systém založený na platformě slowRIO (slow remote IO controller) vyvinutý Fakultou strojní (FS ČVUT) na projektu Hydronaut. Systém monitoruje a poskytuje data prostředí – mikroklima: absolutní tlak, relativní vlhkost, teplota vzduchu a vody, čidlo  $O_2$ , čidlo  $CO_2$ , čidlo  $H_2$ , čidlo  $CH_4$ , intenzita osvětlení, barva osvětlení a další. Data jsou posílána do palubního počítače.

### 4.1.6 Infrastruktura mise

Povaha a náročnost stanovených cílů mise si vyžádaly komplexní infrastrukturu pro podporu celého výzkumného procesu. V této podsekcí je uveden stručný přehled některých součástí infrastruktury včetně harmonogramu mise.

#### 4.1.6.1 Harmonogram mise

Harmonogram byl základním dokumentem, který definoval všechny činnosti v průběhu mise. Harmonogram byl rozepsaný na úroveň minut pro každého jednotlivého člena posádky. Ukázkou harmonogramu lze vidět na Obr. 4.3.

	DATE	4. DEN - PONDĚLÍ															
	Hour of Mission	64				65				66				67			
	CET	8:00	8:15	8:30	8:45	9:00	9:15	9:30	9:45	10:00	10:15	10:30	10:45	11:00	11:15	11:30	11:45
<b>Vysvětlivky:</b>	<b>VĚŽ</b>																
EVA	hlídka								briefing	poslouchá							
hlídání																	
systémové aktivity	<b>MOTHER SHIP</b>																
zdravotní aktivity	MS commander	snídaně	FBMI	prohlídka	briefing	briefing	Velitel: NASA (EVA 1) + obed										
psychologický program	crewmember 2	snídaně	FBMI	rostliny	coord.	prohlídka	briefing	briefing						exchan	obed		
rostliny	crewmember 3	snídaně	FBMI	prohlídka	briefing	briefing								exchan	obed		
spánek																	
jídel	<b>LANDING MODULE</b>																
volno	LM commander	hygiena	snídaně	FBMI	prohlídka	briefing	příprava na EVA 2										
FBMI	crewmember 2	hygiena	snídaně	FBMI	rostliny	prohlídka	briefing							exchan			
	crewmember 3	hygiena	snídaně	FBMI	prohlídka	briefing								exchan			

Obrázek 4.3: Ukáзка části harmonogramu mise

Spolu s harmonogramem byly záznamy všech významných událostí a plán směn. Plán směn byl vytvořen interně pro každou instituci, jež byla součástí mise. Každá směna sloužila primárně za účelem monitorování a dokumentace mise.

#### 4.1.6.2 Řídící věž

Řídící věž hrála v rámci mise DIANA roli stanoviště na Zemi. Komunikovala tedy se základnou (mateřskou lodí) v souvislosti s prováděním výzkumných a vzdělávacích

programů. Zároveň zde bylo umístěno monitorovací zařízení posádky, které nepřetržitě sbíralo data a dokumentační a komunikační zařízení.



**Obrázek 4.4:** Monitorování posádky v řídicí věži během mise (zdroj: Hydronaut Project a.s.)

#### 4.1.6.3 Povrchová jednotka

Povrchová jednotka byla složena z vedoucího týmu (tři členové stejně jako v podvodním habitatu), který řídil polohu stanice a systémy podpory života. Zároveň se povrchová jednotka starala o regulaci specifických parametrů v závislosti na průběhu mise. Během mise DIANA hrála tato jednotka roli mateřské lodi, jež sloužila jako stanoviště a kritické zázemí pro velitele posádky. Z tohoto místa probíhalo ovládání stanice H03 DeepLab.

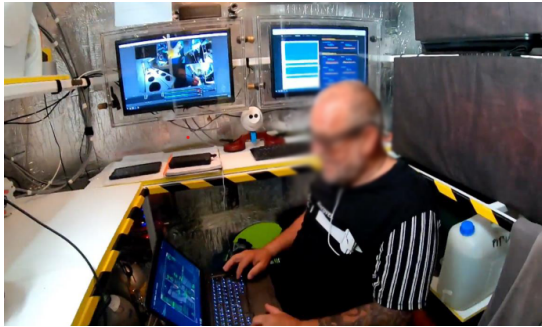
#### 4.1.7 Neuropsychofyziologická baterie

Neuropsychofyziologická stimulace a diagnostika jedinců byla během mise realizována prostřednictvím následujících nástrojů:

1. **Kognitivní úlohy v prostředí NEURO-III** — posádka opakovaně podstoupila náročné diagnostické kognitivní úlohy, zvláště zaměřené na sledování exekutivních funkcí primárně v oblasti impulzivního chování, riskování, interference nebo inhibice ve smyslu Go/No-go.
2. **Subjektivní hodnocení pomocí NASA TLX** — jedná se o dlouholetý standard pro měření subjektivního vnímání mentální zátěže vzhledem ke konkrétním úkolům v pěti dimenzích: mentální náročnost, fyzická náročnost, časová náročnost, výkonnost, snaha a frustrace. Posádka byla tímto hodnocena během celé mise každý den.

### 4.1.8 Monitorování a měření posádky

Během celého průběhu mise byla posádka neustále monitorována kamerovým systémem a měřena pomocí validovaných biometrických zařízení, které poskytovaly palubnímu počítači údaje o stavu posádky: tepová frekvence, dechová frekvence a kožní vodivost. Zároveň byly pomocí kamerových záznamů detekovány emoce posádky z výrazů tváře. Na Obr. 4.4 lze vidět snímky z monitorování posádky během mise DIANA.



(a) Snímek z monitorování v přistávacím modulu (interiér modulu)



(b) Noční snímek z monitorování posádky mateřské lodi

**Obrázek 4.5:** Snímky z monitorování posádky během mise (zdroj: Hydronaut Project a.s.)

Data z biometrických jednotek byla pomocí bezdrátové sítě WLAN (Wi-Fi 2,4 GHz) přenášena na datový server a ukládána do InfluxDB. Ostatní kompartmenty mise tak mohly živě sledovat fyziologický stav posádky. Díky real-time vizualizaci bylo také možné dohlížet na správnost měření biologických signálů. Předcházelo se tak situacím jako: nesprávně nalepené či odlepené elektrody, přítomnost elektromagnetického rušení ovlivňujícího měření nebo výpadky způsobené problémy s bezdrátovým připojením.

#### 4.1.8.1 InfluxDB

InfluxDB<sup>10</sup> je open-source platforma poskytující databázi pro časové řady. Zahrnuje databázové rozhraní (API). Součástí je i grafické uživatelské rozhraní (GUI) s modulárními uživatelskými panely pro monitorování dat v reálném čase. Platforma (InfluxDB OSS 2.4) byla využita v rámci mise k uchování a vizualizaci dat.

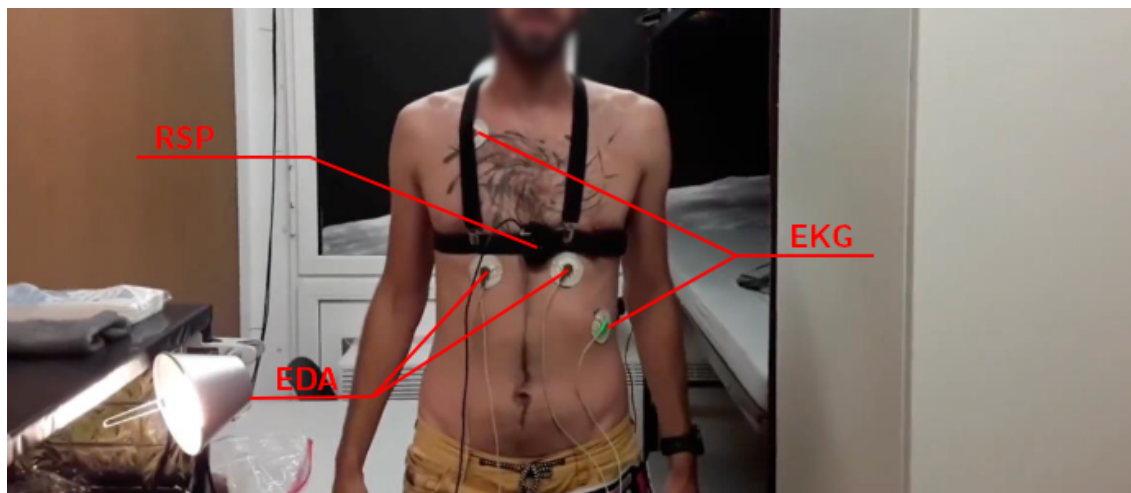
#### 4.1.8.2 Měření biosignálů

V minulé sekci byla zmínka o biometrických datech jako například tepová a dechová frekvence. Tato data byla získána pomocí biometrických jednotek, které však neměří přímo tyto fyziologické indikátory ale biologické signály. Měřenými biosignály jsou: srdeční, respirační a elektrodermální aktivita. Biosignály byly zaznamenávány u šesti

<sup>10</sup><https://www.influxdata.com>



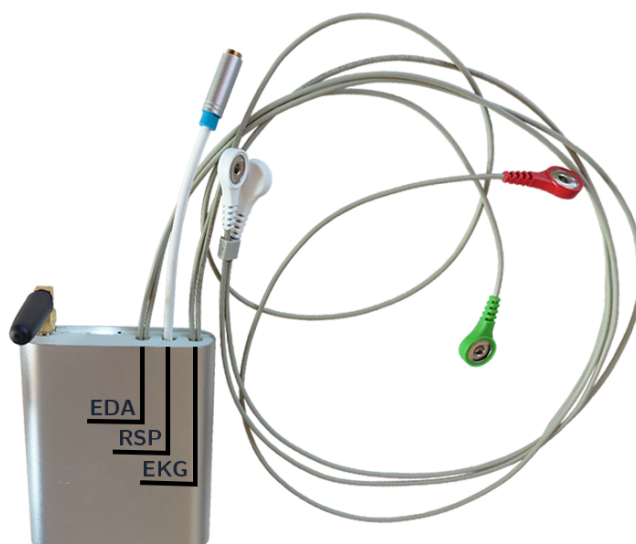
jedinců, konkrétně u posádky mateřské lodi a přistávacího modulu. V následující sekci je detailněji rozebráno měřicí zařízení.



**Obrázek 4.6:** Ukázka měřících čidel na těle člena posádky uvnitř mateřské lodi

#### 4.1.8.3 Měřicí zařízení

Pro měření biosignálu během simulované vesmírné mise byly použity validované telemedicínské jednotky BoRec (Body Recorder), které jsou dlouhodobě vyvíjené ve výzkumné skupině Biomechaniky a asistivních technologií na Fakultě biomedicínského inženýrství (FBMI), ČVUT v Praze. Vzorkovací frekvence zařízení je 250 Hz. Zařízení je možné vidět vidět na Obr. 4.7.



**Obrázek 4.7:** Telemedicínská jednotka BoRec použita během mise

Respirační aktivita byla měřena pomocí dechového pásu, který je založen na tenzometrickém principu. Elektrodermální aktivita byla měřena pomocí dvou elektrod

na hrudi. Toto místo bylo pro potřeby mise vybráno na základě studie [146]. Elektrická srdeční aktivita byla měřena využitím jednosvodového systému, přičemž byl svod zaznamenáván v konfiguraci II. Jednotka včetně snímačů biosignálů také obsahuje tlakové a gyroakcelometrické senzory.

Bezdrátové připojení jednotek je zajištěno využitím bezdrátové sítě WLAN. Komunikačním protokol mezi zařízením a klientem na straně počítače je Modbus TCP [185], který umožňuje přístup k sensorům jednotky a stažení dat z vyrovnávacích pamětí. Každá jednotka má svou vlastní jedinečnou MAC adresu a očekává adresu IP od serveru DHCP. Klient na PC má přístup ke všem snímačům sítě.

### 4.1.9 Studie

Měření dat probíhalo v rámci projektu pod Filozofickou fakultou Univerzity Palackého v Olomouci (FF UPOL). Všichni probandi poskytli informované souhlasy pro část diagnostickou i pro samotný experiment (viz Příloha A). Informované souhlasy umožňují anonymizované využití dat. Získání dat pod FF UPOL probíhalo podle etického metakodexu Evropské federace psychologických asociací (EFPA). Informované souhlasy jsou i ke všem nahrávkám obrazových dat a rozhovorů členů posádky. Bezpečí participantů bylo jistěno v několika technických rovinách prostřednictvím hlavního řešitele *1st Cloud Republic a.s.* projektu TL05000228.

## 4.2 Použité datasety

Pro účely diplomové práce bylo použito několik veřejně dostupných datasetů včetně dat z mise DIANA. V následujících sekcích jsou stručně rozebrány jednotlivé datasety, přičemž první dva sloužily primárně pro účely hodnocení kognitivní zátěže.

### 4.2.1 WESAD

Dataset WESAD [186] (*Wearable Stress and Affect Detection*) je multimodální dataset navržený pro výzkum v oblasti hodnocení stresu a emocí za použití nositelných senzorů. Tento dataset byl vytvořen s cílem přispět k vývoji pokročilých algoritmů strojového učení pro analýzu fyziologických signálů a rozpoznání emocí. WESAD obsahuje data získaná od 15 účastníků, přičemž každý z nich prošel sérií experimentů v laboratorních podmínkách.

Data byla v datasetu získána ze dvou nositelných zařízení. Prvním zařízením byl *RespiBAN*<sup>11</sup>, nositelný senzor umístěný na hrudi se vzorkovací frekvencí 700 Hz, který zaznamenával elektrokardiogram, elektrodermální aktivitu, elektromyogram, respirační signál a teplotu těla. Druhé zařízení byl chytrý náramek *Empatica E4*<sup>12</sup>,

<sup>11</sup>Zařízení *RespiBAN* již není vyráběno

<sup>12</sup><https://www.empatica.com/research/e4>

který zaznamenává krevní tlak (64 Hz), elektrodermální aktivitu (4 Hz), teplotu těla (4 Hz) a tříosou akceleraci (32 Hz). Experiment, který byl proveden pro sběr dat, zahrnoval celkem čtyři fáze:

1. **Základní úroveň (Baseline condition)** — účastník byl požádán, aby seděl/stál v klidu po dobu 20 minut.
2. **Stresový úkol (Stress condition)** — účastník musel pět minut přednášet před publikem a poté vyřešit matematický úkol, který byl navržen tak, aby vyvolal stres.
3. **Relaxační úkol (Amusement condition)** — účastník sledoval komediální video, které mělo vyvolat příjemné emoce.
4. **Řízená meditace (Meditation)** — účastník prováděl řízenou meditaci, jejíž cílem bylo navození do stavu blízkého neutrálnímu afektivnímu stavu.

WESAD poskytuje časově synchronizovaná, předpracovaná a anotovaná data z těchto nositelných senzorů. Pro účely diplomové práce byly použity signály ze zařízení *RespiBAN*, konkrétně srdeční, respirační a elektrodermální aktivita. Pro úlohy hodnocení kognitivní zátěže byla základní úroveň označena jako klidový stav a stresové úkoly byly označeny jako stav kognitivní zátěže.

### 4.2.2 CLAS

Dataset CLAS [187] (*Cognitive Load, Affect, and Stress Recognition*) je podobně jako WESAD multimodální dataset vytvořený pro výzkum v oblasti rozpoznávání kognitivní zátěže a emocí za použití nositelných senzorů a dalších datových zdrojů. Dataset zahrnuje data získaná od 62 účastníků, kteří byli vystaveni různým úkolům a podnětům navrženým tak, aby vyvolaly různé úrovně kognitivní zátěže a emocí. Mezi tyto podněty patřily například matematické úlohy nebo Stroopův test. Každý účastník byl zároveň měřen i v klidu (dataset stav označuje jako Baseline). Během přechodů mezi jednotlivými úkoly bylo účastníkům puštěno neutrální video nebo byl účastník požádán, aby vyplnil dotazník (dataset označuje jako Neutral).

Fyziologická data v rámci tohoto datasetu byla měřena zařízením *Shimmer3*<sup>13</sup> se vzorkovací frekvencí 256 Hz. Mezi měřené biologické signály patří elektrokardiogram, elektrodermální aktivita a fotopletysmogram. Pro úlohy hodnocení kognitivní zátěže byl Baseline stav označen jako klidový stav a stresové úkoly byly označeny jako stav kognitivní zátěže.

---

<sup>13</sup><https://shimmersensing.com>

### 4.2.3 Data z vesmírné analogové mise DIANA

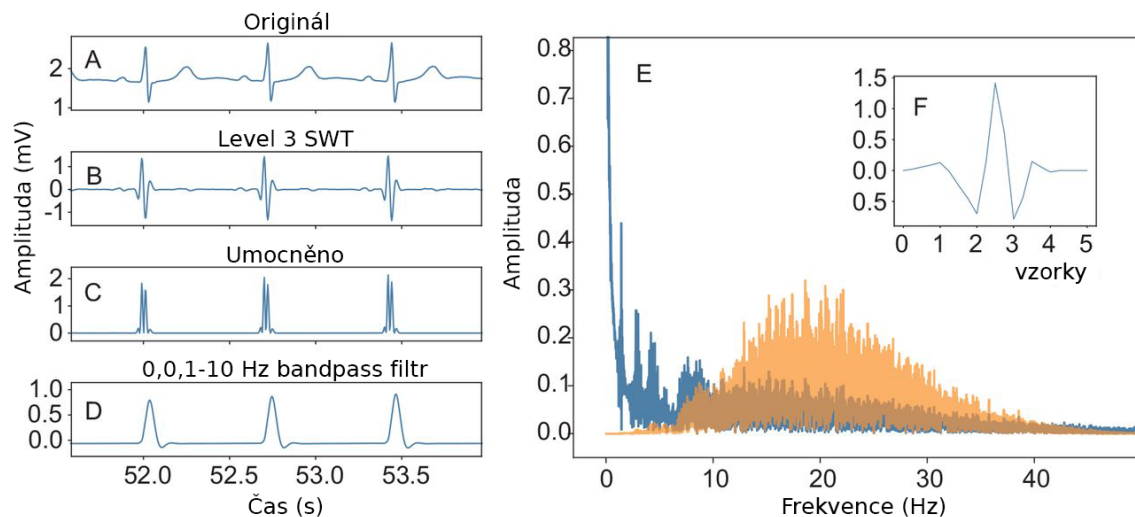
Pro potřeby diplomové práce poskytla FF UPOL data z vesmírné analogové mise DIANA. Součástí dat jsou osmidenní 24 hodinové záznamy biologických signálů, kamerových záznamů a anotace v podobě časů kognitivních úloh pro každého člena posádek. Využitými signály v této práci jsou elektrokardiogram spolu s elektrodermální a respirační aktivitou.

## 4.3 Zpracování biosignálů

Důležitým krokem při analýze biosignálů je jejich zpracování. V této sekci jsou popsány použité algoritmy, které byly implementovány v programovacím jazyce Python, využitím knihovny *Neurokit2* (viz sekce 4.3.3).

### 4.3.1 Zpracování elektrické srdeční aktivity

Pro zpracování EKG záznamů byla implementována metoda podle Kalidase a Tamila [188], která je založena na stacionární vlnkové transformaci (SWT). Metoda vychází z populárního Pan-Tompkinsova [189] algoritmu, nicméně pro odstranění šumu a zvýraznění QRS komplexů používá SWT namísto pásmové propusti. Stacionární vlnková transformace je metoda rozkladu signálu na jednotlivá frekvenční pásma pomocí mateřské vlnky [190]. Metoda byla zvolena na základě následující sekce 4.3.1.1.



**Obrázek 4.8:** A-D) Kroky zpracování EKG pro algoritmus podle Kalidase a Tamila [188] E) Frekvenční spektrum nefiltrovaného EKG se vzorkovací frekvencí 250 Hz (modrá) a EKG po SWT 3. řádu (oranžová). F) vlnka rodiny Daubechies 3. řádu. (Upraveno a převzato z [110])

V tomto algoritmu se stacionární vlnková transformace provádí na EKG signálu využitím vlnky rodiny Daubechies třetího řádu. Po provedení SWT se extrahují

koeficienty, které se následně umocní. Následně je využito filtrace pásmovou propustí (Butterworthův filtr) ke zvýšení citlivosti a přesnosti detekce. Postup detekce R vln na filtrovaném signálu je pak totožná s detekcí Pan-Tompkinsova algoritmu [189]. Jednotlivé části zpracování lze vidět na Obr. 4.8.

#### 4.3.1.1 Metodika výběru QRS detektoru

Vzhledem k tomu, že neexistuje žádný jednotný standard či systematický postup pro zpracování EKG a výběr „správného“ QRS detektoru pro určitou aplikaci, bylo v rámci této práce realizováno statistické porovnání populárních algoritmů. Měřítko přesnosti QRS detekce algoritmu vycházelo z výpočtu absolutní vzdálenosti od původní „skutečné“ polohy R vlny. Pro benchmarking detektorů byly použity následující anotované datasety:

**Tabulka 4.1:** Vybrané datasety pro benchmarking QRS detektorů z PhysioNetu [191]

Dataset	Probandi
MIT-BIH Arrhythmia Database [192]	48
MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database [193]	18
Glasgow University Database [194]	25
Fantasia Database [195]	40
Lobachevsky University Electrocardiography Database [196]	200
Simultaneous physiological measurements with five devices at different cognitive and physical loads [197]	13
Pulse Transit Time PPG Dataset [198]	22

Za účelem zjištění adaptability byly vybrány různorodé datasety algoritmu. Pro statistické zpracování bylo využito lineárních smíšených modelů (LMM). Použité statistické metody jsou podrobněji popsány v kapitole 4.7. Pro srovnání metod byl v programovacím jazyce R vytvořen následující statistický model:

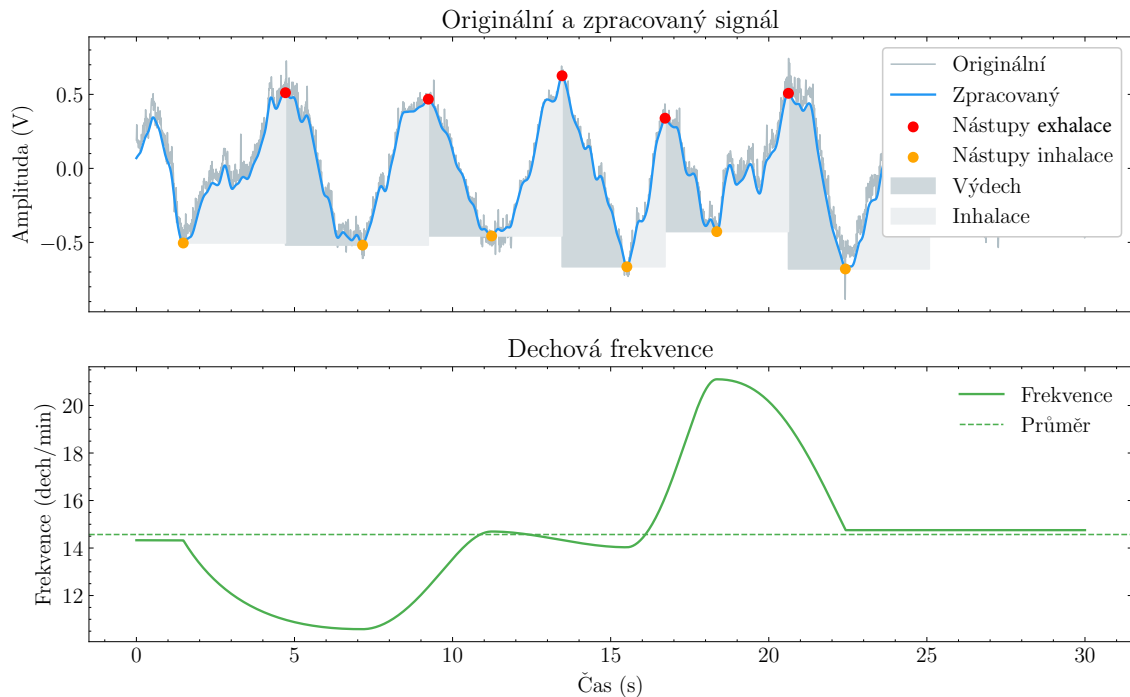
$$\text{Skóre} = \beta_0 + \beta_1 \text{Metoda} + u_{\text{Dataset}} + u_{\text{Participant}} + \epsilon \quad (4.1)$$

který specifikuje lineární smíšený model pomocí funkce `lmer` z balíku `lme4`<sup>14</sup>. Model byl použit k predikci závislé proměnné *Skóre* na fixním efektu *Metoda* a dvou náhodných efektech: *Dataset* a *Participant*. Dále problematice této sekce není věnována pozornost, jelikož není předmětem této práce.

<sup>14</sup><https://github.com/lme4/lme4>

### 4.3.2 Zpracování respirační aktivity

Pro zpracování respirační aktivity byl implementován algoritmus [159], který je založen na průchodech nulou (ZC, Zero-Crossing). Originální signál je nejdříve filtrován pásmovou propustí 0,05–3 Hz pro odstranění stejnosměrné složky a vyšších nežádoucích frekvencí tak, aby bylo možné spolehlivě detekovat ZC. Tím jsou zachovány dechové frekvence menší než tři a vyšší než 180 dechů za minutu. Následně jsou detekovány indexy náběžných a sestupných průchodů nulou, mezi kterými došlo k hledání lokálních extrémů.

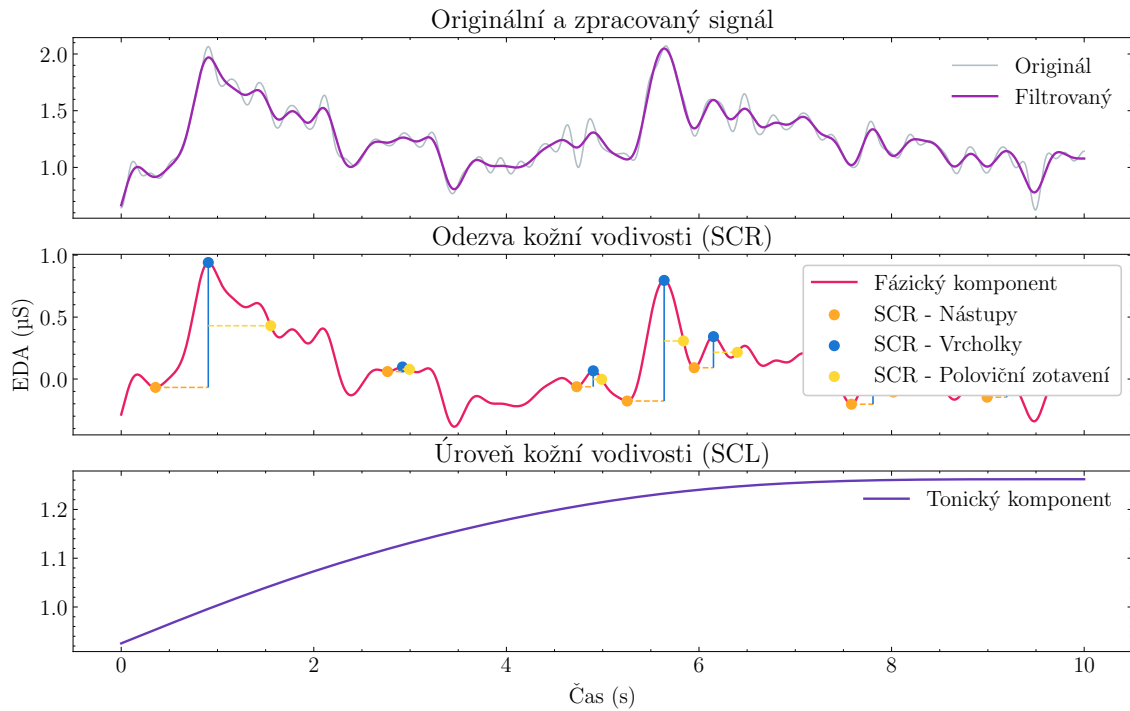


**Obrázek 4.9:** Příklad zpracování RSP pomocí implementované metody

Zachovány jsou ve výsledku pouze ty extrémy, které mají minimální vertikální vzdálenost od svého přímého souseda, tudíž kritérium pro detekci odlehlých hodnot bylo definováno v absolutním rozdílu amplitud mezi sousedními extrémy. V rámci dechové frekvence jsou mezi jednotlivými nádechy interpolována data využita monotónní kubické interpolace. Aplikace metody na reálném signálu lze vidět na Obrázku 4.9.

### 4.3.3 Zpracování elektrodermální aktivity

Zpracování elektrodermální aktivity vychází z metod [199] a [200]. Signál je nejdříve filtrován Butterworthovou horní propustí 4. řádu s mezní frekvencí 3 Hz. Následně je ze signálu extrahována fázická a tonická složka pomocí dolní a horní propusti o mezních frekvencích 0,05 Hz.



**Obrázek 4.10:** Příklad zpracování EDA pomocí implementovaných metod

Dále byl použit Savitzky-Golayův frekvenčně neselektivní filtr k dalšímu vyhlazení fázické složky za účelem hledání SCR vrcholků. K detekci vrcholků byla využita funkce `find_peaks()` z knihovny `Scipy`<sup>15</sup>. Kritérium pro detekci vrcholků bylo definováno jako monotónní nárůst o 0,5s následovaný stejným poklesem. Výsledek aplikované metody lze vidět na Obrázku 4.10.

## Neurokit

Knihovna *Neurokit2*, na jejíž vývoji se podílím<sup>16</sup>, poskytuje pokročilé metody pro zpracování a vizualizaci biosignálu. Jednotlivé metody zároveň nabízejí možnost si vybrat z mnoha implementovaných algoritmů. V této práci byla knihovna použita pro zpracování respirační, elektrodermální a elektrické srdeční aktivity včetně zpracování a výpočtu HRV parametrů.

## 4.4 Zpracování a analýza dat z mise DIANA

V následující sekci je popsána metodika zpracování a analýzy dat z vesmírné analogové mise DIANA. Data z mise byla poskytnuta v podobě komprimovaného záložního souboru obsahující snímek databáze InfluxDB (viz sekce 4.1.8.1). Tento snímek byl použit pro obnovu databáze, která obsahovala veškerá data s časovými značkami.

<sup>15</sup><https://docs.scipy.org>

<sup>16</sup><https://neuropsychology.github.io/NeuroKit/authors.html>

Pro export a práci s daty byla využita Python knihovna *InfluxDB-Python*<sup>17</sup>, jež poskytuje rozhraní mezi InfluxDB a programovacím jazykem Python.

#### 4.4.1 Zpracování exportovaných segmentů biosignálů

Pro každého člena posádky byly exportovány segmenty biosignálů o délce 30s s 50% překryvem na základě poznatků v [201–205]. Zpracování biosignálu vycházelo z metodiky popsané v sekci 4.3. U každého segmentu proběhlo hodnocení jeho kvality podle dvou kritérií:

- Hodnocení kvality EKG signálu pomocí heuristické fúze a fuzzy komplexního hodnocení podle [206].
- Hodnocení detekovaných R vln z hlediska časové kontroly náhlých nefyziologických změn v po sobě jdoucích R-R intervalech.

Segmenty, které vykazovali nežádoucí anomálie v rámci hodnotících kritérií, byly vyřazeny. Ze segmentů bylo dále vypočteno přes 100 různých parametrů pro účely analýzy dat. Mezi tyto parametry patřily například běžné statistické charakteristiky (průměr, medián, směrodatná odchylka a další), nelineární a časové HRV parametry. Dále byly identifikovány a označeny úseky v časech kognitivních testů. I přes dostupnost kamerových záznamů, z časových důvodů nebyly pro účely této práce ostatní aktivity během mise anotovány. Seznam všech počítaných parametrů je součástí přílohy v souboru `all_params.csv`.

#### 4.4.2 Čistění dat

Ze souborů vypočtených parametrů byly vynechány všechny parametry, jejichž sloupce obsahovali NaN hodnoty. Dále byly parametry korelovány a odstranily se ty, které byly vzájemně dokonale korelované ( $|r| > 0,999$ ). Poté se odstranily odlehle hodnoty na základě absolutní odchylky mediánu (MAD) od mediánu.

#### 4.4.3 Sledované veličiny

Pro účely analýzy NPF adaptace subjektů v průběhu mise byly na základě [207, 208] vybrány a sledovány především následující HRV parametry:

- **SD2** — Směrodatná odchylka Poincarého grafu podél přímky totožnosti.
- **RMSSD** — Odmocnina ze středního kvadratického rozdílu mezi po sobě následujícími N–N intervaly.

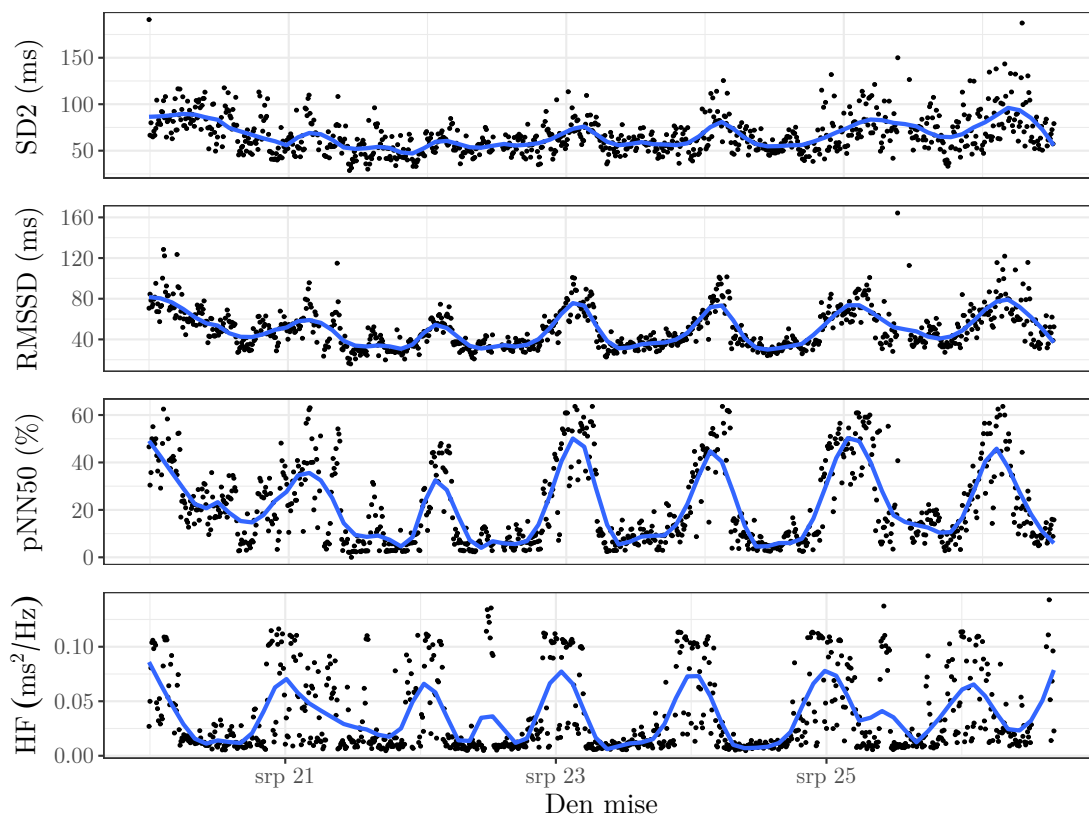
---

<sup>17</sup><https://github.com/influxdata/influxdb-python>



- **pNN50** — Procento po sobě následujících N–N intervalů, které se od sebe liší o více než 50 ms.
- **HF** — Vysokofrekvenční složka výkonu variability srdeční frekvence.

Průběhy jednotlivých sledovaných veličin během analogové vesmírné mise DIANA jsou vizualizovány na Obr. 4.11.



**Obrázek 4.11:** Příklad průběhu sledovaných veličin během mise. Jedná se o agregované hodnoty mediánem za každých 10 minut. Data jsou proložena využitím loess regrese ( $\alpha = 0,01$ ).

#### 4.4.4 Analýza dat mise

Vzhledem k nereprezentativnosti a nepopsanosti dat byly primárně pro potřeby jejich analýzy namísto statistických testů a dalších nástrojů použity zejména vizuální metody. Pro zobrazení denního vývoje v rámci sledovaných parametrů byly vypočtené parametry agregovány mediánem na úrovni hodin i dnů. Vizualizace byla v tomto případě spojena i s výsledky statistického modelování popsaného v následující sekci. Pro účely vizuální analýzy byly použity krabicové grafy.

Dále byly identifikovány, exportovány a vizualizovány segmenty biosignálů v časech, kdy subjekt vykonával NPF baterii testů. Segmenty byly vizualizovány využitím krabicových grafů. Výsledky v rámci vizuálních analýz se nacházejí v sekci 5.2 a dále jsou probírány v samotné diskuzi.

### 4.4.5 Statistické modelování

Ke zkoumání vztahu mezi vybraným sledovaným parametrem napříč jednotlivými dny v rámci obou skupin, mateřské lodi a přistávacího modulu, byl vytvořen víceúrovňový lineární smíšený model. Necht  $Y$  je vektor odezvy (tj. „vybraný sledovaný parametr“). Po zahrnutí interakce dnů a skupin lze lineární smíšený model zjednodušeně a vektorově vyjádřit následovně:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 s + \beta_3 ds + u_0 + u_1 d + \epsilon, \quad \epsilon \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2) \quad (4.2)$$

kde  $\beta_i$  jsou vektory koeficientů fixních efektů,  $\epsilon$  je člen reziduální chyby a  $d, s$  označují fixní efekty den a skupinu. Náhodné efekty jsou označeny jako  $u_0, u_1$ . Dále je přítomna zmíněna interakce v podobě zahrnutí interakčního členu  $d \cdot s$ . To znamená, že kromě samostatného modelování vlivu „dne“ a „skupiny“ model zohledňuje také případnou interakci mezi nimi. Jinými slovy, model počítá s možností, že vliv „dne“ na proměnnou odezvy (závislou proměnnou) se může lišit v závislosti na úrovni „skupiny“. Zároveň díky zvoleným náhodným efektům je v rámci dnů dovoleno individuálním rozdílům na úrovni subjektů. V případě všech navržených modelů byla také analyzována i jejich síla. Jelikož bývá obtížné přesně určit sílu smíšeného modelu pomocí tradičních statistických metod, byla zvolena simulace, která je často účinnějším a preferovanějším přístupem [209]. Konkrétně byla zvolena Monte Carlo simulace pro svou flexibilitu a přesnost [210, 211]. Simulace je součástí přílohy v podobě skriptu s názvem `MC_Simulation.R`.

Výsledky modelování jsou uvedeny v sekci 5.2.2 a rozebrány v diskuzi. Modelování bylo realizováno v programovém jazyce R. Vzhledem k tomu, že se lineární smíšené modely řadí mezi statistické metody, tak jsou samostatně popsány v sekci 4.7.

## 4.5 Explorační analýza a předzpracování datasetů

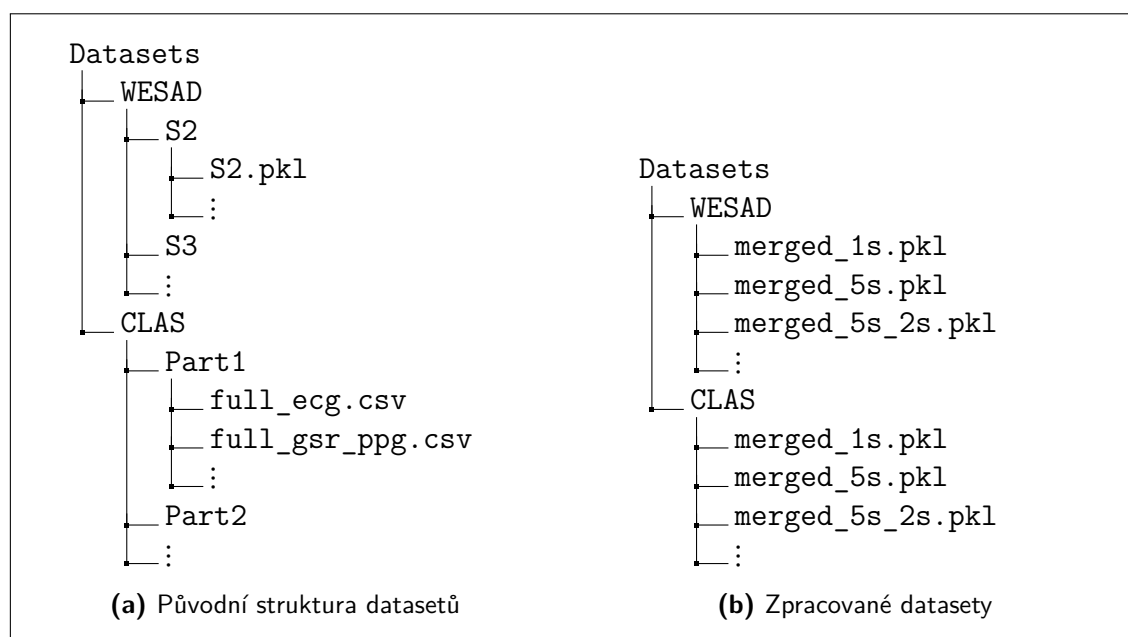
V této sekci je rozebrán proces zpracování a zkoumání souborů dat (CLAS a WESAD), jehož cílem bylo identifikovat vzorce, vztahy a trendy, které nemusí být okamžitě zřejmé. Cílem explorační analýzy bylo získat poznatky a vytvořit hypotézy o datech, které napomáhaly při tvorbě paradigmatu hodnocení CL.

### 4.5.1 Předzpracování datasetů

Z datasetů byly extrahovány potřebné biosignály, které byly následně zpracovány a normalizovány na úrovni subjektů. Metodika zpracování vychází ze sekce 4.3. Normalizace byla provedena škálováním biosignálů tak, aby měly průměrnou hodnotu nula a směrodatnou odchylku jedna. To bylo dosaženo odečtením střední hodnoty biosignálu od každé jeho hodnoty a následným vydělením směrodatnou odchylkou.

Vzhledem k tomu, že dataset CLAS neobsahuje respirační signál, byl tento signál vytvořen pomocí metody EDR (ECG-Derived Respiration). Jedná se o extrakci informace o dýchání z elektrokardiogramu. Knihovna *Neurokit2* poskytuje implementaci algoritmu podle [212], jež byla pro tyto účely použita.

Následně byly všechny biosignály segmentovány na 5s, 5s s 50% překryvem a 1s úseky. Z těchto segmentů byly poté vytvořeny příznaky pro účely strojového učení. Blíže je tvorba těchto příznaků a jejich využití popsáno v sekci 4.6. Byly ponechány pouze ty segmenty, které svojí třídou korespondovaly žádanému kognitivnímu stavu. Na Obr. 4.12 lze vidět strukturu datasetů před a po zpracování.



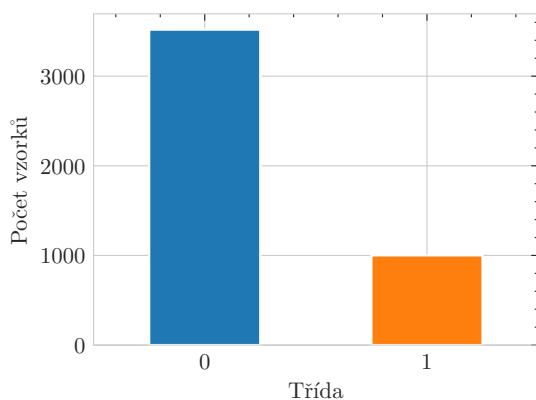
**Obrázek 4.12:** Porovnání struktury původních a zpracovaných datasetů

## 4.5.2 Explorace dat

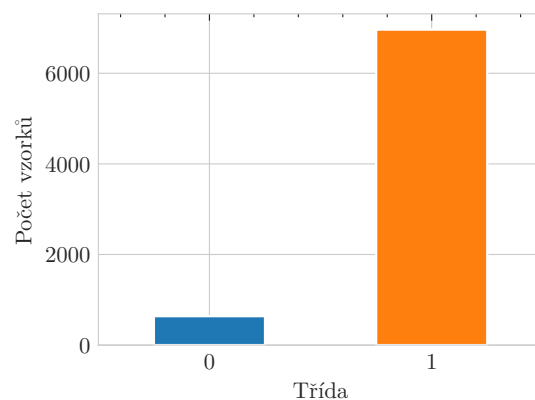
Oba datasety byly po předzpracování zkoumány pomocí nástrojů knihovny *Pandas* v programovacím jazyce Python. Datasety tak byly popsány například základními statistickými údaji, kde byla brána primárně zřetel na rozdělení tříd. Na Obr. 4.13 lze tak vidět, že oba datasety vykazují výraznou nevyváženost tříd. Dále byly korelovány jednotlivé signály datasetů, bylo nahlíženo na jejich distribuce a byly vyšetřeny případné záporné nebo neplatné hodnoty. Tato šetření byla provedena i na individuální úrovni subjektů. Celý postup s vizualizovanými výsledky se nachází v datové příloze v podobě Jupyter Notebooku<sup>18</sup> s názvem souboru `exploratory_analysis_example.ipynb`.

<sup>18</sup><https://jupyter.org>

Jupyter Notebook je interaktivního prostředí, které umožňuje vytvářet a sdílet dokumenty (zápisníky). Tyto dokumenty jsou rozděleny do buněk, které lze spouštět v libovolném pořadí (live kód), což zajišťuje efektivnější prototypování.



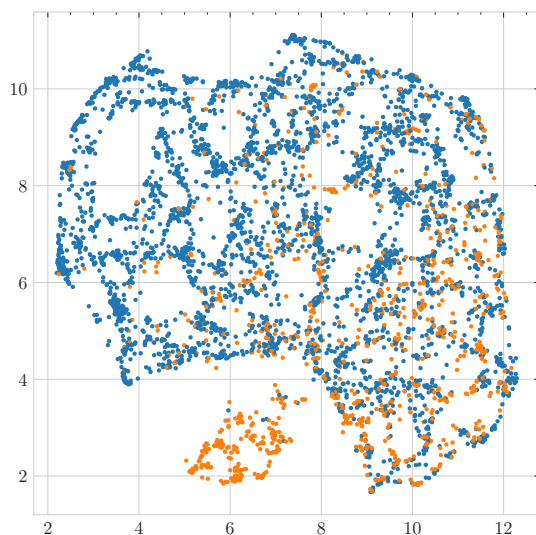
(a) Rozdělení datasetu WESAD



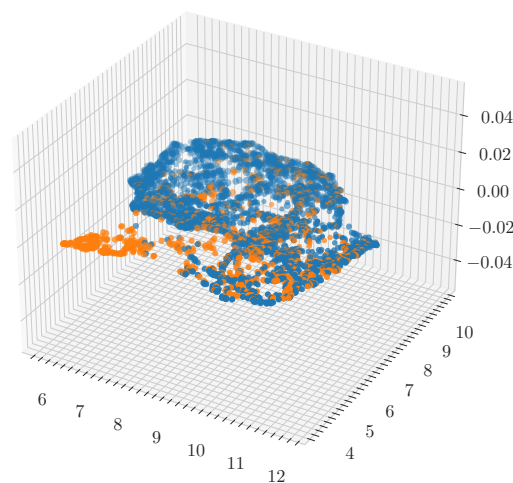
(b) Rozdělení datasetu CLAS

**Obrázek 4.13:** Srovnání rozdělení tříd vybraných datasetů. Třída 0 vyjadřuje klidový stav a třída 1 vyjadřuje kognitivní zátěž

Během explorační analýzy dat byla zkoumána separovatelnost dat v nízkodimenzionálních prostorech použitím techniky UMAP [213] (Uniform Manifold Approximation and Projection) pro redukci dimenzionality. Cílem bylo vizualizovat soubor dat ve formě nižších dimenzí k získání přehledu o rozdělení tříd a nadhled nad smyslem a rozpořádáním dat. Výsledky této vizualizace je možné vidět na Obr. 4.14, kde jsou oranžově vyznačeny body, jež odpovídají kognitivní zátěži.



(a) WESAD



(b) CLAS

**Obrázek 4.14:** Vizualizace UMAP projekcí extrahovaných příznaků z datasetu WESAD do 2D (vlevo) a 3D latentního prostoru (vpravo). Oranžově třída 1 a modře třída 0

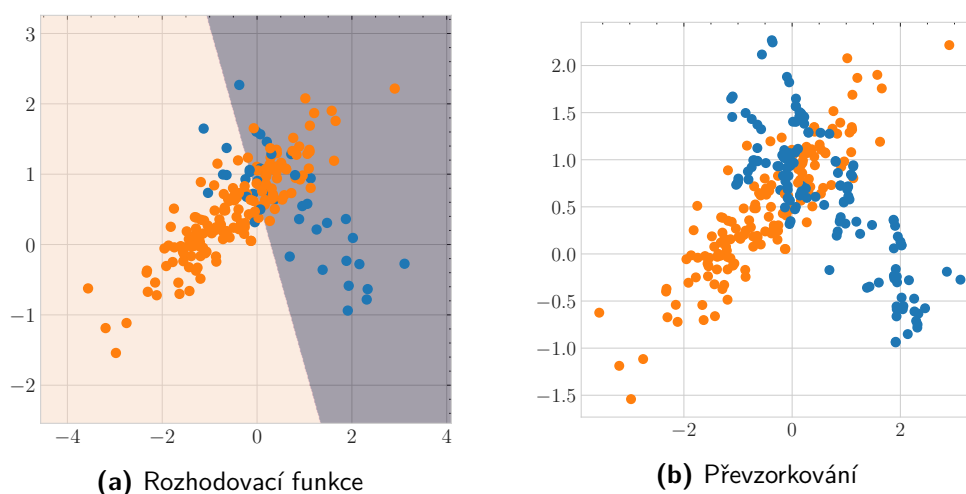
V metodě bylo využito Euklidovské vzdálenostní metriky s hodnotou 0,1 a počtem sousedních bodů 15. Tyto nízké hodnoty byly zvoleny pro účely zachycení

lokální struktury dat (na úkor celkového obrazu), jak ukazuje Obr. 4.14. Výsledek 3D projekcí naznačuje potencionální lineární separovatelnost pouze u malé části souboru. U zbytku souboru by bylo oddělení pravděpodobně zřetelnější ve vyšších dimenzích. V úvahu tak přichází strojové učení.

### 4.5.3 Augmentace dat využitím SMOTE-Tomek

Vzhledem k nevyváženosti tříd byla zvolena augmentace dat pomocí techniky SMOTE-Tomek [214]. Jedná se o hybridní metodu vzorkování, která kombinuje SMOTE [215] (Synthetic Minority Oversampling Technique) a algoritmus *Tomek Links*.

SMOTE je běžně používaná technika pro generování syntetických vzorků minoritní třídy vytvářením nových instancí, které jsou podobné existujícím instancím minoritní třídy. Metoda funguje tak, že vybere instanci minoritní třídy a najde  $k$  jejích nejbližších sousedů v prostoru příznaků. Poté generuje nové syntetické instance interpolací mezi vybranou instancí a jejími  $k$  sousedy.



**Obrázek 4.15:** Ukázka převzorkování metodou SMOTE-Tomek

Metoda SMOTE-Tomek kombinuje algoritmy SMOTE a Tomek Links. Nejprve dojde k nadvzorkování menšinové třídy pomocí SMOTE a poté k podvzorkování většinové třídy odstraněním takzvaných „*Tomek Links*“. Necht  $\|x_i - x_j\|$  označuje euklidovskou vzdálenost mezi  $x_i$  a  $x_j$ , kde  $x_i$  označuje vzorek, který patří do menšinové třídy, a  $x_j$  označuje vzorek, který patří do většinové třídy. Pokud žádný vzorek  $x_k$  nesplňuje následující podmínku:

$$\|x_i - x_k\| < \|x_i - x_j\| \vee \|x_j - x_k\| < \|x_i - x_j\| \quad (4.3)$$

pak dvojice  $(x_i, x_j)$  je „*Tomek Link*“. Metoda byla implementována v programovacím jazyce Python využitím knihovny *imbalanced-learn*<sup>19</sup>. Výsledné augmentované soubory dat se poté použily k tréninku klasifikačních modelů.

<sup>19</sup><https://imbalanced-learn.org>

## 4.6 Hodnocení CL využitím vícerozměrných časoprostorových kauzálních vzorů

V této podkapitole je popsán postup návrhu a realizace multimodálního přístupu pro hodnocení kognitivní zátěže pomocí periferních biosignálů, konkrétně využitím elektrické srdeční, respirační a elektrodermální aktivity, které bylo vytvořeno v rámci diplomové práce. První část se věnuje primárně tvorbě fyziologických příznaků. Druhá část podkapitoly popisuje kapsulární neuronovou síť, jejíž vstupem jsou právě vytvořené fyziologické příznaky.

### 4.6.1 Formulace problému

V předešlé sekci byl popsán proces předzpracování dat, jehož výsledkem je nová multidimenzionální množina segmentovaných fyziologických signálů  $\mathcal{F}$ . Dimenze této množiny je rovna počtu snímaných signálů, lze tedy dále hovořit jako o kanálech  $c$ . Vybraný segment z kanálu  $c$  reprezentuje časovou řadu, jejíž každý vzorek je zachycen v určitém čase  $t$  a představuje průběh fyziologické události (NPF událost).

V rámci jednotlivých pozorovaných fyziologických událostí  $X^i$  lze modelovat časově kauzální vztahy, které lze díky Grangerově kauzalitě (viz sekce 4.7.2) matematicky popsat unikátním orientovaným grafem  $G = (V, E)$  – definovanou uspořádanou množinou vrcholů a hran. Tím je umožněno temporální kódování specifického příčinného kognitivního stavu pro konkrétní segment vybraného kanálu  $c$ . Nelze však předpokládat, že je tak zachycena veškerá komplexní dynamika, která je ve biosignálech přítomna, včetně toho, že nemusí být plně zachyceny interakce napříč kanály  $c$ .

Tento problém je kompenzován použitím vícerozměrných časoprostorových vzorů (GAF, Gramian Angular Fields) odvozených z Gramových matic. Tyto vzory zachycují určitý druh temporální i prostorové korelace v rámci fyziologických událostí. V následujících sekcích je dále popsána tvorba zmíněných příznaků společně s jejich aplikací v rámci strojového učení.

### 4.6.2 Tvorba kauzálních vícerozměrných matic

Pro zachycení časově kauzálních relací v použitých biosignálech byl zvolen přístup Kopula-Granger s Lasso ( $\ell_1$ ) regularizací, který kombinuje koncept Grangerovy kauzality s teorií kopulí. Zmíněné přístupy spadají do oblasti statistických metod, a proto jsou dále jednotlivě popsány v sekci 4.7.

Vytvoření kauzální matice je založeno na použití fyziologické události  $X^i$  definované v minulé sekci, ze které lze uplatněním Kopula-Granger metody získat robustní odhad koeficientů vektorů  $\beta_i$  pro test Grangerovy kauzality využitím regresní

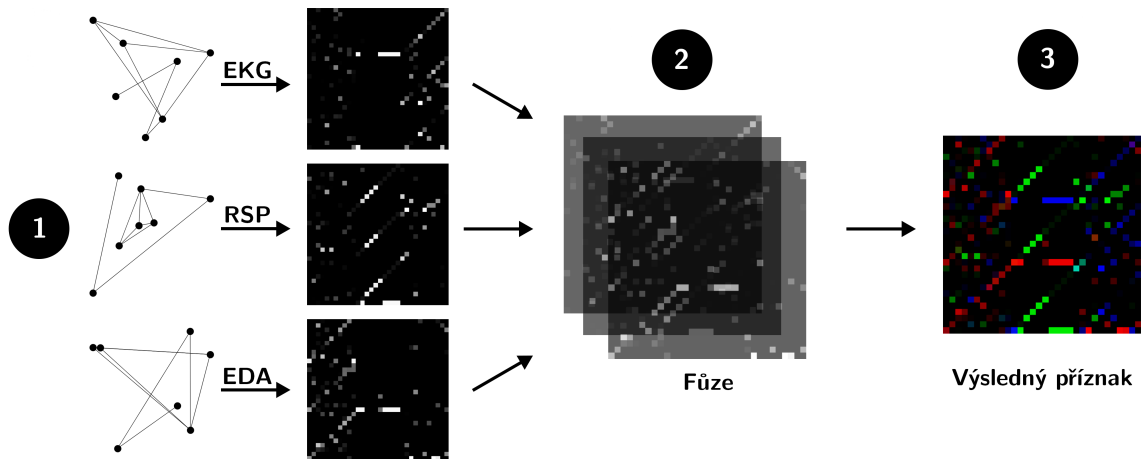
úlohy. K tomu je ale potřeba vyřešit následující optimalizační problém [216, 217]:

$$\min_{\beta_i} \sum_{l=L+1}^T \left| X_t^i - \sum_{j=1}^p (X_{t,\text{lag}}^j) \cdot (\beta_i^j)' \right|^2 + \lambda \|\beta_i\|_1, \quad (4.4)$$

kde  $\lambda$  je penalizační parametr ovlivňující řídkost vektoru  $\beta_i$ ,  $L$  je maximální časové zpoždění (lag) a  $X_{t,\text{lag}}^j$  jsou předchozí hodnoty řady  $X^j$  v čase  $[t-L, t-1]$ . Podle definice Kopula-Granger modelu [216, 217] lze dále uplatnit faktorizaci na základě modelu vektorové autoregrese (VAR) s koeficienty  $B = \beta_i^j$  následovně:

$$p_Z(z) = \mathcal{N}(z(1, \dots, L)) \times \prod_{j=1}^n \prod_{t=L+1}^T p_{\mathcal{N}} \left( z_j(t); \sum_{t=1}^n \beta_{i,j}^T z_i^{t,\text{lag}}, \sigma_j \right) \quad (4.5)$$

kde  $p_{\mathcal{N}}(z; \mu, \sigma)$  je Gaussova funkce se střední hodnotou  $\mu$  a rozptylem  $\sigma^2$ ,  $z_i^{t,\text{lag}}$  jsou předchozí hodnoty  $z_i$  do času  $t$  a  $\beta_i^j$  je vektor koeficientů modelujících vliv časové řady  $z_j$  na cílovou časovou řadu. Kauzalita je tedy definována časovou řadou  $z_j$ , jež je příčinou  $z_i$ , pokud je alespoň jedna hodnota vektoru  $\beta_i^j$  nenulová ve smyslu statistické významnosti (viz 4.7.2).



**Obrázek 4.16:** Diagram tvorby kauzálních vícerozměrných matic. 1) Aplikace Kopula-Granger metody pro vybraný segment všech kanálů  $c$ . 2) Kombinace výsledných kauzálních matic do jednoho trojrozměrného pole. 3) Výsledný příznak ve smyslu RGB obrázku

Kopula-Granger metodu lze primárně shrnout do dvou kroků: odhadnutí marginální distribuční funkce vybrané časové řady  $X^i$  jako  $\hat{F}_i$  a mapování pozorovaných hodnot fyziologické události v čase  $t$  do kopula prostoru jako  $Z_i^t = \Phi^{-1}(\hat{F}_i(X_t^i))$ , kde  $\Phi$  je kumulativní distribuční funkce (CDF) Gaussova rozdělení. V neposlední řadě lze konstruovat temporální kauzální graf analýzou relací mezi  $Z_i^t$ . Pro účely tvorby grafického řešení v podobě kauzální matice  $T \times T$  obsahující odhady koeficientů  $\hat{\beta}_i$  byla adaptována regularizovaná regrese podle [218]. Necht vybraná fyziologická událost  $X^i = \{x_t^i : t = 0, \dots, T\}$ , poté lze získat koeficienty

následovně:

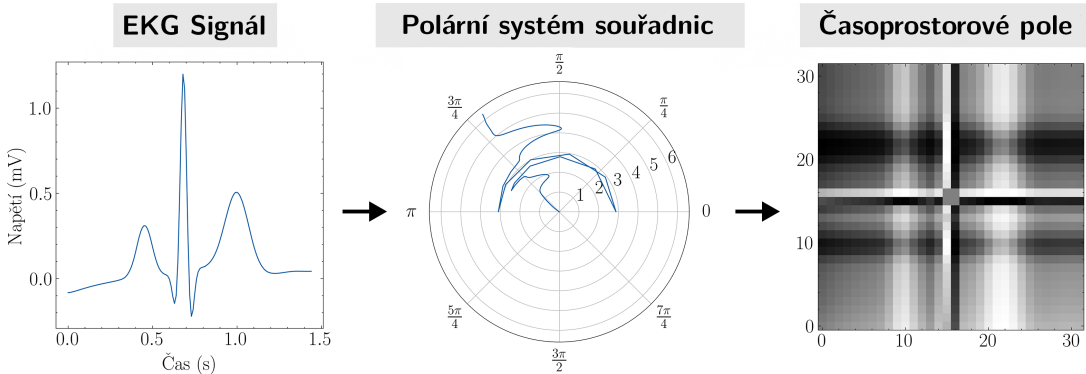
$$\hat{\beta}_i(\lambda) = \arg \min_{\beta_i} \left( \sum_{t=1}^T \|x_i^t - X_{t,L}^{lag} \beta_i\|^2 + \lambda \|\beta_i\|_1 \right) \quad (4.6)$$

kde  $X_{lag}^{t,L}$  reprezentuje spojený vektor všech zpožděných pozorování s maximálním zpožděním  $L$  až do času  $t$ . Tvorba kauzálních matic byla realizována v programovém prostředí Matlab s využitím knihovny *GLMNET*<sup>20</sup>, která umožňuje specifikovat různé typy regresních modelů. Hodnota časového zpoždění byla určena na základě Akaikeho informačního kritéria (AIC) jako  $L = 4$ . Během každého výpočtu bylo pomocí zmíněné knihovny realizováno i automatické ladění hodnot penalizačního parametru  $\lambda \in m_i$ , kde  $m_i = 10^{a+(i-1)d}$  pro  $i = 1, 2, \dots, 6$  a  $d = \frac{b-a}{n-1}$ . Hodnoty  $a$  a  $b$  byly nastaveny na -3 a 2.

### 4.6.3 Konstrukce časoprostorových polí

Bylo realizováno mapování segmentů všech kanálů  $c$  do prostorové domény (GAF), jež zachovává časové závislosti. Wang and Oates [219] představili koncept této metody transformace časové řady do 2D obrazu v roce 2015. Vzhledem k dříve definované fyziologické události, tedy vybrané časové řadě  $X^i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_t^i\}$  z kanálu  $c$  zahrnuje konstrukce GAF nejdříve normalizaci na interval  $[-1; 1]$ :

$$\tilde{x}_t = \frac{(x_t - \max(X^i)) + (x_t - \min(X^i))}{\max(X^i) - \min(X^i)} \quad (4.7)$$



**Obrázek 4.17:** Ukázka jednotlivých kroků GAF mapování na EKG segmentu

Dále jsou normalizovaná data časové řady převedeny do polárních souřadnic výpočtem úhlové složky  $\theta_i$  a radiální složky  $r_i$  pro každý vzorek  $\tilde{x}_t$ :

$$\begin{cases} \phi_i = \arccos(\tilde{x}_t), & -1 \leq \tilde{x}_t \leq 1, \tilde{x}_t \in \tilde{X}^i \\ r_i = \frac{t}{N}, & t \in N \end{cases} \quad (4.8)$$

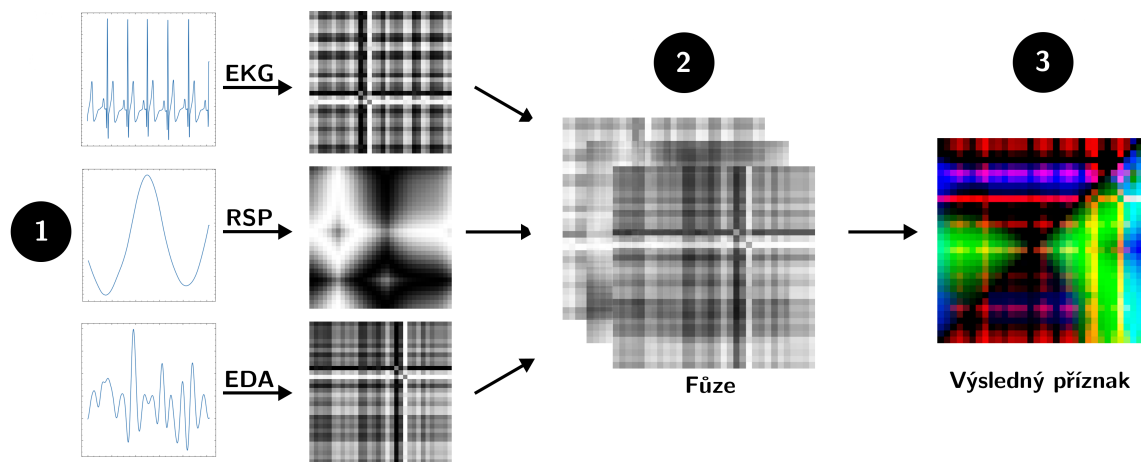
<sup>20</sup>[https://hastie.su.domains/glmnet\\_matlab](https://hastie.su.domains/glmnet_matlab)



kde  $t$  je časová značka vzorku fyziologické události a  $N$  je konstantní faktor pro regulaci rozpětí polárního souřadného systému. Jinými slovy, časová značka představuje poloměr a arkus kosinus hodnoty časové řady úhel. Lze zde hovořit o bijektivní transformaci, jež zachovává časovou závislost pomocí souřadnice  $r$ .

Po transformaci přeškálované časové řady do polárního souřadnicového systému lze využít úhlovou perspektivu, v tomto případě s ohledem na trigonometrický rozdíl mezi jednotlivými body (GADF, Gramian angular field difference), k identifikaci temporální korelace v rámci různých časových intervalů:

$$GADF = [\sin(\phi_i - \phi_j)] \quad (4.9)$$



**Obrázek 4.18:** Diagram tvorby časoprostorových vzorů. 1) Aplikace GAF mapování pro vybraný segment všech kanálů  $c$ . 2) Kombinace výsledných polí do jednoho trojrozměrného pole. 3) Výsledný příznak kódující temporální korelace fyziologické události v prostorové doméně

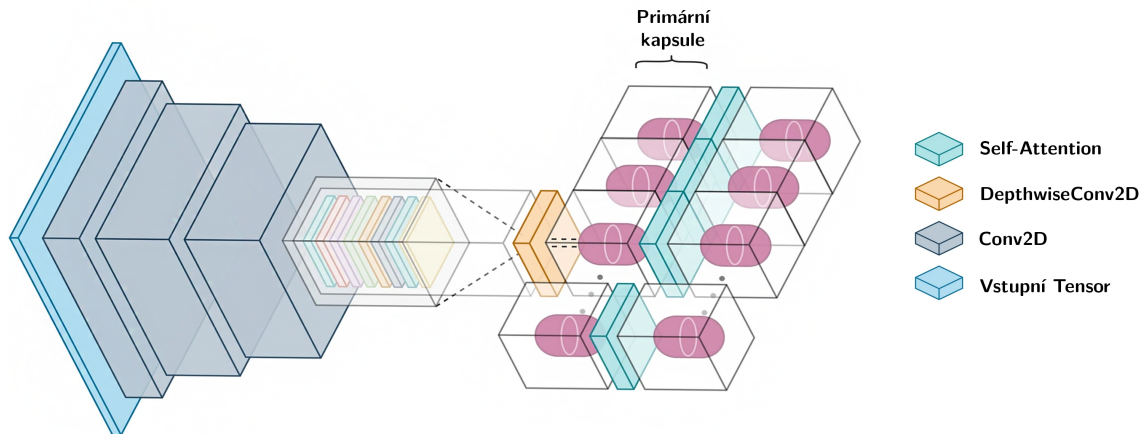
Ve výsledku je tedy časoprostorový vzor definován následující  $T \times T$  maticí, která je kvazi-Gramovou maticí:

$$GADF = \begin{bmatrix} \sin(\phi_1 - \phi_1) & \sin(\phi_1 - \phi_2) & \cdots & \sin(\phi_1 - \phi_n) \\ \sin(\phi_2 - \phi_1) & \sin(\phi_2 - \phi_2) & \cdots & \sin(\phi_2 - \phi_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sin(\phi_n - \phi_1) & \sin(\phi_n - \phi_2) & \cdots & \sin(\phi_n - \phi_n) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

kde každý prvek odpovídá sinové funkci úhlového sinusového rozdílu v různých časových bodech. Výpočet a tvorba těchto příznaků, časoprostorových vzorů, byla implementována v programovacím jazyce Python. Jednotlivé kroky GADF mapování jsou ilustrovány na Obr. 4.17. Schéma multimodální tvorby časoprostorového pole je zobrazeno na Obr. 4.18.

#### 4.6.4 Kapsulární neuronová síť

Pro potřeby realizace úloh klasifikace (resp. hodnocení kognitivní zátěže), byla navržena architektura kapsulární neuronové sítě postavená na řešení, které představili Mazzia et al. [220], *Efficient-CapsNet*. Celkovou architekturu této sítě lze vidět na obrázku 4.19.



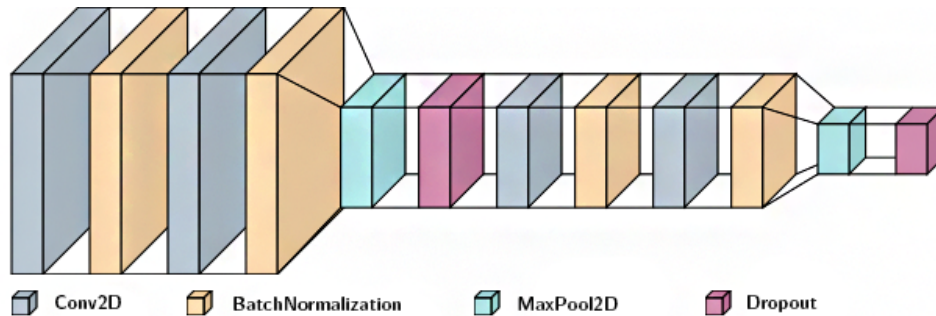
**Obrázek 4.19:** Schematické znázornění architektury sítě *Efficient-CapsNet* (Upraveno a převzato z [221])

V případě použití jednoho příznaku je vstupem modelu obraz, který lze reprezentovat jako tenzor  $X$  s tvarem  $H \times W \times C$ , kde  $H$ ,  $W$  a  $C$  jsou výška, šířka a barevné kanály. V našem případě se jedná o synergické spojení dvou sad příznaků vyplývajících z minulých sekcí, kauzálních matic  $X_{COG} \in \mathbb{R}^{T \times T \times C}$  a časoprostorových vzorů  $X_{GAF} \in \mathbb{R}^{T \times T \times C}$ . Vstupním tenzorem je tedy příznak  $X \in \mathbb{R}^{2 \times T \times T \times C}$ . Než se vstup dostane k primární kapsulové vrstvě, je provedena extrakce lokálních vlastností ze vstupu  $X$  pomocí sady několika typů vrstev<sup>21</sup>:

- **Conv2D** — Vytváří konvoluční jádro, které je konvolováno se vstupem vrstvy a vytváří tenzor výstupů. V podstatě se jedná o sadu filtrů. Každý filtr transformuje část obrazu (definovanou velikostí jádra) pomocí filtru jádra. Matice jádrového filtru se aplikuje na celý obraz. Filtry lze chápat jako transformaci obrazu.
- **BatchNormalization** — Aplikuje normalizaci, která udržuje průměrný výstup blízko nule a směrodatnou odchylku výstupu blízko jedné.
- **MaxPool2D** — Funguje jako filtr pro podvzorkování na základě výběru maximálně ze dvou sousedů. Slouží ke snížení výpočetní náročnosti a do jisté míry také k redukci přeučení.

<sup>21</sup>Jednotlivé vrstvy jsou pojmenovány podle korespondujícího názvu v *TensorFlow* a *Keras* API

- **Dropout** — Dropout je regularizační metoda, při níž je část uzlů ve vrstvě náhodně ignorována (nastavena na nulu) pro každý tréninkový vzorek. Tím se náhodně vynechá část sítě a síť je nucena se učit distribuovaným způsobem. Tato technika také zlepšuje generalizaci a snižuje přeučení.



**Obrázek 4.20:** První část sítě ( $H_{Conv}$ ) navržené v rámci této práce, která mapuje vstupní obraz na prostor vyšší dimenze

Každý výstup konvoluční vrstvy  $l$  se tedy skládá z konvoluční operace s určitou rozměrovou velikostí kernelů  $k$  a počtem příznakových map  $f$ . U konvolučních vrstev byla použita aktivační funkce ReLU k přidání nelinearity do sítě:

$$F^{l+1}(X^l) = \text{ReLU}(\text{Conv}_{k \times k}(X^l)) \quad (4.11)$$

Celkově si lze první část sítě představit jako jednu funkci  $H_{Conv}$ , která mapuje vstupní obraz do prostoru s vyšší dimenzí, což usnadňuje tvorbu kapslí<sup>22</sup>. Tuto první část sítě lze vidět na Obr. 4.20. Následně je pak využito hloubkově oddělitelné konvoluce, ze které je získána vrstva primárních kapslí  $S_{n,d}^l$  kde  $n^l$  a  $d^l$  jsou počty primárních kapslí a jejich jednotlivé rozměry  $l$ -té vrstvy. Základním prvkem sítě tedy již není jeden neuron, ale vektorová výstupní kapsle, která by měla zachovávat svojí orientaci a délku. To je realizováno pomocí „squash“ aktivační funkce:

$$\text{squash}(s_n^l) = \left(1 - \frac{1}{e^{\|s_n^l\|}}\right) \frac{s_n^l}{\|s_n^l\|} \quad (4.12)$$

kde  $s_n^l$  označuje právě jednu kapsli. Detailně koncept kapsulární sítě popsal Hinton [222]. Kapsulární neuronová síť byla implementována v programovacím jazyce Python využitím knihoven *TensorFlow*<sup>23</sup> a *Keras*<sup>24</sup>. Počet filtrů konvolučních vrstev byl zvolen 32, 64, 64 a 128 v pořadí, tak jak jdou za sebou ve schématu 4.20. Velikosti kernelů byly zvoleny 5, 3, 3 a 3. MaxPool2D vrstvy byly přidány k zajištění kombinace lokálních rysů příznaků a učení se tak jeho globálnějším rysům.

<sup>22</sup>„Kapsle“ označuje skupinu neuronů, která společně představuje instanci parametru specifické entity nebo části obrazu

<sup>23</sup><https://www.tensorflow.org>

<sup>24</sup><https://keras.io>

### 4.6.5 Self-attention směřování

Kapsulární síť byla v této práci zvolena vzhledem ke své architektuře napodobující lidskou biologii, a tím pádem schopností lépe modelovat komplexní vztahy v datech. To vyplývá z použitého nového přístupu neiterativního paralelního směřování kapslí, které bylo představeno a popsáno v [220].

### 4.6.6 Marginální ztrátová funkce

V případě této práce se jedná o binární klasifikační problém, pro který by se za normálních okolností použila ztrátová funkce ve smyslu binární nebo kategorické křížové entropie. Tyto ztrátové funkce ale nezachycují sémantiku vektorů, jak je používána v kapslích. Pro tyto potřeby byla využita marginální ztrátová funkce, kde v případě klasifikace více tříd je pro každou třídu reprezentovanou kapslí  $n^L$  v poslední vrstvě  $L$  vypočtena pravděpodobnost existence určité třídy následovně:

$$\mathcal{L}_{n^L} = T_{n^L} \max(0, m^+ - \|u_n^L\|)^2 + \lambda (1 - T_{n^L}) \max(0, \|u_n^L\| - m^-)^2 \quad (4.13)$$

kde  $T_{n^L}$  je rovno jedné, pokud je přítomna třída  $n^L$ , a  $m^+$ ,  $m^-$  a  $\lambda$  jsou laditelné hyperparametry. Nakonec jsou sečteny jednotlivé ztrátové funkce  $\mathcal{L}_{n^L}$  pro získání konečného „skóre“ ve fázi trénování.

### 4.6.7 Trénování a evaluace modelů

Trénování a evaluace modelů bylo realizováno využitím programovacího jazyka Python ve spojení s interaktivním prostředím Jupyter Notebook. Pro tvorbu modelů byly využity knihovny *TensorFlow* a *Keras*. Trénování bylo akcelerováno pomocí grafické karty NVIDIA GeForce RTX 4080 s využitím *CUDA Toolkit*<sup>25</sup>. Pro účely trénování byly datasety rozděleny vždy v poměru 8:2 na trénovací a testovací množinu, přičemž validace probíhala během trénování využitím testovací množiny (resp. validační). Všechny uvedené přesnosti ve výsledcích jsou tím pádem validační přesnosti, nikoli trénovací. Pro trénování byl využit optimalizační algoritmus Adam s učící rychlostí  $5 \times 10^{-4}$ . Trénování probíhalo po dobu 100 epoch a batch size byl nastaven na 256. Pro zajištění rychlé konvergence optimalizátoru a co nejlépe globálnímu minimu ztrátové funkce, byla použita metoda žíhání (annealing) rychlosti učení (LR, learning rate). Aby byla zachována výhoda rychlého času výpočtu s vysokým LR, byla dynamicky snižována LR každých  $x$  kroků (epoch) v závislosti na tom, zda je to nutné (když se nezlepšuje přesnost). Bylo také realizováno kombinační srovnání příznaků ve smyslu použitých biosignálů. Veškeré výsledky jsou uvedeny v sekci 5.3. Bylo realizováno i srovnání se současným stavem. K evaluaci modelů byly využity hodnotící metriky, které jsou popsány v sekci 4.7.5.

<sup>25</sup><https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit-archive>

## 4.7 Statistické metody

V této sekci jsou stručně rozebrány statistické metody použité v této práci pro účely analýzy dat a hodnocení kognitivní zátěže.

### 4.7.1 Lineární smíšené modely

Pro hodnocení dat z mise DIANA bylo využito LMM. Tyto modely představují flexibilní statistický nástroj pro analýzu dat s korelovanými nebo vnořenými strukturami. Jedná se o rozšíření lineárních regresních modelů, které umožňují zahrnutí jak fixních, tak náhodných efektů.

Základní myšlenkou za LMM je modelování vztahu mezi závislou proměnnou  $Y$  a jedním nebo více nezávislými proměnnými  $X$ , zatímco bere v úvahu skutečnost, že data mohou mít hierarchickou strukturu, s pozorováními vnořenými v různých skupinách. To se provádí specifikací lineární rovnice, která zahrnuje jak fixní, tak náhodné efekty (resp. vektory těchto veličin):

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + u + \epsilon \quad (4.14)$$

kde  $\beta$  je vektor koeficientů pro fixní efekty,  $u$  je vektor náhodných efektů a  $\epsilon$  je chybový člen. Předpokládá se, že náhodný efekt  $u$  se řídí normálním rozdělením se střední hodnotou nula a rozptylem  $\sigma_u^2$  a že je nezávislý na chybovém členu  $\epsilon$ , který se rovněž řídí normálním rozdělením se střední hodnotou nula a rozptylem  $\sigma_\epsilon^2$ .

V případě například pozorování závislé proměnné  $Y_{ij}$  pro  $i$ -té pozorování v  $j$ -té skupině bude náhodný efekt  $u$  představovat variabilitu mezi skupinami a je do modelu zahrnut proto, aby zohlednil skutečnost, že pozorování v rámci jedné skupiny si budou pravděpodobně podobnější než pozorování v jiných skupinách. Problematika LMM je každopádně velmi obsáhlá a překračuje rozsahem tuto práci. Rozebrána byla podrobně v literatuře [223].

### 4.7.2 Grangerova kauzalita

Grangerova kauzalita byla v této práci použita k hodnocení příčinných vztahů v rámci fyziologických signálů a k zachycení jejich interakcí v závislosti na čase. Grangerovo pojetí vychází z myšlenky, že příčina by měla být nápomocná při předpovídání budoucích vlivů, a to nad rámec toho, co lze předpovědět pouze na základě jejich vlastních minulých hodnot [224].

Formálně, časová řada  $X$  je nazvána „Grangerovou kauzalitou“ jiné časové řady  $Y$ , jestliže regrese pro  $Y$  z hlediska minulých hodnot  $Y$  a  $X$  je statisticky významně přesnější než regrese pouze minulých hodnot  $Y$ . Necht  $\{x_t\}_{t=1}^T$  jsou zpožděné vzorky řady  $X$  a  $\{y_t\}_{t=1}^T$  řady  $Y$  (dále jen jako vektory  $\bar{x}_t$  a  $\bar{y}_t$ ). Poté je prvním krokem

Grangerova testu následující regrese [225]:

$$\begin{aligned} y_t &\approx A \cdot y_{t-1} + B \cdot x_{t-1}^t \\ y_t &\approx A \cdot y_{t-1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

po které je možné aplikovat různé statistické testy pro získání p-hodnoty a následně je možné rozhodnout o výše zmíněné statistický významné přesnosti.

Běžně se Grangerova kauzalita aplikuje v rámci modelování časových řad ve smyslu kombinatorického testování všech příznaků za účelem konstrukce výstupního příznakového kauzálního grafu (resp. kauzální matice, viz sekce 4.6). Takové řešení by ale pro poměrně velký počet fyziologických příznaků bylo extrémně výpočetně náročné, a proto bylo dále uznáno za nevhodné.

Řešením se zde naskytla regrese, kterou lze využít pro identifikaci podmnožiny příznaků, na které je daný příznak podmíněně závislý. To vychází z faktu, že nejlepší regresor pro danou proměnnou s nejmenší kvadratickou chybou bude mít teoreticky nenulové koeficienty pouze pro proměnné v okolí<sup>26</sup> [216, 225]. Pro tento regresní problém byl zvolen Lasso algoritmus, jenž je uveden do souvislosti v následující sekci.

### 4.7.3 Lasso regrese

Lasso (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator) je široce používaná technika lineární regrese pro výběr a regularizaci proměnných využitím  $\ell_1$  penalizačního členu. Formálně, výstup  $\vec{w}$  minimalizuje součet průměrné kvadratické chyby regrese pro  $y$ :

$$\vec{w} = \arg \min \frac{1}{n} \sum_{(\vec{x}, y) \in X} |\vec{w} \cdot \vec{x} - y|^2 + \lambda \|\vec{w}\|_1 \quad (4.16)$$

kde  $X$  je vstupní příznak,  $n$  je počet vzorků v  $X$  a  $\lambda$  je penalizační člen určující míru regularizace koeficientů. S rostoucí hodnotou  $\lambda$  se více koeficientů smršťuje směrem k nule, což vede k řídkému modelu s menším počtem prediktorů a naopak [226]. Ve smyslu tvorby kauzálních matic poskytuje Lasso množinu časových proměnných, které při regresi  $y_t$  podle zpožděných proměnných  $x_{t'}$ , kde  $t' = \{t - T, \dots, t - 1\}$  pro všechna  $x \in X$ , nabývají právě nenulového koeficientu Grangerovy kauzality.

Nicméně Bahadori a Liu dokázali v [227], že Grangerova kauzalita je v rámci použití vícerozměrných dat inkonzistentní a není dobře schopna zachytit nelineární vztahy nebo složité struktury závislostí. Vzhledem k tomu, že data využívaná v této práci jsou vícerozměrná a reprezentují biosignály, v rámci kterých mohou existovat právě nelineární vztahy nebo komplexní hierarchické relace, byl využit přístup Kopula-Granger. S využitím Lasso ukázali v [227] jeho konzistenci na vícerozměrných datech i jeho schopnost efektivně zachytit nelinearitu v datech (viz sekce 4.6.2).

<sup>26</sup>Statistický „okolí“ proměnné implikuje podmnožinu proměnných, které s ní úzce souvisejí.

#### 4.7.4 Teorie kopulí

Vzhledem k využití Kopula-Granger přístupu pro tvorbu vícerozměrných kauzálních matic je žádoucí stručně představit kopula funkce. V teorii pravděpodobnosti a statistice je kopule  $C$  vícerozměrnou kumulativní distribuční funkcí, jež popisuje závislost mezi jednotlivými marginálními distribucemi a poskytuje způsob, jak modelovat právě společnou distribuci náhodných veličin bez specifikace samotných distribucí těchto veličin. Formálně, je  $C : [0, 1]^d \rightarrow [0, 1]$   $d$ -dimenzionální kopulou, pokud je  $C$  sdílenou CDF  $d$ -dimenzionálního náhodného vektoru na jednotkové krychli  $[0, 1]^d$  s rovnoměrnými marginály. Základem teorie kopulí je Sklarův teorém, který říká, že jakákoli více-dimenzionální distribuce může být zapsána jako kopule aplikovaná na její marginální distribuce:

**Teorém 4.1 (Sklarův teorém)** *Nechť  $F$  je vícerozměrná distribuční funkce s marginálními distribucemi  $F_1, F_2, \dots, F_n$ . Pak existuje kopule  $C$  taková, že:*

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (4.17)$$

*Kopule  $C$  je jednoznačná, pokud marginální distribuce  $F_1, F_2, \dots, F_n$  jsou spojité.*

Kopula-Granger model (resp. Grangerův Non-paranormální model, G-NPN), v rámci kterého jsou v této práci kopula funkcí mapovány marginální distribuce na úrovni fyziologických událostí do kopula prostoru, je popsán v sekci 4.6.2. Pro shrnutí vychází tento model z následujících kroků [217]:

1. Nalezení empirického marginálního rozdělení pro fyziologickou událost  $\hat{F}_i$ .
2. Mapování pozorování do kopula prostoru:  $\hat{f}_i(x_t^i) = \hat{\mu}_i + \hat{\sigma}_i \cdot \Phi^{-1}(\hat{F}_i(x_t^i))$ .
3. Nalezení Grangerovy kauzality v rámci  $\hat{f}_i(x_t^i)$ .

přičemž je dále brán v potaz Winsorizovaný<sup>27</sup> odhad použité distribuční funkce, podle [227], aby se zabránilo velkým číslům  $\Phi^{-1}(0^+)$ <sup>28</sup> and  $\Phi^{-1}(1^-)$ :

$$\tilde{F}_j = \begin{cases} \delta_n, & \text{if } \hat{F}(x^j) < \delta_n \\ \hat{F}(x^j) & \text{if } \delta_n \leq \hat{F}(x^j) < 1 - \delta_n \\ (1 - \delta_n) & \text{if } \hat{F}(x^j) > 1 - \delta_n. \end{cases} \quad (4.18)$$

<sup>27</sup>Winsorizace nebo Winsorova transformace je transformace statistických dat omezením extrémních hodnot, aby se snížil vliv případných odlehlých hodnot

<sup>28</sup> $\Phi^{-1}$  je inverzní kumulativní distribuční funkce standardního normálního rozdělení.

### 4.7.5 Metriky hodnocení v strojovém učení

Pro potřeby porovnání a vyhodnocení výkonnosti (přesnosti) realizovaných modelů strojového učení bylo zvoleno několik hodnotících metrik. Tato kapitola se zabývá použitými metrikami v této práci a jejich významem při posuzování modelů.

#### 4.7.5.1 Přesnost

Přesnost je měřítkem, které hodnotí schopnost modelu správně předpovídat označení tříd v souboru dat. Vypočítá se jako poměr počtu správných předpovědí k celkovému počtu předpovědí provedených modelem:

$$\text{Přesnost} = \frac{\text{Počet správně predikovaných tříd}}{\text{Celkový počet predikcí}} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (4.19)$$

kde TP, TN, FP a FN představují počet pravdivě pozitivních, pravdivě negativních, falešně pozitivních a falešně negativních výsledků.

Přesnost je často používanou metrikou pro hodnocení modelů, protože poskytuje jednoduché měřítko toho, jak dobře model celkově funguje. Vysoká hodnota přesnosti naznačuje, že model je schopen správně předpovídat velkou část souboru dat, zatímco nízká hodnota přesnosti naznačuje, že model není příliš efektivní při predikci tříd. Tato metrika však může být zavádějící ve chvíli, kdy jsou třídy nevyvážené. V takových případech může mít model, který vždy předpovídá většinovou třídu, vysokou hodnotu přesnosti, i když si vede špatně u menšinové třídy.

#### 4.7.5.2 Pravdivě pozitivní míra

Pravdivě pozitivní míra (TPR, true positive rate), neboli senzitivita, je podíl pravdivě pozitivních předpovědí (TP) z celkového počtu pozitivních předpovědí (TP + falešně negativní předpovědi, tedy TP + FN). Matematicky je přesnost definována jako:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4.20)$$

Vysoké TPR znamená, že model dobře identifikuje pozitivní případy a minimalizuje falešně negativní, zatímco nízké TPR naznačuje, že model není příliš účinný při identifikaci pozitivních tříd.

#### 4.7.5.3 Pravdivě negativní míra

Pravdivě negativní míra (TNR, true negative rate), neboli specificita, označuje podíl skutečně negativních případů, které jsou správně identifikovány jako negativní. Jinými slovy, TNR měří schopnost modelu správně identifikovat negativní třídu a



lze vypočítat:

$$TNR = \frac{TN}{TN + FP} \quad (4.21)$$

Vysoké TNR znamená, že model dobře identifikuje negativní třídy a minimalizuje falešně pozitivní výsledky, zatímco nízké TNR naznačuje, že model není příliš účinný při identifikaci negativních případů.

#### 4.7.5.4 Křivka ROC

ROC (Receiver Operating Characteristic) křivka je grafická metoda pro vyhodnocení výkonosti binárního klasifikačního modelu. Tato křivka zobrazuje vztah mezi dvěma parametry: TPR a falešnou pozitivní mírou (FPR, false positive rate). TPR odpovídá přesnosti modelu při detekci pozitivních případů, zatímco FPR zahrnuje chybně klasifikované negativní případy.

ROC křivka se skládá z mnoha bodů, přičemž každý bod představuje jinou úroveň rozhodovacího prahu (threshold) pro klasifikaci pozitivních a negativních případů. TPR a FPR se poté vypočítávají pro každý z těchto prahů a vykreslí se na grafu. Ideální křivka ROC je tvořena body s TPR rovnoměrně rostoucími k jedné a FPR rovnoměrně rostoucími k nule, což by znamenalo, že model dokáže rozlišovat mezi pozitivními a negativními případy s vysokou přesností. Křivka se používá například k porovnávání výkonu různých klasifikačních modelů. Vyšší oblast pod křivkou (AUC, Area Under Curve) indikuje, že model má lepší výkon, zatímco nižší AUC může naznačovat, že model má menší přesnost.

## Výsledky

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky zpracování a analýzy dat z analogové vesmírné mise DIANA včetně výsledků experimentů strojového učení. Kapitola je primárně rozdělena na tři části, přičemž první sekce 5.1 uvádí pouze srovnání QRS detektorů (viz 4.3.1.1). Další část je věnována prezentaci výsledků zpracování dat z mise, primárně ve formě grafických výstupů, jako je například vývoj sledovaných statistických veličin během mise a v rámci baterie NPF testů. V této části jsou také uvedeny výsledky ze statistického modelování využitím LMM (viz sekce 4.4.5).

V poslední části jsou uvedeny výsledky experimentů strojového učení, které byly realizovány využitím metody navržené v rámci této práce. Samotná metoda je detailně popsána v sekci 4.6. Zároveň je zde uvedeno i srovnání navržené metody se současným stavem a její experimentální ověření na datech z mise DIANA.

### 5.1 Srovnání QRS detektorů

V následující tabulce jsou prezentovány výsledky srovnání QRS detektorů. Tabulka uvádí odhady marginálních středních hodnot vysvětlující proměnné na úrovni faktoru „Metoda“. Střední hodnota zde představuje výši chyby detektoru.

**Tabulka 5.1:** Výsledky výpočtu marginálních středních hodnot QRS detektorů

Detektor	Střední hodnota	SE	95% CI
*Kalidas [188]	0,016	0,005	0,007 – 0,025
Christov [228]	0,025	0,005	0,015 – 0,034
Nabian [229]	0,025	0,005	0,016 – 0,034
Rodrigues [230]	0,029	0,005	0,019 – 0,038
Pantompkins [189]	0,038	0,005	0,029 – 0,048
Elgendi [231]	0,058	0,005	0,049 – 0,068
Gamboa [232]	0,109	0,008	0,093 – 0,125

\* Označuje detektor použitý v této práci

## 5.2 Analýza dat z mise DIANA

Ze zpracovaných biosignálů v rámci dat z mise DIANA byly vypočteny statistické veličiny (viz sekce 4.4.3), jejichž průměr a směrodatná odchylka pro začátek, prostředek a konec experimentu jsou uvedeny v Tabulce 5.2. Vzhledem k síťovým a komunikačním problémům byly první den data pro Lander1 nespolehlivá nebo chybějící. V tabulce tedy pro subjekt Lander1 jsou hodnoty pro 1. den vypočítané za den druhý.

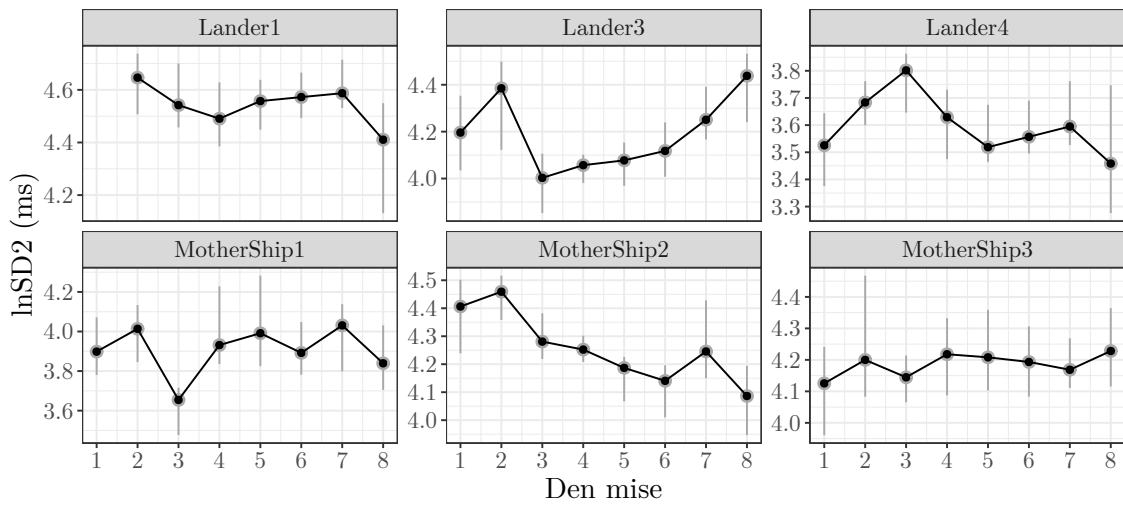
**Tabulka 5.2:** Individuální HRV reakce všech analogových astronautů v průběhu mise DIANA

Subjekt	Parametr		1. den		4. den		8. den	
			Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
Lander1	SD2	(ms)	102,48	31,27	94,38	29,74	89,43	35,11
	RMSSD	(ms)	78,67	20,3	72,11	16,44	63,76	20,35
	pNN50	(%)	28,29	8,25	27,21	6,68	20,93	9,18
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,03	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02
Lander3	SD2	(ms)	66,53	22,66	58,02	11,35	84,63	28,7
	RMSSD	(ms)	51,82	18,35	42,86	14,32	65,61	21,36
	pNN50	(%)	19,96	13,32	17,04	15,61	27,75	18,59
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,03	0,02	0,04	0,02	0,04	0,01
Lander4	SD2	(ms)	33,63	8,59	37,18	8,74	34,68	12,43
	RMSSD	(ms)	30,27	9,68	32,49	9,01	31,09	20,71
	pNN50	(%)	2,99	1,67	3,68	1,7	2,95	1,99
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,05	0,03	0,03	0,02	0,04	0,03
MotherShip1	SD2	(ms)	53,87	20,23	60,36	22,83	49,7	17,18
	RMSSD	(ms)	43,16	22,05	46,45	24,87	35,83	19,17
	pNN50	(%)	13,26	11,37	18,49	17,69	12,12	13,12
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
MotherShip2	SD2	(ms)	89,13	25,75	73,65	18,59	61,12	14,6
	RMSSD	(ms)	71,13	23,37	57,12	15,53	45,8	8,35
	pNN50	(%)	35,68	15,61	27,53	11,5	16,88	7,23
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,04	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
MotherShip3	SD2	(ms)	62,35	15,05	68,49	16,47	72,27	18,4
	RMSSD	(ms)	52,13	16,55	62,55	20,6	54,29	15,72
	pNN50	(%)	29,42	16,05	34,54	16,65	26,44	14,3
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,05	0,04	0,06	0,04	0,03	0,02

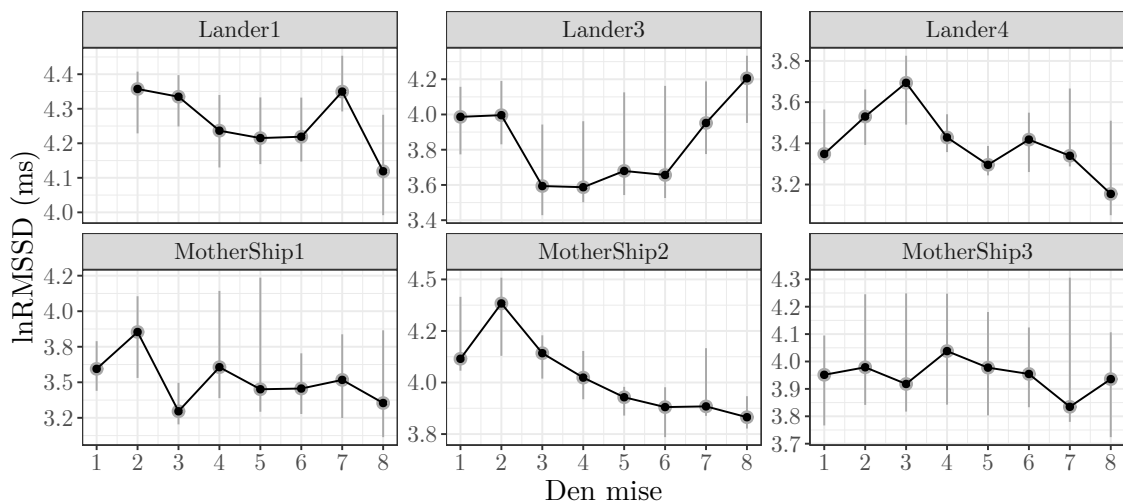
U Lander1 jsou vzhledem ke ztrátě dat v rámci prvního dne uvedeny výsledky vypočítané z druhého dne.

Označení subjektů vyplývá z experimentální skupiny, ve které se nacházeli. Pro jedince v mateřské lodi je používáno označení „*MotherShip*“. V rámci skupiny přistávacího modulu je používáno označení „*Lander*“. Dále jsou vizualizovány průběhy jednotlivých sledovaných veličin v podobě bodových rozsahů pro každý den.

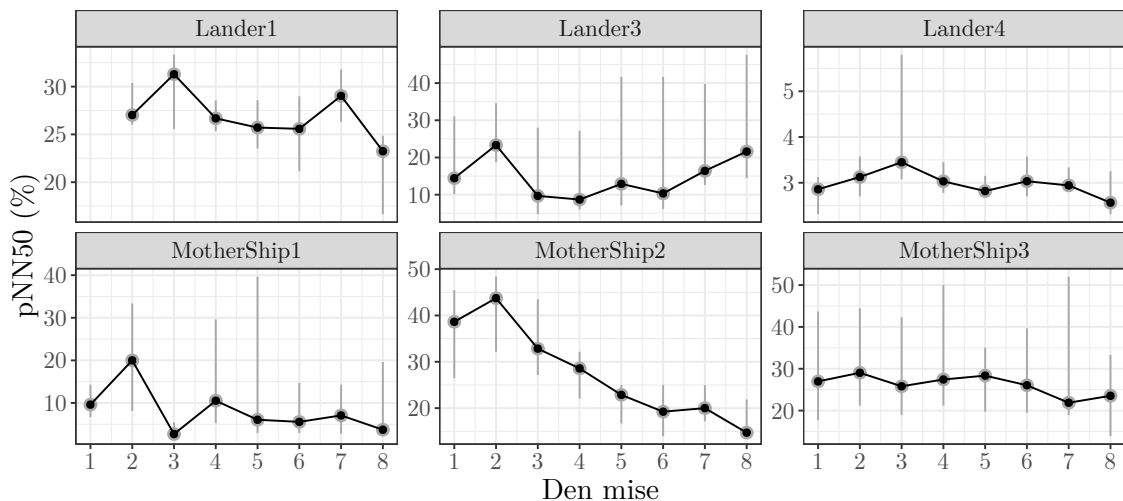
Jednotlivé body představují medián parametru vypočtený za patřičný den. Šedé rozsahy odpovídají hornímu a dolnímu kvartilu. V případě, že se u názvu sledovaného parametru nachází předpona „ln“, jedná se o přirozený logaritmus dané veličiny.



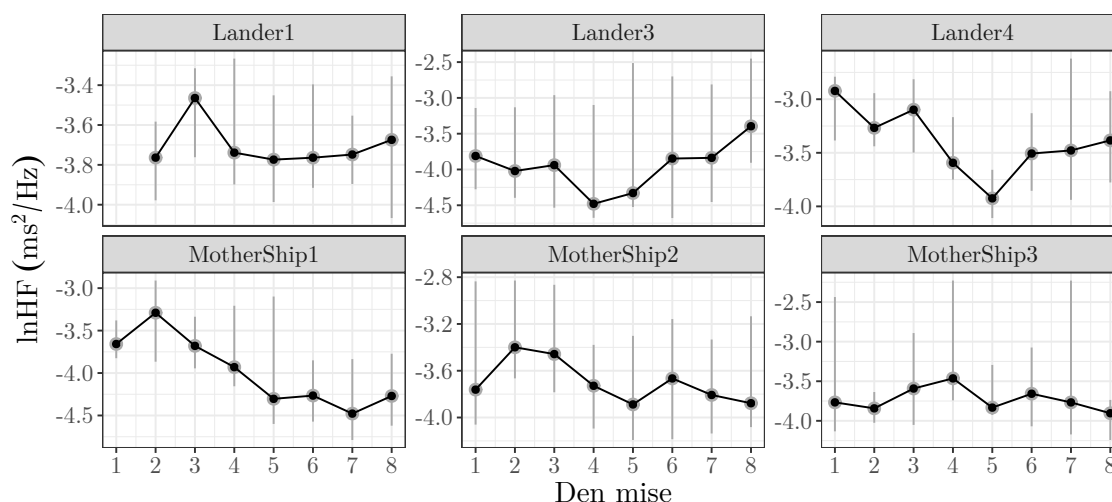
**Obrázek 5.1:** Medián, horní a dolní kvartil (šedý rozsah) hodnot SD2 pro jednotlivé dny



**Obrázek 5.2:** Medián, horní a dolní kvartil (šedý rozsah) hodnot RMSSD pro jednotlivé dny



**Obrázek 5.3:** Medián, horní a dolní kvartil (šedý rozsah) hodnot pNN50 pro jednotlivé dny



**Obrázek 5.4:** Medián, horní a dolní kvartil (šedý rozsah) hodnot HF pro jednotlivé dny

### 5.2.1 Sledované veličiny během NPF stimulace

Všichni jedinci byli během mise vystaveni NPF stimulaci ve formě baterie kognitivních testů využitím nástroje Neurop (viz sekce 4.1.7). Testování proběhlo dle harmonogramu mise, jehož příklad lze vidět na Obr. 4.3. Skupina přistávacího modulu podstoupila testování třikrát v průběhu mise. Jednotlivá testování pro tuto skupinu jsou dále v této sekci značeny následovně: F – první testování, M – druhé testování a L – třetí testování. V Tabulce 5.3 jsou uvedeny výsledky vypočtených sledovaných veličin pro jednotlivá testování v rámci skupiny přistávacího modulu, konkrétně průměr a směrodatná odchylka.

**Tabulka 5.3:** Individuální HRV reakce analogových astronautů přistávacího modulu během neuropsychologické stimulace sadou kognitivních testů

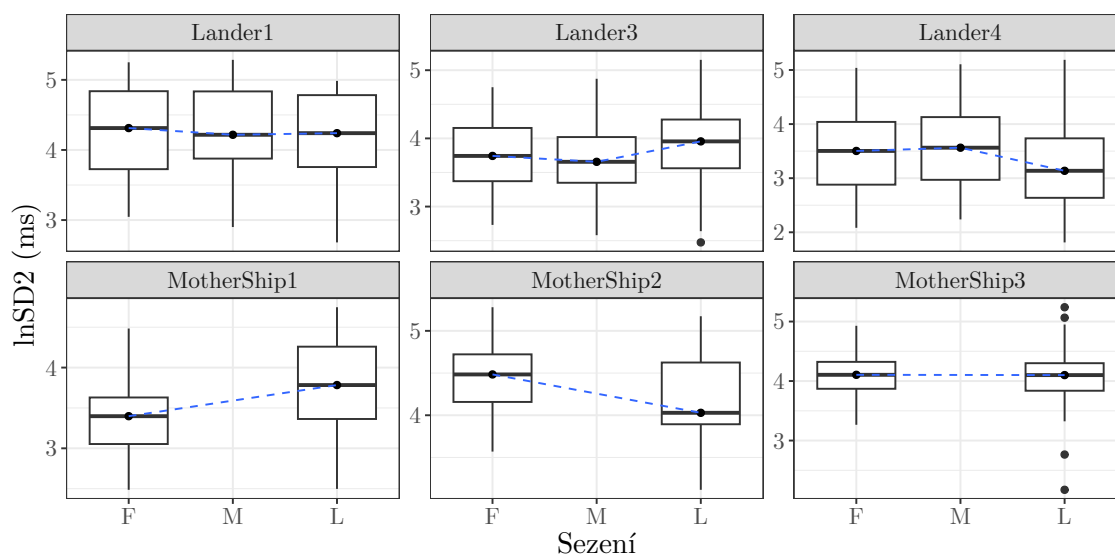
Subjekt	Parametr		F		M		L	
			Průměr	SD	Průměr	SD	Průměr	SD
Lander1	SD2	(ms)	83,26	45,84	83,48	43,76	78,22	40,53
	RMSSD	(ms)	74,14	44,08	80,67	45,11	71,23	42,12
	pNN50	(%)	18,42	14,09	24,02	14,27	13,46	12,07
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,04	0,03	0,05	0,04	0,03	0,03
Lander3	SD2	(ms)	48,01	22,92	45,09	24,59	58,08	31,14
	RMSSD	(ms)	30,89	13,43	38,71	22,29	47,38	28,91
	pNN50	(%)	5,41	6,12	7,07	6,77	11,74	8,68
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04
Lander4	SD2	(ms)	43,97	33,01	44,47	31,31	32,24	24,33
	RMSSD	(ms)	41,92	34,36	42,74	31,12	31,17	25,94
	pNN50	(%)	2,97	3,83	4,04	4,53	2,01	3,02
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,06	0,04	0,06	0,04	0,05	0,04

U jedinců ze skupiny mateřské lodi bylo testování během mise provedeno pouze dvakrát. První testování je tedy označeno jako F a druhé jako L. Výsledky vypočtených sledovaných veličin v rámci jednotlivých testování pro tuto skupinu jsou uvedeny v Tabulce 5.4.

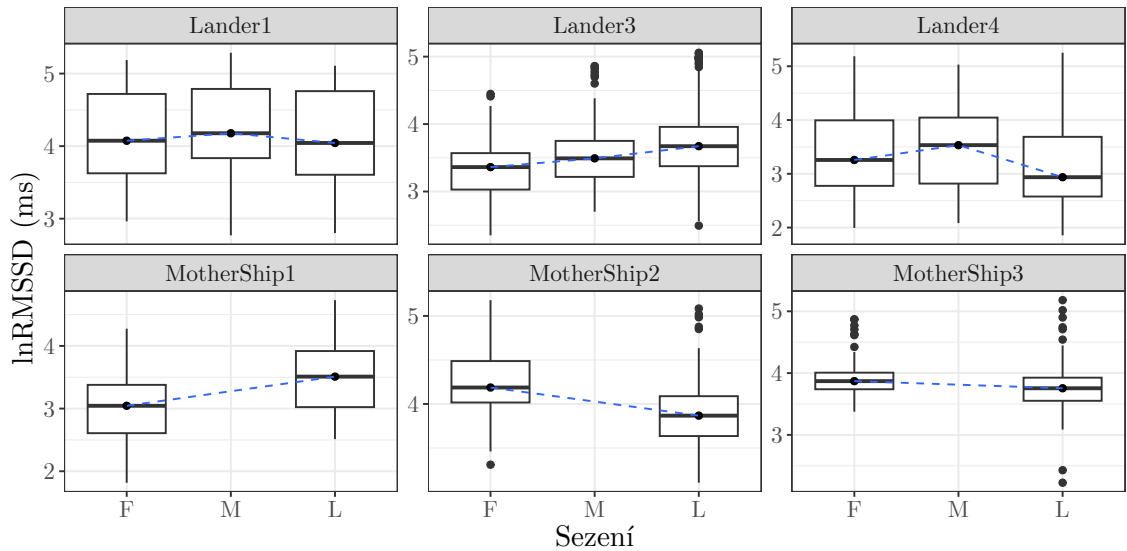
**Tabulka 5.4:** Individuální HRV reakce analogových astronautů mateřské lodi během neuropsychologické stimulace sadou kognitivních testů

Subjekt	Parametr		F		L	
			Průměr	SD	Průměr	SD
MotherShip1	SD2	(ms)	31,63	14,12	51,07	25,17
	RMSSD	(ms)	22,99	11,9	41,28	26,39
	pNN50	(%)	2,56	3,89	5,68	6,97
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,04	0,04	0,02	0,02
MotherShip2	SD2	(ms)	94,54	38,23	72,81	36,67
	RMSSD	(ms)	76,61	33,23	56,12	31,51
	pNN50	(%)	33,55	11,62	22,64	13,66
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,03	0,03	0,03	0,03
MotherShip3	SD2	(ms)	64,67	22,84	64,52	27,04
	RMSSD	(ms)	50,88	15,73	46,57	22,13
	pNN50	(%)	23,68	6,88	17,55	8,92
	HF	(ms <sup>2</sup> /Hz)	0,03	0,02	0,02	0,02

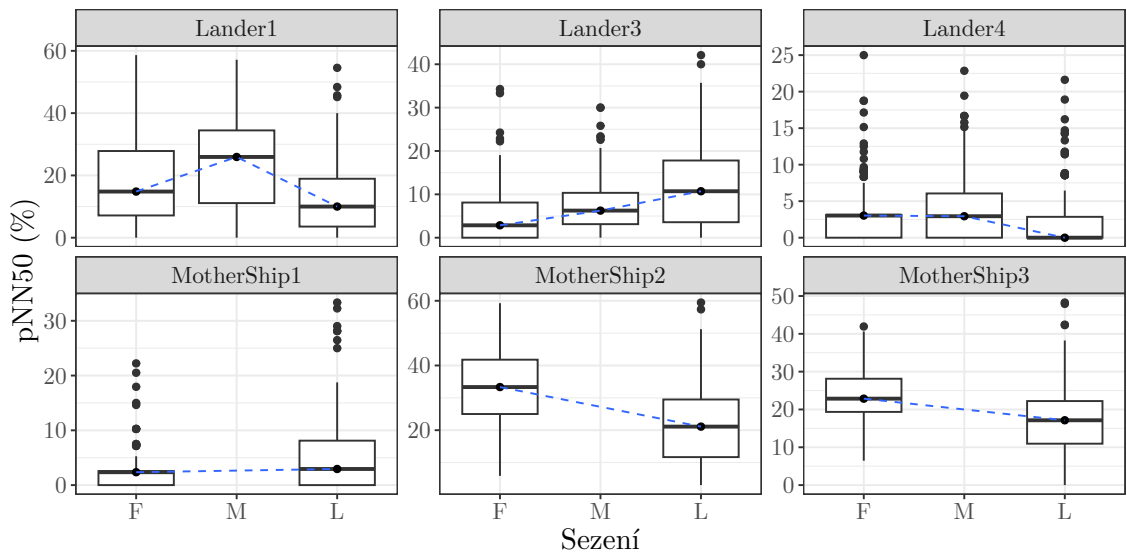
Jak již bylo popsáno v sekci 4.4, každé sezení, během kterého jedinec podstoupil NPF stimulaci sadou kognitivních testů, bylo na úrovni zaznamenaných biosignálu během testování segmentováno a zpracováno. Ve zbytku této sekce jsou vizualizovány zpracovaná data jednotlivých testování pro každého jedince ve formě krabicových grafů pro všechny sledované veličiny.



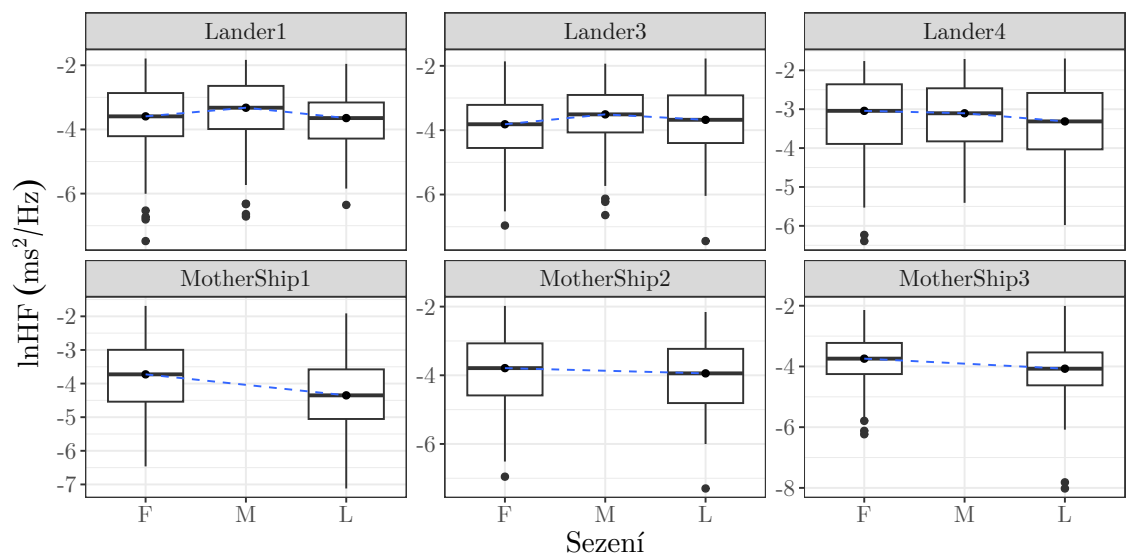
**Obrázek 5.5:** Krabicové grafy pro parametr SD2 během jednotlivých NPF testování



**Obrázek 5.6:** Krabicové grafy pro parametr RMSSD během jednotlivých NPF testování



**Obrázek 5.7:** Krabicové grafy pro parametr  $p\text{NN50}$  během jednotlivých NPF testování



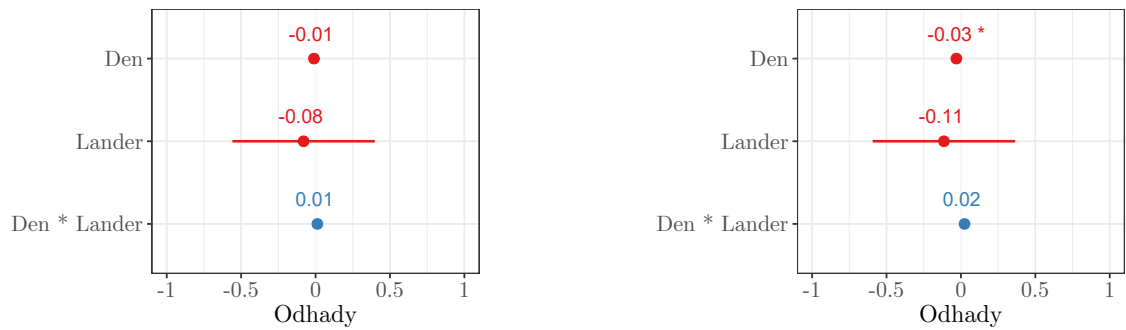
**Obrázek 5.8:** Krabicové grafy pro parametr HF během jednotlivých NPF testování

### 5.2.2 Statistické modelování

V této sekci jsou uvedeny výsledky statistického modelování sledovaných veličin využitím lineárních smíšených modelů (viz sekce 4.4.5 a 4.7.1). V Tabulce 5.5 jsou uvedeny výsledky LMM pro parametry SD2 a RMSSD. V tabulkách označuje proměnná  $N_{id}$  počet pozorovaných subjektů.

**Tabulka 5.5:** Fixní efekty lineárních smíšených modelů pro parametry SD2 a RMSSD

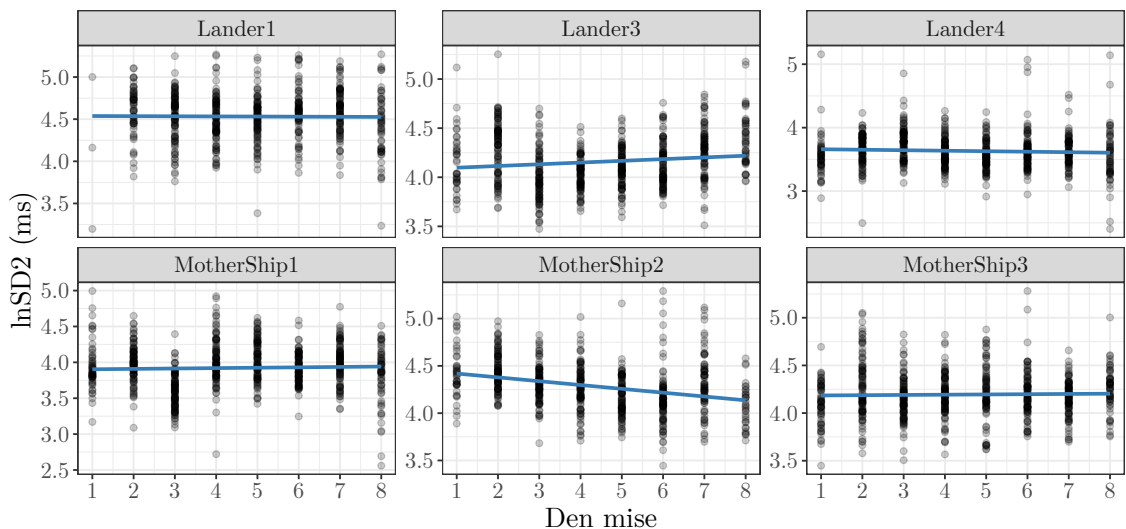
Prediktor	lnSD2			lnRMSSD		
	Odhad	95% CI	<i>p</i>	Odhad	95% CI	<i>p</i>
(Intercept)	4,18	2,88 – 5,48	<0,001	4,01	3,70 – 4,33	<0,001
Den	-0,01	-0,03 – 0,01	0,318	-0,03	-0,05 – 0,00	<b>0,023</b>
Skupina Lander	-0,08	-0,56 – 0,40	0,742	-0,11	-0,55 – 0,35	0,654
Den × skupina Lander	0,01	-0,02 – 0,04	0,424	0,02	-0,01 – 0,05	0,244
$N_{id}$	6			6		
Počet pozorování	3870			3866		



(a) Pro parametr SD2

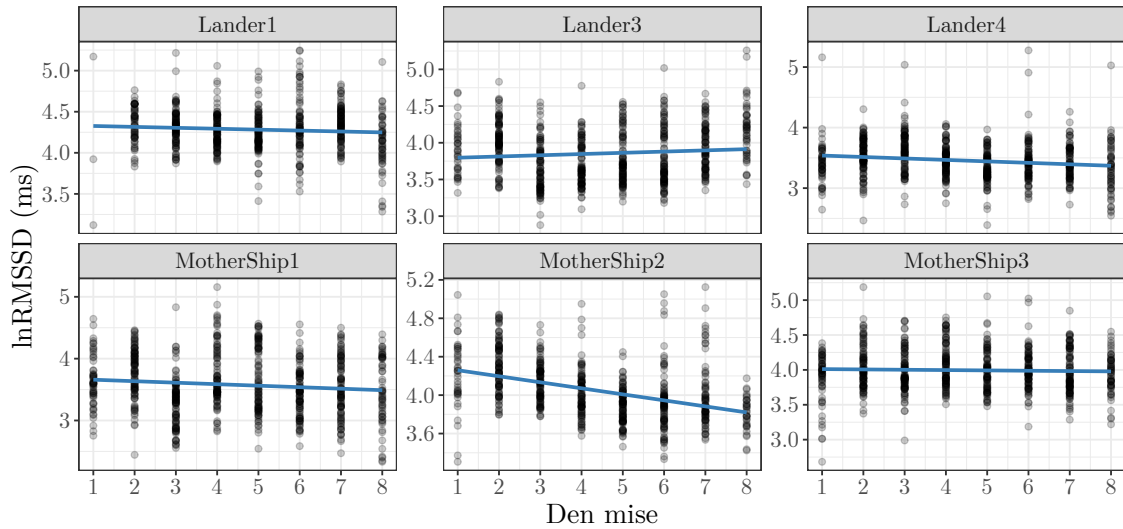
(b) Pro parametr RMSSD

**Obrázek 5.9:** Vizualizace odhadů (fixních efektů) navržených modelů



**Obrázek 5.10:** Grafická reprezentace modelu pro parametr SD2 na individuální úrovni



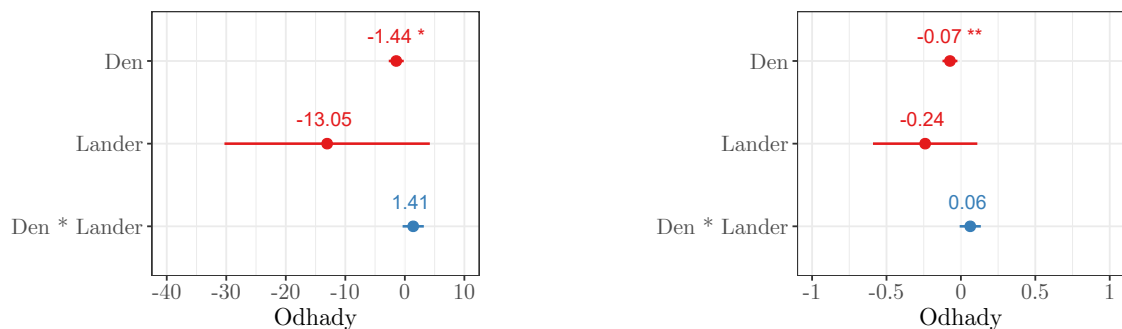


**Obrázek 5.11:** Grafická reprezentace modelu pro parametr RMSSD na individuální úrovni

V Tabulce 5.6 jsou uvedeny výsledky modelování pro parametry pNN50 a HF. V tabulkách opět označuje proměnná  $N_{id}$  počet pozorovaných subjektů. Byly vytvořeny i grafické reprezentace fixních efektů pro každý model zvlášť včetně příkladů grafů modelů lineárních smíšených efektů v rámci každého subjektu. Všechny grafy jsou uvedeny v návaznosti na příslušnou tabulku výsledků LMM.

**Tabulka 5.6:** Fixní efekty lineárních smíšených modelů pro parametry pNN50 a HF

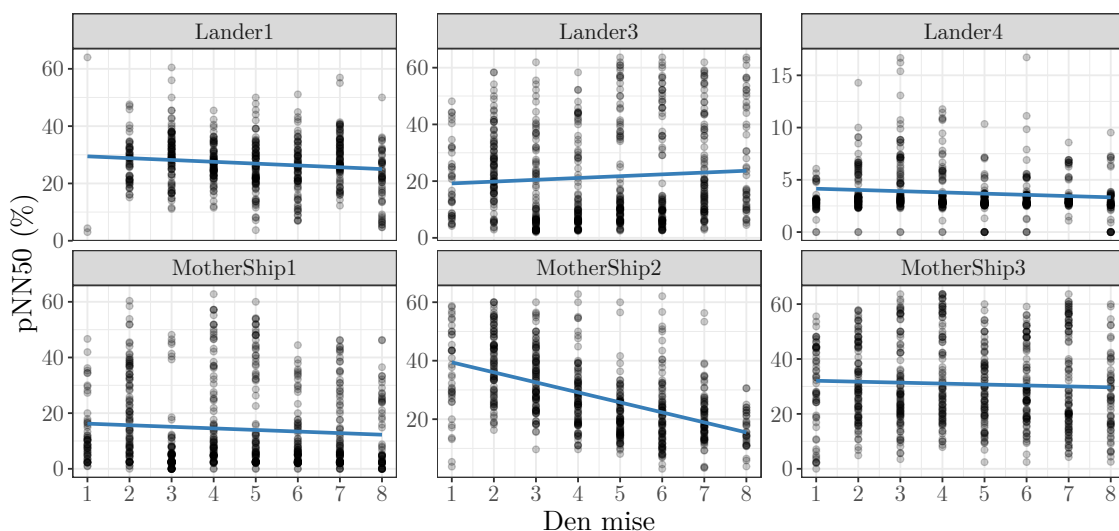
Prediktor	pNN50			lnHF		
	Odhad	95% CI	<i>p</i>	Odhad	95% CI	<i>p</i>
(Intercept)	30,69	18,50 – 43,88	<0,001	-3,32	-3,57 – -3,07	<0,001
Den	-1,44	-2,70 – -0,19	<b>0,024</b>	-0,07	-0,12 – -0,02	<b>0,004</b>
Skupina Lander	-13,05	-30,30 – 4,20	0,138	-0,24	-0,59 – 0,11	0,179
Den × skupina Lander	1,41	-0,38 – 3,19	0,122	0,06	0,01 – 0,13	0,083
$N_{id}$	6			6		
Počet pozorování	3874			3974		



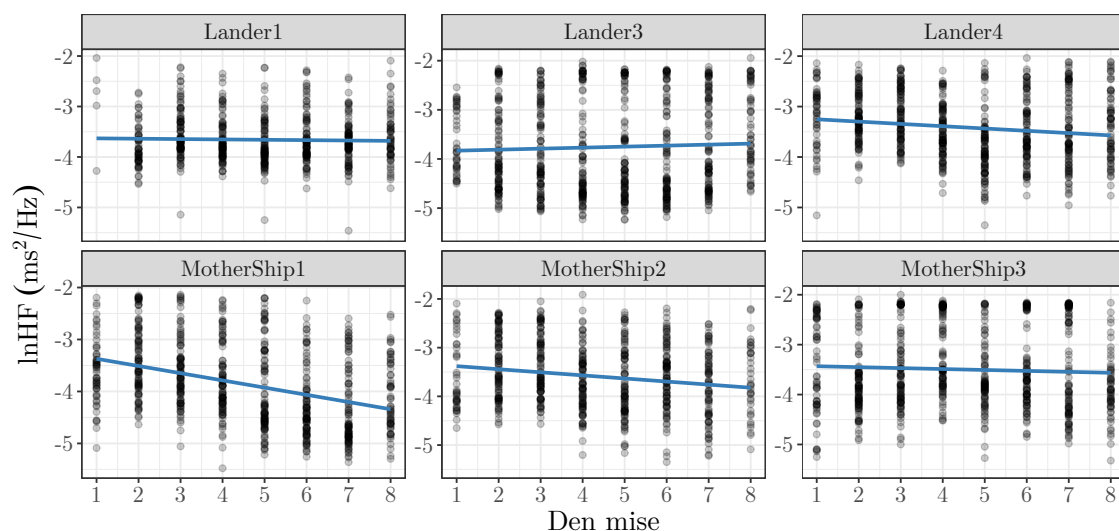
(a) Pro parametr pNN50

(b) Pro parametr HF

**Obrázek 5.12:** Vizualizace odhadů (fixních efektů) navržených modelů



Obrázek 5.13: Grafická reprezentace modelu pro parametr pNN50 na individuální úrovni



Obrázek 5.14: Grafická reprezentace modelu pro parametr HF na individuální úrovni

## 5.3 Modely pro hodnocení kognitivní zátěže

V této sekci jsou prezentovány výsledky části strojového učení. Nejprve jsou uvedeny výsledky trénování modelů využitím navržené metody pro hodnocení kognitivní zátěže (viz sekce 4.6). Výsledky jsou uvedeny zvláště pro každý benchmarkovací dataset a poté pro sjednocené datasety. Popis jednotlivých datasetů se nachází v sekci 4.2.

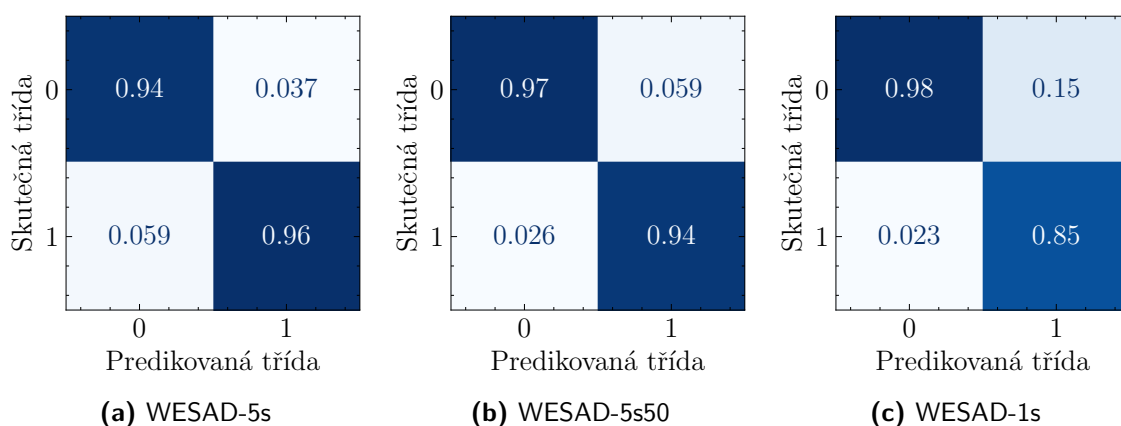
Poslední dvě části sekce jsou věnovány porovnání navrženého řešení se současným stavem a experimentálnímu ověření řešení. Ověření je realizováno na datech z analogové vesmírné mise DIANA, konkrétně na úsecích, kdy byl subjekt podroben NPF stimulaci. Všechny experimenty jsou součástí přílohy diplomové práce.

### 5.3.1 Hodnocení přesnosti modelů pro WESAD

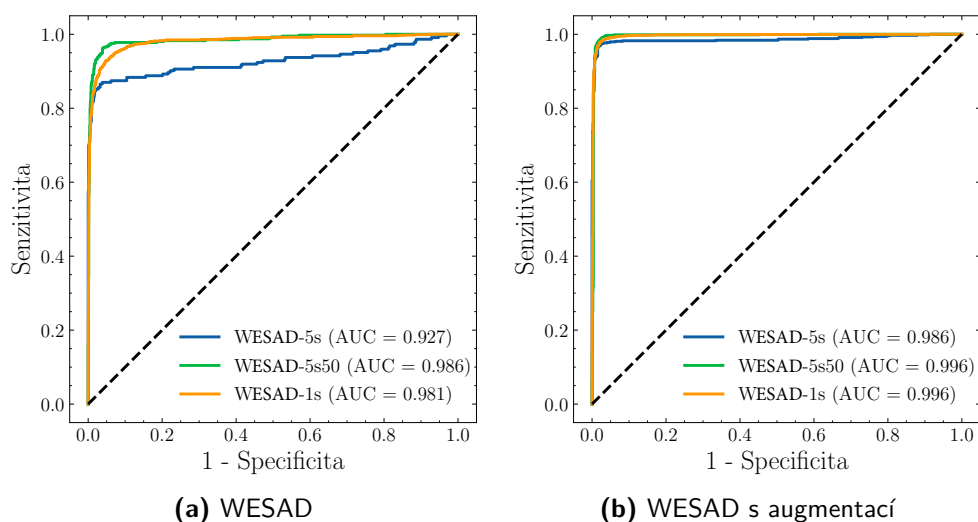
V této sekci jsou uvedeny výsledky z trénování modelů na datasetu WESAD v podobě vybraných hodnotících metrik (viz sekce 4.7.5), matic záměn a ROC křivek. Matice záměn byly normalizovány na relativní četnosti v rámci sloupců. Matice pro augmentované (Aug.) verze datasetů jsou uvedeny v Příloze B.

**Tabulka 5.7:** Výsledky hodnocení přesnosti modelů WESAD (Acc. = přesnost)

Model	Aug.	Acc.	Test acc.	TPR	TNR	AUC
WESAD-5s	Ne	99,75 %	95,46 %	95,21 %	90,07 %	0,926
	Ano	99,91 %	97,73 %	97,51 %	97,54 %	0,986
WESAD-5s50	Ne	99,93 %	96,84 %	95,63 %	94,57 %	0,986
	Ano	99,97 %	98,25 %	98,06 %	98,06 %	0,996
WESAD-1s	Ne	99,45 %	95,25 %	91,60 %	93,81 %	0,981
	Ano	99,73 %	96,66 %	95,61 %	95,23 %	0,996



**Obrázek 5.15:** Matice záměn pro WESAD modely (0 = klidový stav, 1 = CL stav)



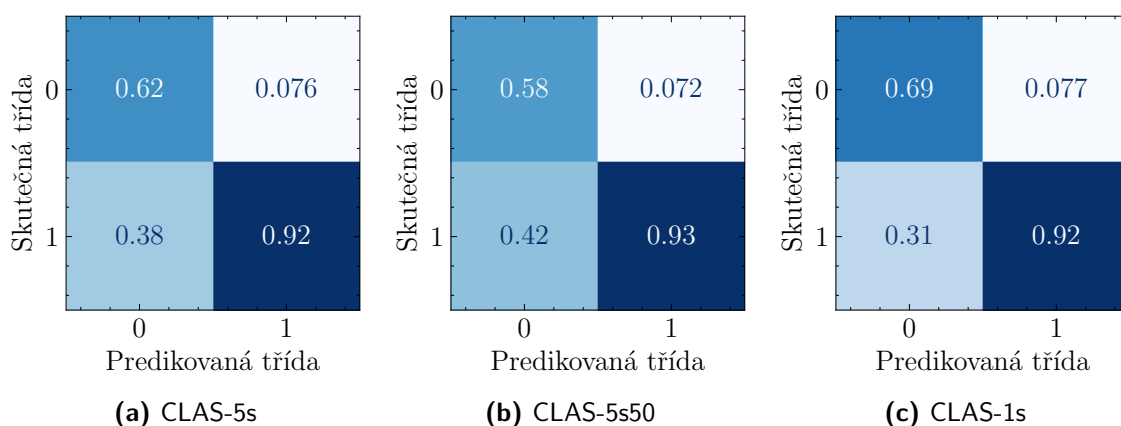
**Obrázek 5.16:** ROC křivky pro WESAD modely

### 5.3.2 Hodnocení přesnosti modelů pro CLAS

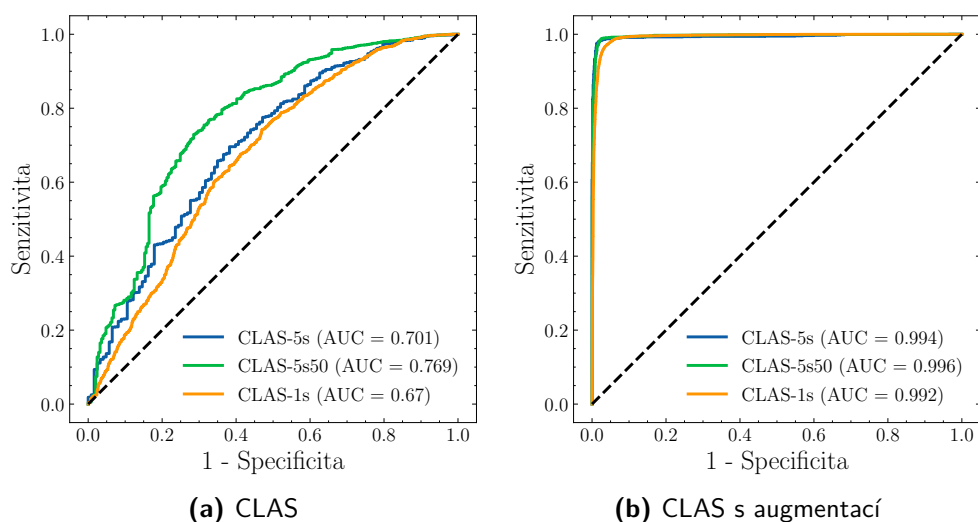
V této sekci jsou uvedeny výsledky z trénování modelů na datasetu CLAS v podobě vybraných hodnotících metrik (viz sekce 4.7.5), matic záměn a ROC křivek. Matice záměn byly normalizovány na relativní četnosti v rámci sloupců. Matice pro augmentované (Aug.) verze datasetů jsou uvedeny v Příloze B.

**Tabulka 5.8:** Výsledky hodnocení přesnosti modelů CLAS (Acc. = přesnost)

Model	Aug.	Acc.	Test acc.	TPR	TNR	AUC
CLAS-5s	Ne	99,35 %	91,79 %	77,67 %	54,14 %	0,994
	Ano	99,91 %	97,45 %	97,21 %	97,17 %	0,994
CLAS-5s50	Ne	99,43 %	92,17 %	75,99 %	57,68 %	0,756
	Ano	99,89 %	97,87 %	97,66 %	97,65 %	0,996
CLAS-1s	Ne	97,91 %	92,04 %	81,29 %	53,67 %	0,667
	Ano	98,21 %	96,55 %	96,46 %	96,46 %	0,992



**Obrázek 5.17:** Matice záměn pro CLAS modely (0 = klidový stav, 1 = CL stav)



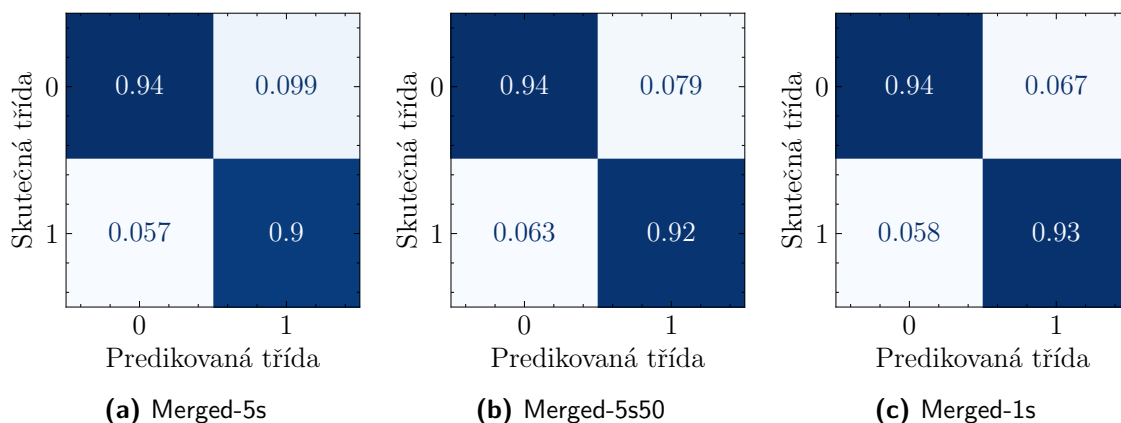
**Obrázek 5.18:** ROC křivky pro CLAS modely

### 5.3.3 Hodnocení přesnosti modelů pro sjednocená data

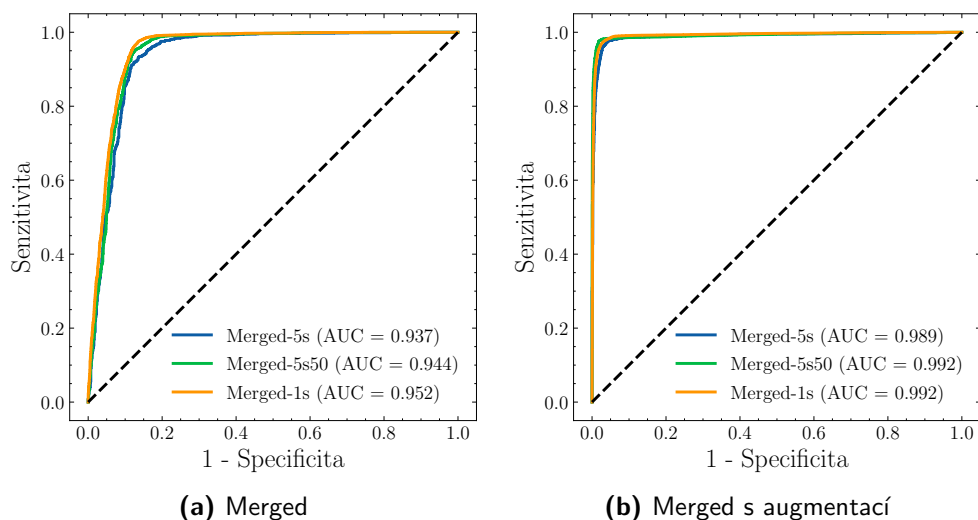
V této sekci jsou uvedeny výsledky z trénování modelů na sloučených datasetech (dále jen Merged) v podobě vybraných hodnotících metrik (viz sekce 4.7.5), matic záměn a ROC křivek. Matice záměn byly normalizovány na relativní četnosti v rámci sloupců. Matice pro augmentované (Aug.) verze datasetů jsou v příloze B.

**Tabulka 5.9:** Výsledky hodnocení přesnosti modelů Merged (Acc. = přesnost)

Model	Aug.	Acc.	Test acc.	TPR	TNR	AUC
Merged-5s	Ne	98,65 %	91,96 %	92,16 %	88,63 %	0,937
	Ano	99,74 %	96,16 %	95,89 %	95,90 %	0,989
Merged-5s50	Ne	98,81 %	92,96 %	92,91 %	90,70 %	0,944
	Ano	99,73 %	97,55 %	96,99 %	96,88 %	0,991
Merged-1s	Ne	96,65 %	93,61 %	93,77 %	91,99 %	0,952
	Ano	99,16 %	97,24 %	97,13 %	97,12 %	0,992



**Obrázek 5.19:** Matice záměn pro Merged modely (0 = klidový stav, 1 = CL stav)



**Obrázek 5.20:** ROC křivky pro Merged modely

### 5.3.4 Srovnání na úrovni použitých modalit

V následující tabulce jsou uvedeny výsledky z trénování na sloučených datasetech (Merged-5s) s různými kombinacemi modalit pro účely porovnání jejich významnosti.

**Tabulka 5.10:** Výsledky hodnocení důležitosti využitých modalit pro hodnocení kognitivní zátěže v rámci modelu Merged-5s (Acc. = přesnost)

Modality	Acc.	Test acc.	TPR	TNR	AUC
EKG, RSP, EDA	98,65 %	91,96 %	92,16 %	88,63 %	0,937
EKG, RSP	96,17 %	90,52 %	84,88 %	74,52 %	0,865
EKG, EDA	97,41 %	91,75 %	87,91 %	79,89 %	0,895
EKG	95,99 %	89,57 %	77,31 %	76,05 %	0,766
RSP	91,47 %	87,96 %	50,12 %	50,06 %	0,511
EDA	92,23 %	89,07 %	42,68 %	45,46 %	0,519

### 5.3.5 Srovnání se současným stavem

Navržené řešení v této práci bylo porovnáno s vybranými dosavadními přístupy, jež využívají strojového učení pro rozpoznání kognitivní zátěže. Srovnání lze vidět v Tab. 5.11. Všechna řešení využívají minimálně jednu modalitu (primárně EKG).

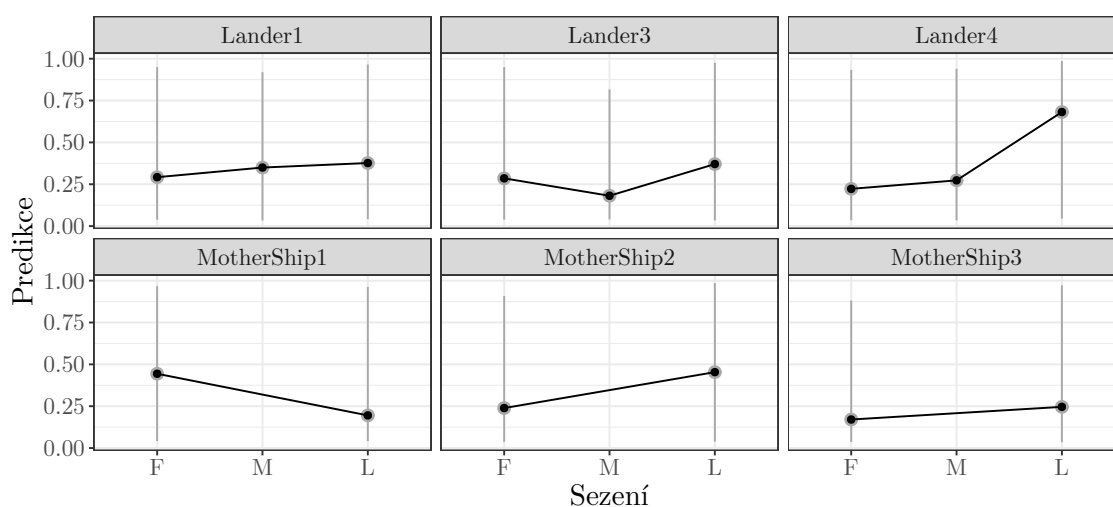
**Tabulka 5.11:** Výsledky srovnání s dosavadními přístupy

Autor	Dataset	Okno	Test acc.	Rok
Feradov et al. [233]	CLAS	30s	84 %	2020
Ahmad et al. [234]	WESAD	1s	72 %	2021
Garg et al. [235]	WESAD	10s	84 %	2021
Rabbani et al. [236]	WESAD	10s	87 %	2022
Zhu et al. [237]	CLAS	30s	86 %	2022
*Quadrini et al. [238]	WESAD	60s	91 %	2022
Chatterjee et al. [239]	WESAD	30s	94 %	2022
Dair et al. [240]	WESAD	10s	69 %	2023
Rashid et al. [241]	WESAD	30s	93 %	2023
Galarraga et al. [242]	WESAD	20s	90 %	2023
Henry et al. [243]	WESAD	6s	81 %	2023
*Yong et al. [244]	CLAS	5s	75 %	2023
Singh et al. [245]	WESAD	5s	91 %	2023
<b>Autor práce</b>	<b>WESAD</b>	<b>5s</b>	<b>97 %</b>	<b>2023</b>
<b>Autor práce</b>	<b>CLAS</b>	<b>5s</b>	<b>92 %</b>	<b>2023</b>
<b>Autor práce</b>	<b>WESAD</b>	<b>1s</b>	<b>95 %</b>	<b>2023</b>
<b>Autor práce</b>	<b>WESAD</b>	<b>1s</b>	<b>92 %</b>	<b>2023</b>

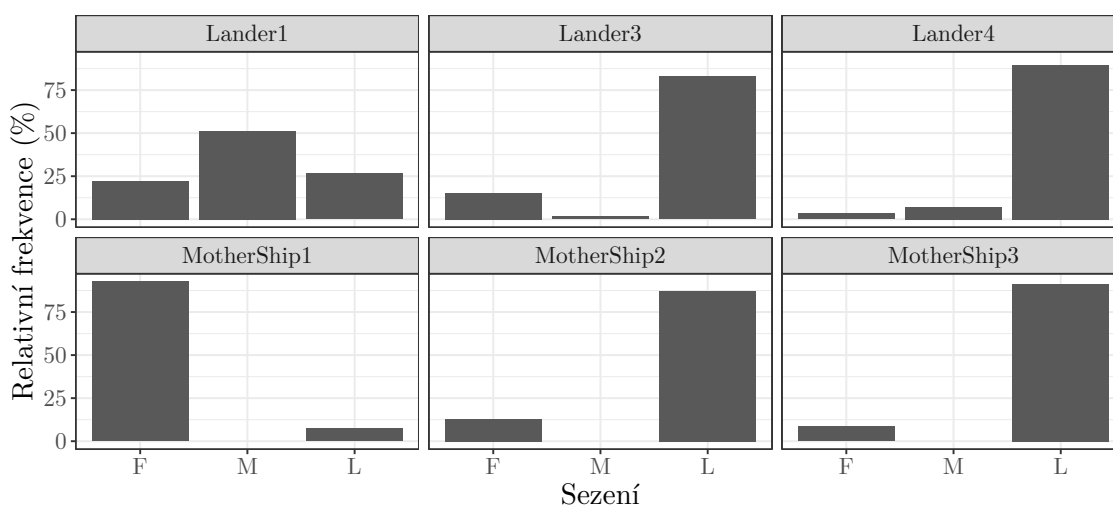
\* Označuje řešení, ve kterých bylo využito GAF příznaků

### 5.3.6 Testování na datech z mise DIANA

Navržené řešení pro hodnocení kognitivní zátěže bylo otestováno na datech z analogové vesmírné mise. K testování byl využit model WESAD-5s. Metoda byla aplikována konkrétně na úseky dat v době NPF stimulace. Označení sezení (F, M, L) odpovídají sekci 5.2.1. Na Obr. 5.21 lze vidět bodové rozsahy, přičemž šedý rozsah představuje minimum a maximum a bod vyjadřuje průměrnou pravděpodobnost výskytu kognitivní zátěže pro dané sezení. Na Obr. 5.22 jsou ilustrovány relativní četnosti pravděpodobností výskytu kognitivní zátěže vyšších než 50 %. Tyto ilustrace slouží pouze k vizuálnímu porovnání vztahu s výsledky v sekci 5.2.1 a dále budou rozebrány v diskuzi.



**Obrázek 5.21:** Průměr, minimum a maximum (šedý rozsah) pravděpodobností výskytu kognitivní zátěže pro jednotlivá sezení využitím modelu WESAD-5s



**Obrázek 5.22:** Relativní frekvence pravděpodobností výskytu kognitivní zátěže vyšších než 50 % pro jednotlivá sezení využitím modelu WESAD-5s

---

## Diskuse

Diplomová práce se zabývá hodnocením kognitivní zátěže z periferních biosignálů získaných v průběhu vesmírné analogové mise studující vliv izolace na člověka. Měřenými biosignály byly zejména elektrická srdeční, respirační a elektrodermální aktivita. Pro účely hodnocení kognitivní zátěže představuje tato práce nový multimodální přístup. Experimentální část, realizované dílčí části práce a jejich výsledky jsou rozebrány v této kapitole na několika úrovních.

**Analogová vesmírná mise** Extrémním prostředím je v kontextu diplomové práce myšlen vesmír vzhledem k charakteru experimentální části práce, která je popsána v sekci 4.1. Šesti členná posádka podstoupila po dobu osmi dní experiment v podobě analogové vesmírné mise, která simulovala přistání na měsíci. Posádka byla rozdělena na dvě tříčlenné skupiny, mateřskou loď a přistávací modul. Členové přistávacího modulu absolvovaly experiment v hyperbarickém saturačním prostředí ve formě podvodní laboratoře Hydronaut H03 DeepLab (viz sekce 4.1.5), kde žili a plnili celodenní úkoly po celou dobu mise. Úkoly zahrnovaly extravehikulární aktivity, nepřetržitou komunikaci s mateřskou lodí a řídicím střediskem, provádění výzkumu a další činnosti, jež byly analogické operačním požadavkům a rizikům spojeným s kosmickými lety a misemi. Mise proběhla bez významných komplikací.

Zpětně lze říci, že analogová mise DIANA vykazovala vysokou míru provozní a infrastrukturní robustnosti a použitelnosti. To plyne primárně z rozsáhlých zkušeností týmu projektu Hydronaut a z integrace vybraných odborníků a studentů do jednotlivých kompartmentů mise. Experimentu také předcházela pečlivá a včasná příprava technických aspektů včetně specializovaných IT systémů pro její podporu. Mise DIANA přinesla bohaté zkušenosti, které je třeba zvážit a zahrnout do budoucích experimentů. Vzhledem k tomu, že jednou z myšlenek projektu Hydronaut je využití výzkumného prostředí Hydronaut H03 DeepLab pro výcvik budoucích astronautů, přichází v úvahu srovnání s NASA NEEMO podmořskou výzkumnou laboratoří Aquarius, kde každoročně probíhají analogové vesmírné mise. Experiment probíhal



---

pod režii FF UPOL a tudíž se orientoval primárně na psychologický výzkum. Pro potřeby diplomové práce nebo širšího biomedicínského výzkumu tak nebylo experimentální nastavení příliš vhodné. To hlavně z hlediska nezahrnutí dostatečného sběru biomedicínských dat před a po experimentu samotném. Tím pádem je možná analýza pouze dat získaných v průběhu bez možnosti porovnání se stavem před a po saturačním ponoru. Na rozdíl ale od NASA NEEMO experimentů [34], kde měří vybrané veličiny pouze v určité dny a časové úseky, byla měřena biomedicínská data každý den nepřetržitě. To může poskytovat jistou výhodu v náhledu do vývoje fyziologie v průběhu adaptace organismu na extrémní prostředí. Avšak takové kvantum získaných dat je na druhou stranu velmi časově náročné zpracovat a anotovat. Proto anotace v rámci diplomové práce nebyla realizována a pro vyhodnocení vlivu úloh navozujících zvýšenou kognitivní zátěž bylo postačující označení úseků, ve kterých byli jedinci podrobni baterii testů (viz sekce 4.1.7). K anotaci budou v budoucnu včetně harmonogramu sloužit kamerové záznamy, které byly pořízeny v průběhu celé mise. Naskytuje se tak možnost využití kamerových záznamů pro tvorbu anotačních nástrojů, které by mohli do jisté míry automatizovat a usnadnit tento proces. Dále by bylo vhodné zvážit rozšíření experimentálního protokolu o měření dalších biomedicínských dat, která využívá v experimentech NASA pro zkoumání adaptace člověka na vícedenní hyperbarickou saturaci [34]. Jedná se například o monitorování periferní a cerebrovaskulární hemodynamiky, tělesné kompozice a teploty nebo kvality spánku.

V neposlední řadě je třeba poukázat na problémy se sběrem biomedicínských dat v průběhu mise. Umístění senzorů lze vidět v sekci 4.1.8.2 na Obr. 4.6. Pro měření elektrické srdeční aktivity byly používány nalepovací elektrody, které poměrně často vysychaly a bylo tak nutné dodatečně používat vodivý gel a další fixaci pomocí kineziologických pásek. Vhodnou alternativou by mohlo být použití textilních elektrod, jejichž vývoj je v posledních letech velmi dynamický. Zároveň přináší výhodu opakovatelného použití, mytí a biokompatibility. Některé studie dokonce ukazují vyšší odolnost vůči pohybovým artefaktům než je tomu tak u standardních Ag/AgCl elektrod [246, 247]. Dále nastával problém s nežádoucím posunem dechového pásu, který se ale vyřešil použitím kšand. Měření kožní vodivosti mimo laboratorní podmínky je velmi náročné samo o sobě vzhledem k velké citlivosti na pohybové artefakty. Pro potřeby experimentu nepřicházeli běžné umístění elektrod na prsty rukou v úvahu. Bylo tak zvoleno alternativní místo na základě studie [146]. Elektrody byly lepeny v úrovni mečovitého výběžku sternu v oblastech mezi sternální a parasternální čarou na levé i pravé straně. Během spánku se také stávalo, že si jedinec přilehl či odpojil kabely z měřícího zařízení nebo došlo k jeho vybití. Vyskytlo se tak dilema, zdali je vhodné jedince budit nebo přečkat do jeho probuzení. Veškeré tyto zkušenosti by měly být využity a zohledněny v dalších iteracích vývoje měřícího systému pro účely analogových vesmírných misí.

---

**Zpracování dat** Metodika, která byla aplikována pro zpracování dat z mise DIANA je popsána v sekci 4.4. Samotnému zpracování biosignálů předcházela výběr vhodné metody předzpracování signálu a detekce komponentů. To se týkalo především elektrické srdeční aktivity vzhledem k hojnému počtu existujících metod pro její zpracování. Neexistuje však žádný konsensus ohledně toho, kterou z nich použít nebo která je nejlepší pro danou aplikaci. Je pravděpodobné, že všechny mají nějaké silné a slabé stránky. Běžně se pro účely hodnocení těchto metod využívají datové sady, ve kterých jsou expertem anotovány jednotlivé komponenty, v tomto případě R vlny. Hodnocení tedy logicky probíhá na základě odchylky detekované R vlny od referenční anotované R vlny. Poslední studie [110], která se věnuje rozsáhlejšímu porovnání populárních metod, využívá pro hodnocení tradiční metriky, jako je senzitivita a přesnost. Zároveň se vyhrazuje pouze na jednu databázi, což může být zavádějící z hlediska generalizace. Studie [110] ve výsledku prezentuje jako nejlepší metodu, se kterou přišli Elgendi et al. [231]. V této práci bylo porovnání metod provedeno využitím statistického modelování v rámci několika datových sad (viz sekce 4.3.1.1). Výsledky prezentované v Tabulce 5.1 ukazují, že nejlepšími výsledky dosáhla metoda, kterou představili autoři Kalidas et al. [188]. Rozdíly mohou být způsobeny právě použitím více databází a modelování s ohledem na jejich hierarchickou strukturu pomocí lineárních smíšených modelů. I přestože se jedná o poměrně rozsáhlý způsob srovnání, tak se postupem práce ukázalo, že výběr nejlepší metody takovým způsobem nemusí být úplně vhodný. To se týká především datových sad, které byly použity pro strojové učení (viz sekce 4.2). V rámci datové sady CLAS vybraná metoda předzpracování nefungovala u značného množství záznamů zdaleka tak dobře, jako u datové sady WESAD. To se dále projevovalo přeučení modelů, které zahrnovaly datovou sadu CLAS.

V návaznosti na problematiku zvolení vhodných metod pro zpracování biosignálů se dále vyskytl poměrně zásadní problém v rámci hodnocení kvality signálu. To úzce souvisí s výběrem sledovaných veličin v této práci. Představa manuální inspekce kvality signálů u záznamů z mise se jevila jako nereálná (8 dní záznamů), a proto přicházelo v úvahu tento proces do určité míry automatizovat. V rámci literatury se vyskytuje poměrně velké množství metod pro evaluaci kvality EKG signálu, a to i veřejně dostupných [248, 249]. Postup hodnocení uplatněný v této práci je popsán v sekci 4.4.1. Problém však nastal u hodnocení kvality respirační a elektrodermální aktivity, pro jejichž hodnocení nejsou k dispozici žádné veřejně dostupné nástroje. Z časových důvodů nebyl ani realizován žádný vlastní nástroj. Data tohoto charakteru proto byla použita pouze v rámci úloh strojového učení, nikoliv pro část práce, která se věnuje statistické analýze spojené s hodnocením NPF změn v průběhu mise.

**Analýza dat mise** Logistika mise a bezpečnost přirozeně omezily počet subjektů v rámci měření dat s analýzou a i ve schopnosti vyvozovat statisticky významné závěry. Zároveň pouhé zastoupení mužů omezuje extrapolaci zjištění mezi pohlavími.

---

Ohled je třeba brát také na porovnání skupin, jelikož se u skupiny přistávacího modulu jednalo o trénované certifikované potápěče. Popis posádky mise společně s metodikou jejího výběru se nachází v kapitole 4.1. K analýze dat bylo včetně grafických metod, jako jsou bodové rozsahy nebo krabicové grafy, využito lineárních smíšených modelů (viz sekce 4.4.5).

Ačkoli nelze hovořit o statisticky signifikantních rozdílech, tyto modely poskytují určitý pohodlný vhled do objemných dat mise. Pro odhady smíšených modelů má zvláštní význam to, že pro praktické účely musí existovat přiměřený počet úrovní náhodných efektů [250]. To je v případě experimentu s šesti subjekty splněno [251]. Následně bylo možné využít odhady smíšených modelů k vytvoření obrazu o průběhu změn sledovaných veličin na úrovni dnů, skupin a i jednotlivých subjektů. Pokud se vrátíme k otázce statistické významnosti, je třeba si uvědomit, že je nutno se orientovat dle síly modelu, jež vypovídá o pravděpodobnosti odhalení účinku zájmu, pokud skutečně existuje. Stejně jako v případě t-testů, kde byla prokázána přijatelná statistická síla v rámci extrémně malých velikostí vzorků [252], je možné takových charakteristik dosáhnout i u LMM [253]. To se mimo jiné odvíjí od designu samotného modelu. Není tedy namístě při malém počtu subjektů ihned zavrhnout významné výsledky modelu. V případě modelů navržených v této práci byla analyzována i jejich síla (viz sekce 4.4.5). Síla modelů však podle předpokladů vycházela v rozmezí 45–65 %, což je pravděpodobně způsobeno jeho složitějším designem společně s dolní hranicí počtu smíšených efektů. V této práci nebyly vysloveny žádné konkrétní hypotézy, tak tomu ale nemusí být v případě budoucích experimentů, které se budou potýkat s podobnými omezeními. NASA například u svých NEEMO experimentů, kde se počet subjektů pohybuje kolem deseti, využívá tradičních metod (t-testy, korelace, ANOVA, aj.) nebo jen popisné statistiky [34, 254]. Zdůrazňuje i limitaci schopnosti vyvozovat relevantní statistické závěry na základě takových dat [34]. NASA však provádí tyto experimenty pravidelně každý rok a zároveň má k dispozici data před a po vesmírných letech, která nejsou veřejnosti dostupná. Vzniká tak každopádně prostor pro návrh metodiky statistického „ad-hoc“ hodnocení ICE experimentů s ohledem na jejich stěžejní specifika.

**Srdeční a autonomní regulace** U subjektů Lander1, MotherShip1 a MotherShip3 nedocházelo v průběhu mise u hodnoty SD2 k výrazným změnám, až na třetí den kdy došlo u MotherShip1 k viditelnému poklesu a stejně jako poslední den u Lander1. U Lander3 došlo k poklesu třetí den a následně k růstu hodnoty SD2 až do konce mise. Lander4 vykazoval růst parametru do třetího dne, po kterém SD2 také klesal do konce. V rámci MotherShip2 si parametr SD2 udržoval klesající trend v průběhu mise. Vývoje parametru SD2 prezentuje Obr. 5.1. Průměrné hodnoty parametru SD2 pro vybrané dny jsou uvedeny v Tabulce 5.2.

---

Parametr RMSSD nevykazoval výrazné změny oproti vývojem parametru SD2. Pouze u Lander1 došlo k viditelnějšímu poklesu poslední den, kterému předcházela vyšší vzrůst. Vývoje parametru RMSSD jsou uvedeny na Obr. 5.2. Průměrné hodnoty parametru RMSSD společně se směrodatnými odchylkami pro vybrané dny jsou uvedeny v Tabulce 5.2.

U pNN50 byly pozorovány výrazně stabilnější vývoje než u předchozích metrik. Denní výkyvy byly u všech subjektů menší a trendy byly zachovány. Mediánové průběhy pNN50 lze vidět na Obr. 5.2 a průměrné hodnoty pro první, čtvrtý a osmý den jsou uvedeny v Tabulce 5.2.

Proměnná HF zachovává podobný průběh s předšlými parametry pouze pro jedince MotherShip3. MotherShip1 a MotherShip2 vykazují klesající charakter parametru po prvním dnu. U Lander1 drží stabilní hodnoty kromě náhlého vzrůstu třetí den. Lander3 má klesající vývoj do čtvrtého dne, od kterého dochází k růstu parametru až do konce mise. Lander4 má stejný vývoj jako Lander3 jen klesání lze pozorovat až do 5 dne. Průběhy HF je možné pozorovat na Obr. 5.2 a průměrné hodnoty parametru pro začátek, střed a konec mise jsou uvedeny v Tabulce 5.2.

U všech sledovaných veličin dochází průměrně napříč dny k jejich poklesu, přičemž jsou tyto poklesy menší u skupiny přistávacího modulu než u mateřské lodi (viz Tabulky 5.5 a 5.6). Velikost rozdílů je však relativně malá. Odhady fixních efektů referovaných tabulek jsou vyneseny na Obr. 5.9 a 5.12. Vizualizace LMM je pro SD2 a RMSSD na Obr. 5.10 a 5.11. Pro pNN50 a HF na Obr. 5.13 a 5.14.

Po saturačním ponoru lze u skupiny přistávacího modulu pozorovat v rámci bodových rozsahů jistý trend. Například u HF má tento trend v prvních dnech klesající charakter a následně do konce mise je rostoucí. Nabízí se tak myšlenka toho, že po prvním vystavení hyperbarickému prostředí by mohlo dojít k akutní stresové reakci, která by způsobila snížení HF v důsledku zvýšené aktivity sympatiku. Následně po aklimatizaci subjektu na hyperbarické podmínky může dojít k obnovení nebo zvýšení HF, protože převládne parasympatický systém [255–258]. Pozorované změny jsou ale velmi malé (nevýznamné), což díky měřítku nemusí ihned vyplývat z bodových rozsahů (viz Obr. 5.1– 5.4). Vypovídají o tom spíše statistické modely v sekci 5.2.2. To platí pro všechny parametry. Minimální výkyvy na reakci prostředí jsou v souladu s faktem, že se jedná o trénované potápěče. U skupiny mateřské lodi lze pozorovat klesající charakter sledovaných veličin v průběhu mise. Rozdíly ale opět nejsou významné. Vzhledem k chybějícím datům před a po experimentu nelze učinit další závěry o vlivu hyperbarického prostředí.

Obecně byla četnými studiemi prokázána zvýšená parasympatická a potlačená sympatická modulace [255–258]. Současné poznatky tak v případě prostředí hyperbarické saturace vypovídají o stimulaci vagové modulace, snížení HR, zvýšení variability R–R intervalů a zvýšení HF [259]. Další studie zároveň poukazují

---

na zvýšení parametrů RMSSD, pNN50 nebo SD2 [34, 255, 257, 258]. Zvýšená vagová modulace v hyperbarickém prostředí je přisuzována jak zvýšenému obsahu  $O_2$ , tak zvýšenému tlaku (nezávisle na  $O_2$ ) [34, 256]. Mechanismy pro tuto vagovou odezvu jsou připisovány vagové aktivitě kompenzující nedostatek kyslíku, vazokonstrikci (baroreflex), zvýšenou srdeční účinností v důsledku vystavení zvýšenému  $PPO_2$  v srdeční tkáni, prodloužením Q–T intervalu nebo inhibicí karotického chemoreflexu [34, 259, 260]. Otázkou zůstává, zdali je možné vlivem hyperbarického prostředí „saturovat“ HRV parametry, které se běžně využívají k hodnocení kognitivní zátěže, a učinit tak jejich interpretaci pro tuto úlohu sštějn.

**Neuropsychofyziologická regulace** Během vesmírné analogové mise DIANA podstoupil každý subjekt dvě až tři sezení, během kterých byl podroben baterii kognitivních testů (viz sekce 4.1.7). Vypočtené sledované veličiny pro jednotlivá sezení jsou pro každého člena posádky vyneseny na Obr. 5.5 až 5.8 v podobě krabicových grafů. Průměrné hodnoty parametrů pro každé sezení jsou uvedeny v Tabulce 5.3 a 5.4. U subjektů Lander3 a MotherShip1 lze každé sezení sledovat vzrůstající trend parametrů SD2, RMSSD a pNN50. Pouze u HF klesající. Studie [73, 75, 201] uvádí, že v reakci na kognitivní zátěž dochází ke snížení sledovaných parametrů. To vyplývá také z modelu neuroviscerální integrace, jež je popsán v sekci 2.3. U těchto subjektů je tedy možné usuzovat zlepšení kognitivní výkonnosti v průběhu mise. To však není v souladu s průběhem složky HF, která podle [261] vypovídá o adaptaci jedince na měnící se požadavky prostředí. Její redukce by mohla naznačovat nedostatečnou schopnost jedince flexibilně reagovat na environmentální nároky a tedy vypovídat o jistém konfliktu na úrovni kognitivní regulace v rámci ICE prostředí [140, 261]. Naopak u subjektů MotherShip2 a MotherShip3 bylo pozorováno snížení všech parametrů mezi sezeními, a tudíž by šlo hovořit o zhoršení kognitivní výkonnosti v průběhu mise. U subjektů Lander1 a Lander4 dochází k minimálním změnám, které naznačují, že ke zlepšení došlo pouze u prostředního sezení (časově uprostřed mise). Sledované veličiny, variabilita srdečního rytmu a její regulace byly popsány v kapitole 2.4.

Při vyhodnocení vlivu úloh navozujících zvýšenou kognitivní zátěž pomocí sledovaných veličin, neboli časových, frekvenčních a nelineárních parametrů, nastává však zásadní problém z hlediska interpretace. Jak již bylo řečeno v úvodu práce, veškeré kognitivní funkce se promítají do fyziologie člověka. Sekce 2.4.2 poukazuje na pragmatické problémy, jako je nejasnost asociace HRV ukazatelů s fyziologickými mechanismy nebo podobnosti a překryvy mezi množstvím z těchto metrik. Další otázkou je, zdali při dlouhodobém pobytu lidského organismu ve vesmíru lze z hlediska smyslu a podstaty předpokládat stálost těchto parametrů pro účely hodnocení CL. V ideálním případě by bylo vhodné realizovat systematické porovnání vypočtených parametrů pro každého jedince a inkorporovat metody, například z oborů

---

analýzy dat genové exprese, které se zabývají klasifikací velkého souboru objektů podle přirozených vztahů. Jednou z takových metod je konsenzuální shlukování [262], které vychází z představy, že provedení nekonečného počtu shlukovacích algoritmů odhalí „skutečné“ shluky. V rámci aplikace této metody na soubor fyziologických parametrů by bylo následně možné z pravděpodobnostní perspektivy nahlédnout nejen na asociace a vztahy mezi jednotlivými parametry, ale také na jejich fyziologický smysl. Na druhou stranu se jedná o poměrně časově a datově náročné řešení včetně nezbytnosti zahrnutí NVI modelu.

**Hodnocení kognitivní zátěže** Pro potřeby této práce byl navržen nový multimodální přístup k hodnocení kognitivní zátěže z periferních biosignálu pojmenovaný *Hodnocení kognitivní zátěže využitím vícerozměrných časoprostorových kauzálních vzorů*. Metoda je popsána v samostatné kapitole 4.6. Celkem bylo natrénováno  $3 \times 6$  modelů na datasetech, jejichž popis je uveden v sekci 4.2. Bylo experimentováno i s augmentací dat (viz 4.5.3). Výsledky trénování na datasetu WESAD jsou uvedeny v sekci 5.3.1. Největší validační přesnost 98,25 % byla dosažena u augmentovaného modelu WESAD-5s50 (viz Tabulka 5.7). Natrénované modely pro dataset CLAS jsou prezentovány v sekci 5.3.2, přičemž nejvyšší testovací přesnosti 99,5 % dosáhl augmentovaný model CLAS-5s50 (viz Tabulka 5.8). Poslední sada modelů byla natrénována na sjednocených datasetech WESAD a CLAS. Tyto modely byly pojmenovány jako „Merged“ a jejich výsledky se nacházejí v sekci 5.3.3. Nejvyšší přesnosti 99,55 % dosáhl augmentovaný model Merged-5s50 (viz Tabulka 5.9).

Natrénované modely byly následně otestovány na datech z mise DIANA. Došlo k zjištění, že u modelu CLAS (tedy i Merged) došlo do jisté míry pravděpodobně k přeučení vzhledem ke špatné generalizaci. To je přisuzováno především nevhodnému předzpracování biosignálu, jak již vyplývá z dřívější části diskuze. Pro testovací účely byl tedy primárně zvolen model WESAD-5s. Výsledek testování lze vidět v sekci 5.3.6 na Obr. 5.21. V případě tohoto výsledku jsou zájmem primárně vzniklé trendy, které mají v drtivé většině případů inverzní charakter v porovnání s výsledky NPF stimulace (modré čárkované trendy na Obr. 5.5– 5.8). To je v souladu s očekáváním a tvrzeními o vlivu úloh navozujících zvýšenou kognitivní zátěž během mise v předešlých odstavcích. Osa  $y$  ale v této podobě není příliš intuitivní. Proto byl vytvořen Obr. 5.22, který prezentuje relativní četnosti výskytu pravděpodobností CL vyšších než 50 % pro jednotlivá sezení. Zde je již patrnější, během kterých sezení a v jaké míře byla zaznamenána kognitivní zátěž. Pro další a podrobnější testování generalizace je však nutné data detailněji anotovat. Protože byly cílem primárně 5s modely, je nutné v budoucích experimentech otestovat například i realizované 1s modely. Předběžné testy nevykazovaly přeučení 1s modelů (WESAD), což by mohlo znamenat, že lze CL hodnotit pouze z morfologického hlediska. Vzhledem k charakteru tvorby příznaků z biosignálu lze také předpokládat vysokou citlivost na šum a artefakty

---

(viz sekce 4.6). Je třeba dále poznamenat, že se jedná o pouhé „beta“ testy a modely, vzhledem k tomu, že nebyla věnována pozornost širší optimalizaci. I přes tento fakt bylo ve srovnání se současným stavem dosaženo velmi dobrých výsledků v rámci benchmarkovacích datasetů, což naznačuje, že navržené řešení je efektivnější a flexibilnější. Srovnání je uvedeno v Tabulce 5.11.

Velká část současných řešení využívá přístupy strojového učení založené na učení s učitelem nebo hlubokém učení (viz kapitola 2.6) [73]. V případě technik učení s učitelem lze hovořit o takzvaných „data-driven“ metodách, protože k hodnocení kognitivní zátěže využívají HRV parametry. To přináší omezení například v podobě délky časového úseku, které parametry potřebují pro svůj výpočet. Zároveň všechny tyto přístupy nezohledňují příčinné souvislosti mezi použitými příznaky. To činí interpretaci výsledků složitou, a proto jsou přístupy poměrně omezené při dalším zkoumání kauzálních vztahů mezi příznaky. Obvykle také tyto modely využívají po natrénování desítky milionů extrahovaných parametrů pro účely predikce. Realizované řešení se díky kapsulární neuronové síti dostává na řád tisíců. Přichází tak v úvahu i myšlenka embedded aplikací. Navržená metodika je detailně rozebrána v kapitole 4.6.

---

## Závěr

V diplomové práci byla realizována evaluace vlivu extrémního prostředí na projevy kognitivní zátěže v biosignálech. Byla analyzována data získaná v průběhu analogové vesmírné mise, studující vliv izolace na člověka. Pro účely analýzy byly využity popisné statistiky, vizuální metody v podobě bodových rozsahů nebo krabicových grafů a statistické modelování. Výsledky byly srovnány v rámci prostředí s vysokým a standardním atmosférickým tlakem.

Dále byl hodnocen vliv úloh navozujících zvýšenou kognitivní zátěž na elektrickou srdeční, dechovou a elektrodermální aktivitu společně s využitím časových, frekvenčních a nelineárních parametrů sledovaných signálů. Pro hodnocení bylo využito popisných statistik, krabicových grafů a navržené metody využívající metody strojového učení. Výsledky byly srovnány jak na úrovni posádek mateřské lodi a přistávacího modelu, tak i mezi jednotlivými subjekty.

Pro účely samotného hodnocení kognitivní zátěže bylo navrženo a realizováno multimodální řešení ve formě kapsulární neuronové sítě. Byla navržena metodika pro tvorbu fyziologických příznaků jakožto vstup pro neuronovou síť. Realizované řešení bylo otestováno na veřejně dostupných benchmarkovacích datasetech a srovnáno se současným stavem.

### 7.1 Budoucí práce

V rámci projektu Hydronaut jsou chystány další vesmírné analogové mise, během kterých bude probíhat sběr dat. Tato data budou následně využita pro budoucí experimenty a širší statistické analýzy. Zároveň budou sloužit pro vývoj nových metod, například evaluace mentálního stavu posádky, které mohou být v budoucnosti kritické pro úspěšné průběhy dlouhodobých vesmírných misí. Dále bude rozšiřována navržená metodika hodnocení kognitivní zátěže o experimenty s metodami předzpracování a standardizace, optimalizací hyperparametrů nebo augmentací dat.



Ohled bude brán také na problematiku předzpracování biosignálů, ať už z hlediska návrhu systematického porovnání a výběru QRS detektorů nebo realizace nových řešení. Jedním z takových řešení by mohlo být převzetí koncepce ze statistiky a strojového učení, konkrétně ansámblového učení (ensemble learning). Metody by se tak mohly zkombinovat. Nejdříve by se ale musely některé vyřadit, jelikož algoritmy jako [189, 228] (založené na integraci/prahování) nejsou ve skutečnosti detektory R vln. Jedná se o techniky založené na detekci QRS komplexu a vedou k horšímu temporálnímu rozlišení polohy R vln [110]. Stěžejní v tomto přístupu je také nejednoznačnost kombinace výsledků metod do jednoho určitého pravděpodobnostního výroku. Výsledkem metod jsou totiž ve většině případech indexy detekovaných R vln v signálu.

Dalším směrem budoucího výzkumu bude dále návrh postupů statistického hodnocení experimentů v extrémním prostředí s ohledem na jejich zásadní omezení. Cestou by mohlo být oproštění se od frekventistického přístupu zaměřeného na testování hypotéz, u něhož se také vyskytuje problém s nesprávným používáním p-hodnot, který kriticky přispívá ke krizi reprodukovatelnosti [263, 264]. Postupem let čím dál více panuje přesvědčení, že zobecnění Bayesovského přístupu je jedním ze způsobů, jak tyto problémy překonat [265]. Bayesovský rámec pro statistiku rychle získává na popularitě, a to nejen díky technologickým pokrokům [266, 267]. Mezi důvody proč toto paradigma upřednostnit patří například: spolehlivost, přesnost (i v případě zašuměných dat a malých vzorků), možnost zahrnutí předchozích znalostí a intuitivní charakter výsledků s jejich jednoduchou interpretací [266, 268–270].

---

## Seznam použité literatury

1. HARRISON, Albert A.; CONNORS, Mary M. Groups in Exotic Environments. In: BERKOWITZ, Leonard (ed.) [online]. Academic Press, 1984, sv. 18, s. 49–87 [cit. 2021-04-08]. *Advances in Experimental Social Psychology*. ISSN 0065-2601. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2601\(08\)60142-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2601(08)60142-2).
2. BELL, Suzanne T.; FISHER, David M.; BROWN, Shanique G.; MANN, Kristin E. An Approach for Conducting Actionable Research With Extreme Teams. *Journal of Management* [online]. 2018, roč. 44, č. 7, s. 2740–2765 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z DOI: [10.1177/0149206316653805](https://doi.org/10.1177/0149206316653805).
3. STACHOWSKI, Alicia A; KAPLAN, Seth A; WALLER, Mary J. The benefits of flexible team interaction during crises. *Journal of Applied Psychology* [online]. 2009, roč. 94, č. 6, s. 1536 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z DOI: [10.1037/a0016903](https://doi.org/10.1037/a0016903).
4. YU, Tieying; SENGUL, Metin; LESTER, Richard H. Misery loves company: The spread of negative impacts resulting from an organizational crisis. *Academy of Management Review* [online]. 2008, roč. 33, č. 2, s. 452–472 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z DOI: [10.5465/amr.2008.31193499](https://doi.org/10.5465/amr.2008.31193499).
5. GARDNER, Heidi K. Performance pressure as a double-edged sword: Enhancing team motivation but undermining the use of team knowledge. *Administrative Science Quarterly* [online]. 2012, roč. 57, č. 1, s. 1–46 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z DOI: [10.1177/0001839212446454](https://doi.org/10.1177/0001839212446454).
6. STAAL, Mark A. Stress, Cognition, and Human Performance: A Literature Review and Conceptual Framework. In: [online]. 2013 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20060017835>.
7. HANNAH, Sean T.; UHL-BIEN, Mary; AVOLIO, Bruce J.; CAVARRETTA, Fabrice L. A framework for examining leadership in extreme contexts. *The Leadership Quarterly* [online]. 2009, roč. 20, č. 6, s. 897–919 [cit. 2021-06-12]. ISSN 1048-9843. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.leaqua.2009.09.006>. The Leadership Quarterly Yearly Review of Leadership.
8. HÄLLGREN, Markus; ROULEAU, Linda; ROND, Mark de. A Matter of Life or Death: How Extreme Context Research Matters for Management and Organization Studies. *Academy of Management Annals* [online]. 2018, roč. 12, č. 1, s. 111–153 [cit. 2021-06-15]. Dostupné z DOI: [10.5465/annals.2016.0017](https://doi.org/10.5465/annals.2016.0017).
9. GOLDEN, Simon J.; CHANG, Chu-Hsiang (Daisy); KOZLOWSKI, Steve W.J. Teams in isolated, confined, and extreme (ICE) environments: Review and integration. *Journal of Organizational Behavior* [online]. 2018, roč. 39, č. 6, s. 701–715 [cit. 2021-06-16]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1002/job.2288>.

10. PAGEL, J. I.; CHOUKÈR, A. Effects of isolation and confinement on humans-implications for manned space explorations. *Journal of Applied Physiology*. 2016, roč. 120, č. 12, s. 1449–1457. Dostupné z DOI: [10.1152/jappphysiol.00928.2015](https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00928.2015). PMID: 26846554.
11. TAYLOR, Lee; WATKINS, Samuel L.; MARSHALL, Hannah; DASCOMBE, Ben J.; FOSTER, Josh. The impact of different environmental conditions on cognitive function: A focused review. *Frontiers in Physiology* [online]. 2016, roč. 6, s. 372 [cit. 2021-06-14]. ISSN 1664042X. Dostupné z DOI: [10.3389/FPHYS.2015.00372](https://doi.org/10.3389/FPHYS.2015.00372).
12. WINNARD, Andrew; SCOTT, Jonathan; WATERS, Nathan; VANCE, Martin; CAPLAN, Nick. Effect of Time on Human Muscle Outcomes During Simulated Microgravity Exposure Without Countermeasures—Systematic Review. *Frontiers in Physiology* [online]. 2019, roč. 10 [cit. 2021-04-08]. ISSN 1664042X. Dostupné z DOI: [10.3389/fphys.2019.01046](https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01046).
13. ZHANG, Fan; DE DEAR, Richard; HANCOCK, Peter. Effects of moderate thermal environments on cognitive performance: A multidisciplinary review. *Applied Energy* [online]. 2019, roč. 236, s. 760–777 [cit. 2021-04-08]. ISSN 0306-2619. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.005>.
14. MAYNARD, M Travis; KENNEDY, Deanna M; RESICK, Christian J. Teamwork in extreme environments: Lessons, challenges, and opportunities. *Journal of organizational behavior* [online]. 2018, roč. 39, č. 6, s. 695–700 [cit. 2021-06-14]. ISSN 1099-1379. Dostupné z DOI: [10.1002/JOB.2302](https://doi.org/10.1002/JOB.2302).
15. DRISKELL, Tripp; SALAS, Eduardo; DRISKELL, James E. Teams in extreme environments: Alterations in team development and teamwork. *Human Resource Management Review* [online]. 2018, roč. 28, s. 434–449 [cit. 2021-06-09]. ISSN 1053-4822. Dostupné z DOI: [10.1016/J.HRMR.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/J.HRMR.2017.01.002).
16. WICKMAN, Leslie; TSAI, Annie; WALTERS, Raymond. Isolation and Confinement Issues in Long Duration Spaceflight. In: [online]. 2008, s. 1–9 [cit. 2021-06-12]. Dostupné z DOI: [10.1109/AERO.2008.4526654](https://doi.org/10.1109/AERO.2008.4526654).
17. STUSTER, Jack W. Bold endeavors: behavioral lessons from polar and space exploration. *Gravitational and Space Research* [online]. 2007, roč. 13, č. 2 [cit. 2021-06-14]. Dostupné z: <http://gravitationalandspace-research.org/index.php/journal/article/view/244/243>.
18. KALEAGASI, Bartu. *Space Technology under NASA and SpaceX* [online]. 2017. [cit. 2021-06-24]. Dostupné z: <https://bartukaleagasi.files.wordpress.com/2017/01/space-technology-under-nasa-and-spacex.pdf>.
19. SALOTTI, Jean-Marc; HEIDMANN, Richard. Roadmap to a human Mars mission. *Acta Astronautica* [online]. 2014, roč. 104, č. 2, s. 558–564 [cit. 2021-06-16]. ISSN 0094-5765. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.06.038>. Future of Space Exploration: Towards the Stars.
20. VISCIO, Maria Antonietta; GARGIOLI, Eugenio; HOFFMAN, Jeffrey A.; MAGGIORE, Paolo; MESSIDORO, Andrea et al. A methodology for innovative technologies roadmaps assessment to support strategic decisions for future space exploration. *Acta Astronautica* [online]. 2014, roč. 94, č. 2, s. 813–833 [cit. 2021-06-16]. ISSN 0094-5765. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.10.004>.

21. MOGILEVER, Nicolette B.; ZUCCARELLI, Lucrezia; BURLES, Ford; IARIA, Giuseppe; STRAPAZZON, Giacomo et al. Expedition cognition: A review and prospective of subterranean neuroscience with spaceflight applications. *Frontiers in Human Neuroscience* [online]. 2018, roč. 12, s. 407 [cit. 2021-06-15]. ISSN 16625161. Dostupné z DOI: 10.3389/FNHUM.2018.00407.
22. BUGUET, Alain. Sleep under extreme environments: Effects of heat and cold exposure, altitude, hyperbaric pressure and microgravity in space. *Journal of the Neurological Sciences* [online]. 2007, roč. 262, s. 145–152 [cit. 2021-04-08]. ISSN 0022510X. Dostupné z DOI: 10.1016/J.JNS.2007.06.040.
23. WILLIAMS, David; KUIPERS, Andre; MUKAI, Chiaki; THIRSK, Robert. Acclimation during space flight: Effects on human physiology. *CMAJ* [online]. 2009, roč. 180, s. 1317–1323 [cit. 2021-04-08]. ISSN 14882329. Dostupné z DOI: 10.1503/CMAJ.090628.
24. ROY-O'REILLY, Meaghan; MULAVARA, Ajitkumar; WILLIAMS, Thomas. A review of alterations to the brain during spaceflight and the potential relevance to crew in long-duration space exploration. *npj Microgravity 2021 7:1* [online]. 2021, roč. 7, č. 1, s. 1–9 [cit. 2021-06-15]. ISSN 2373-8065. Dostupné z DOI: 10.1038/s41526-021-00133-z.
25. STRANGMAN, Gary E.; SIPES, Walter; BEVEN, Gary. Human cognitive performance in spaceflight and analogue environments. *Aviation Space and Environmental Medicine* [online]. 2014, roč. 85, s. 1033–1048 [cit. 2021-04-18]. ISSN 00956562. Dostupné z DOI: 10.3357/ASEM.3961.2014.
26. MORPHEW, Ephimia. Psychological and human factors in long duration spaceflight. *McGill Journal of Medicine* [online]. 2001, roč. 6, č. 1 [cit. 2021-06-16]. Dostupné z DOI: 10.26443/mjm.v6i1.555.
27. STEIN, Thomas P. Weight, muscle and bone loss during space flight: another perspective. *European Journal of Applied Physiology* [online]. 2012, roč. 113, s. 2171–2181 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00421-012-2548-9>.
28. GROEMER, Gernot; OZDEMIR, Seda. Planetary Analog Field Operations as a Learning Tool. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* [online]. 2020, roč. 7 [cit. 2021-06-19]. ISSN 2296-987X. Dostupné z DOI: 10.3389/fspas.2020.00032.
29. BARKASZI, Irén; TAKÁCS, Endre; CZIGLER, István; BALÁZS, László. Extreme Environment Effects on Cognitive Functions: A Longitudinal Study in High Altitude in Antarctica. *Frontiers in Human Neuroscience* [online]. 2016, roč. 10 [cit. 2021-04-08]. ISSN 1662-5161. Dostupné z DOI: 10.3389/fnhum.2016.00331.
30. LUGG, D.; SHEPANEK, M. Space analogue studies in Antarctica. *Acta Astronautica* [online]. 1999, roč. 44, č. 7, s. 693–699 [cit. 2021-06-19]. ISSN 0094-5765. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(99\)00068-5](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(99)00068-5). Pacific RIM: A Rapidly Expanding Space Market.
31. SCHNEIDER, Stefan; ABELN, Vera; POPOVA, Julia; FOMINA, Elena; JACUBOWSKI, Amrei et al. The influence of exercise on prefrontal cortex activity and cognitive performance during a simulated space flight to Mars (MARS500). *Behavioural Brain Research* [online]. 2013, roč. 236, s. 1–7 [cit. 2021-06-19]. ISSN 0166-4328. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.08.022>.
32. WANG, Yue; JING, Xiaolu; LV, Ke; WU, Bin; BAI, Yanqiang et al. During the Long Way to Mars: Effects of 520 Days of Confinement (Mars500) on the Assessment of Affective Stimuli and Stage Alteration in Mood and Plasma Hormone Levels. *PLOS ONE* [online]. 2014, roč. 9, č. 4, s. 1–9 [cit. 2021-06-19]. Dostupné z DOI: 10.1371/journal.pone.0087087.

33. TREMBANIS, Arthur C; FORREST, Alex L; MILLER, Douglas C; LIM, Darlene SS; GERNHARDT, Michael L et al. Multiplatform ocean exploration: Insights from the NEEMO space analog mission. *Marine Technology Society Journal* [online]. 2012, roč. 46, č. 4, s. 7–19 [cit. 2021-06-20]. Dostupné z DOI: 10.1109/BIA48344.2019.8967457.
34. KOUTNIK, Andrew P.; FAVRE, Michelle E.; NOBOA, Karina; SANCHEZ-GONZALEZ, Marcos A.; MOSS, Sara E. et al. Human Adaptations to Multiday Saturation on NASA NEEMO. *Frontiers in Physiology* [online]. 2021, roč. 11 [cit. 2021-06-20]. ISSN 1664-042X. Dostupné z DOI: 10.3389/fphys.2020.610000.
35. KJELL LINGREN, NASA Astronaut. *NEEMO 22 Photo Gallery* [online]. 2017. [cit. 2021-06-20]. Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/40054892@N06/albums/72157683015049201>.
36. HYDRONAUT. *H03 DeepLab* [online]. 2020. [cit. 2021-06-23]. Dostupné z: <https://hydronaut.eu/cs>.
37. SÁZEL, Miloš; BOHÁČEK, Pavel. Saturační potápění – projekt Hydronaut. *Occupational Medicine / Pracovní Lékarství* [online]. 2014, roč. 66, č. 2/3, s. 85–89 [cit. 2021-06-20]. ISSN 00326291. Dostupné z: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=102280881&site=ehost-live&scope=site>.
38. MOORE, Steven; DILDA, Valentina; MORRIS, Tiffany; YUNGHER, Don; MACDOUGALL, Hamish et al. Long-duration spaceflight adversely affects post-landing operator proficiency. *Scientific Reports* [online]. 2019, roč. 9 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: 10.1038/s41598-019-39058-9.
39. DE LA TORRE, Gabriel G. Cognitive Neuroscience in Space. *Life* [online]. 2014, roč. 4, č. 3, s. 281–294 [cit. 2021-06-23]. ISSN 2075-1729. Dostupné z DOI: 10.3390/life4030281.
40. OMBERGEN, Angelique Van; JILLINGS, Steven; JEURISSEN, Ben; TOMILOVSKAYA, Elena; RUMSHISKAYA, Alena et al. Brain ventricular volume changes induced by long-duration spaceflight. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2019, roč. 116, č. 21, s. 10531–10536 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: 10.1073/pnas.1820354116.
41. PECHENKOVA, Ekaterina; NOSIKOVA, Inna; RUMSHISKAYA, Alena; LITVINOVA, Liudmila; RUKAVISHNIKOV, Ilya et al. Alterations of Functional Brain Connectivity After Long-Duration Spaceflight as Revealed by fMRI. *Frontiers in Physiology* [online]. 2019, roč. 10 [cit. 2021-06-23]. ISSN 1664-042X. Dostupné z DOI: 10.3389/fphys.2019.00761.
42. ROBERTS, Donna; ALBRECHT, Moritz; COLLINS, Heather; ASEMANI, Davud; CHATTERJEE, A. et al. Effects of Spaceflight on Astronaut Brain Structure as Indicated on MRI. *New England Journal of Medicine* [online]. 2017, roč. 377, s. 1746–1753 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: 10.1056/NEJMoa1705129.
43. DEMERTZI, Athena; VAN OMBERGEN, Angelique; TOMILOVSKAYA, Elena; JEURISSEN, Ben; PECHENKOVA, Ekaterina et al. Cortical reorganization in an astronaut's brain after long-duration spaceflight. *Brain structure & function* [online]. 2015, roč. 221 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: 10.1007/s00429-015-1054-3.
44. KRAMER, Larry A.; HASAN, Khader M.; STENGER, Michael B.; SARGSYAN, Ashot; LAURIE, Steven S. et al. Intracranial Effects of Microgravity: A Prospective Longitudinal MRI Study. *Radiology* [online]. 2020, roč. 295, č. 3, s. 640–648 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: 10.1148/radiol.2020191413. PMID: 32286194.
45. HODKINSON, P.D.; ANDERTON, R.A.; POSSELT, B.N.; FONG, K.J. An overview of space medicine. *British Journal of Anaesthesia*. 2017, roč. 119, s. i143–i153. ISSN 0007-0912. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1093/bja/aex336>.

46. CORREIA, Manning J. Neuronal plasticity: adaptation and readaptation to the environment of space. *Brain Research Reviews* [online]. 1998, roč. 28, č. 1, s. 61–65 [cit. 2021-06-23]. ISSN 0165-0173. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(98\)00043-5](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(98)00043-5).
47. KOPPELMANS, Vincent; BLOOMBERG, Jacob; MULAVARA, Ajitkumar; SEIDLER, Rachael. Brain structural plasticity with spaceflight. *npj Microgravity* [online]. 2016, roč. 2 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: [10.1038/s41526-016-0001-9](https://doi.org/10.1038/s41526-016-0001-9).
48. KOPPELMANS, Vincent; BLOOMBERG, Jacob J.; DE DIOS, Yiri E.; WOOD, Scott J.; REUTER-LORENZ, Patricia A. et al. Brain plasticity and sensorimotor deterioration as a function of 70 days head down tilt bed rest. *PLOS ONE* [online]. 2017, roč. 12, č. 8, s. 1–23 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: [10.1371/journal.pone.0182236](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182236).
49. BREM, Christian; LUTZ, Jürgen; VOLLMAR, Christian; FEUERECKER, Matthias; STREWE, Claudia et al. Changes of brain DTI in healthy human subjects after 520 days isolation and confinement on a simulated mission to Mars. *Life Sciences in Space Research* [online]. 2020, roč. 24, s. 83–90 [cit. 2021-06-23]. ISSN 2214-5524. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.09.004>.
50. STAHN, Alexander; GUNGA, Hanns-Christian; KOHLBERG, Eberhard; GALLINAT, Jürgen; DINGES, David et al. Brain Changes in Response to Long Antarctic Expeditions. *New England Journal of Medicine* [online]. 2019, roč. 381, s. 2273–2275 [cit. 2021-06-23]. Dostupné z DOI: [10.1056/NEJMc1904905](https://doi.org/10.1056/NEJMc1904905).
51. SWELLER, John. Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning. *Cognitive Science* [online]. 1988, roč. 12, č. 2, s. 257–285 [cit. 2021-06-24]. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202\\_4](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4).
52. SWELLER, John; VAN MERRIENBOER, Jeroen J. G.; PAAS, Fred. Cognitive Architecture and Instructional Design. *Educational Psychology Review* [online]. 1998, roč. 10, s. 251– [cit. 2021-06-24]. Dostupné z DOI: [10.1023/a:1022193728205](https://doi.org/10.1023/a:1022193728205).
53. SWELLER, J. Cognitive load theory: Recent theoretical advances. *Cognitive Load Theory* [online]. 2010, s. 29–47 [cit. 2021-06-24]. Dostupné z DOI: [10.1017/CB09780511844744.004](https://doi.org/10.1017/CB09780511844744.004).
54. CHEN, Fang; ZHOU, Jianlong; WANG, Yang; YU, Kun; ARSHAD, Syed et al. *Robust Multimodal Cognitive Load Measurement* [online]. 2016. [cit. 2021-06-24]. ISBN 978-3-319-31698-7. Dostupné z DOI: [10.1007/978-3-319-31700-7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31700-7).
55. HAAPALAINEN, Eija; KIM, SeungJun; FORLIZZI, Jodi F.; DEY, Anind K. Psycho-Physiological Measures for Assessing Cognitive Load. In: *Proceedings of the 12th ACM International Conference on Ubiquitous Computing* [online]. Copenhagen, Denmark: Association for Computing Machinery, 2010, s. 301–310 [cit. 2021-06-24]. UbiComp '10. ISBN 9781605588438. Dostupné z DOI: [10.1145/1864349.1864395](https://doi.org/10.1145/1864349.1864395).
56. VANNESTE, Pieter; RAES, Annelies; MORTON, Jessica; BOMBEKE, Klaas; VAN ACKER, Bram et al. Towards measuring cognitive load through multimodal physiological data. *Cognition, Technology & Work* [online]. 2021, roč. 23 [cit. 2021-06-24]. Dostupné z DOI: [10.1007/s10111-020-00641-0](https://doi.org/10.1007/s10111-020-00641-0).
57. THAYER, Julian F.; HANSEN, Anita L.; SAUS-ROSE, Evelyn; JOHNSEN, Bjorn Helge. Heart Rate Variability, Prefrontal Neural Function, and Cognitive Performance: The Neurovisceral Integration Perspective on Self-regulation, Adaptation, and Health. *Annals of Behavioral Medicine* [online]. 2009, roč. 37, č. 2, s. 141–153 [cit. 2021-06-24]. ISSN 0883-6612. Dostupné z DOI: [10.1007/s12160-009-9101-z](https://doi.org/10.1007/s12160-009-9101-z).

58. GJORESKI, Martin; LUSTREK, Mitja; GAMS, Matjaz; GJORESKI, Hristijan. Monitoring stress with a wrist device using context. *Journal of Biomedical Informatics*. 2017, roč. 73. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jbi.2017.08.006.
59. DE LA CRUZ, Feliberto; SCHUMANN, Andy; KÖHLER, Stefanie; REICHENBACH, Jürgen; WAGNER, Gerd et al. The relationship between heart rate and functional connectivity of brain regions involved in autonomic control. *NeuroImage*. 2019, roč. 196. Dostupné z DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.04.014.
60. BROUWER, Anne-Marie; ZANDER, Thorsten; ERP, 1; KORTELING, J.E. (Hans); BRONKHORST, Adelbert. Using neurophysiological signals that reflect cognitive or affective state: Six recommendations to avoid common pitfalls. *Frontiers in Neuroscience*. 2015, roč. 9. Dostupné z DOI: 10.3389/fnins.2015.00136.
61. ANTONENKO, Pavlo "Pasha; PAAS, Fred; GRABNER, Roland; GOG, Tamara. Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load. *Educational Psychology Review*. 2010, roč. 22, s. 425–438. Dostupné z DOI: 10.1007/s10648-010-9130-y.
62. WEL, Pauline; STEENBERGEN, Henk. Pupil dilation as an index of effort in cognitive control tasks: A review. *Psychonomic Bulletin & Review*. 2018, roč. 25. Dostupné z DOI: 10.3758/s13423-018-1432-y.
63. SETZ, Cornelia; ARNRICH, Bert; SCHUMM, Johannes; LA MARCA, Roberto; TRÖSTER, Gerhard et al. Discriminating Stress From Cognitive Load Using a Wearable EDA Device. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*. 2010, roč. 14, č. 2, s. 410–417. Dostupné z DOI: 10.1109/TITB.2009.2036164.
64. HERBORN, Katherine; GRAVES, James; JEREM, Paul; EVANS, Neil; NAGER, Ruedi et al. Skin temperature reveals the intensity of acute stress. *Physiology & Behavior*. 2015, roč. 152. Dostupné z DOI: 10.1016/j.physbeh.2015.09.032.
65. JERČIĆ, Petar; SENNERSTEN, Charlotte; LINDLEY, Craig. Modeling cognitive load and physiological arousal through pupil diameter and heart rate. *Multimedia Tools and Applications*. 2020, roč. 79. Dostupné z DOI: 10.1007/s11042-018-6518-z.
66. SOLHJOO, Soroosh; HAIGNEY, Mark; MCBEE, Elexis; VAN MERRIENBOER, Jeroen J. G.; SCHUWIRTH, Lambert et al. Heart Rate and Heart Rate Variability Correlate with Clinical Reasoning Performance and Self-Reported Measures of Cognitive Load. *Scientific Reports*. 2019, roč. 9, s. 1–9. Dostupné z DOI: 10.1038/s41598-019-50280-3.
67. GRASSMANN, Mariel; VLEMINCX, Elke; LEUPOLDT, Andreas; MITTELSTÄDT, Justin; VAN DEN BERGH, Omer. Respiratory Changes in Response to Cognitive Load: A Systematic Review. *Neural Plasticity*. 2016, roč. 2016, s. 1–16. Dostupné z DOI: 10.1155/2016/8146809.
68. F., Kramer A. Physiological metrics of mental workload : A review of recent progress. *Multiple-task Performance*. 1991, s. 279–328. Dostupné také z: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1572543024796401024>.
69. WANG, Chixiang; GUO, Junqi. A data-driven framework for learners' cognitive load detection using ECG-PPG physiological feature fusion and XGBoost classification. *Procedia Computer Science*. 2019, roč. 147, s. 338–348. ISSN 1877-0509. Dostupné z DOI: 10.1016/j.procs.2019.01.234.
70. SCHNOTZ, Wolfgang; KÜRSCHNER, Christian. A Reconsideration of Cognitive Load Theory. *Educational Psychology Review*. 2007, roč. 19, č. 4, s. 469–508. ISSN 1573-336X. Dostupné z DOI: 10.1007/s10648-007-9053-4.

71. HART, Sandra G. Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2006, roč. 50, č. 9, s. 904–908. Dostupné z DOI: 10.1177/154193120605000909.
72. GIANNAKAKIS, Giorgos; GRIGORIADIS, Dimitris; GIANNAKAKI, Katerina; SIMANTIRAKI, Olympia; RONIOTIS, Alexandros et al. Review on Psychological Stress Detection Using Biosignals. *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2022, roč. 13, č. 1, s. 440–460. ISSN 1949-3045. Dostupné z DOI: 10.1109/TAFFC.2019.2927337.
73. ISHAQUE, Syem; KHAN, Naimul; KRISHNAN, Sri. Trends in Heart-Rate Variability Signal Analysis. *Frontiers in Digital Health*. 2021, roč. 3. ISSN 2673-253X. Dostupné z DOI: 10.3389/fdgth.2021.639444.
74. ROHILA, Ashish; SHARMA, Ambalika. Correlation between heart rate variability features. *2020 7th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2020*. 2020, s. 669–674. ISBN 9781728154756. Dostupné z DOI: 10.1109/SPIN48934.2020.9071381.
75. PHAM, Tam; LAU, Zen Juen; CHEN, S. H. Annabel; MAKOWSKI, Dominique. Heart rate variability in psychology: A review of hrv indices and an analysis tutorial. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 12. ISSN 14248220. Dostupné z DOI: 10.3390/S21123998.
76. BOUNY, Pierre; ARSAC, Laurent M; TOURÉ CUQ, Emma; DESCHODT-ARSAC, Veronique. Entropy and Multifractal-Multiscale Indices of Heart Rate Time Series to Evaluate Intricate Cognitive-Autonomic Interactions. *Entropy (Basel, Switzerland)*. 2021, roč. 23, č. 6. ISSN 1099-4300. Dostupné z DOI: 10.3390/e23060663.
77. HWANG, Bosun; YOU, Jiwoo; VAESSEN, Thomas; MYIN-GERMEYS, Inez; PARK, Cheolsoo et al. Deep ECGNet: An Optimal Deep Learning Framework for Monitoring Mental Stress Using Ultra Short-Term ECG Signals. *Telemedicine journal and e-health : the official journal of the American Telemedicine Association* [online]. 2018, roč. 24 10, s. 753–772 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/tmj.2017.0250>.
78. HE, Jiayuan; LI, Ke; LIAO, Xiaoli; ZHANG, Ping; JIANG, Ning. Real-Time Detection of Acute Cognitive Stress Using a Convolutional Neural Network From Electrocardiographic Signal. *IEEE Access* [online]. 2019, roč. 7, s. 42710–42717 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2907076.
79. OSKOOEI, Ali; CHAU, Sophie Mai; WEISS, Jonas R. M.; SRIDHAR, Arvind; MARTINEZ, 3'ia Rodriguez et al. DeStress: Deep Learning for Unsupervised Identification of Mental Stress in Firefighters from Heart-rate Variability (HRV) Data. *ArXiv* [online]. 2019, roč. abs/1911.13213 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/1911.13213>.
80. CHO, Dongrae; HAM, Jinsil; OH, Jooyoung; PARK, Jeanho; KIM, Sayup et al. Detection of Stress Levels from Biosignals Measured in Virtual Reality Environments Using a Kernel-Based Extreme Learning Machine. *Sensors* [online]. 2017, roč. 17, č. 10, s. 2435 [cit. 2023-02-23]. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s17102435.
81. APPELHANS, Bradley M.; LUECKEN, Linda J. Heart Rate Variability as an Index of Regulated Emotional Responding. *Review of General Psychology*. 2006, roč. 10, č. 3, s. 229–240. ISSN 1089-2680. Dostupné z DOI: 10.1037/1089-2680.10.3.229.
82. BUTLER, Emily A.; WILHELM, Frank H.; GROSS, James J. Respiratory sinus arrhythmia, emotion, and emotion regulation during social interaction. *Psychophysiology*. 2006, roč. 43, č. 6, s. 612–622. ISSN 1469-8986. Dostupné z DOI: 10.1111/j.1469-8986.2006.00467.x.



83. INGJALDSSON, Jon T; LABERG, Jon C; THAYER, Julian F. Reduced heart rate variability in chronic alcohol abuse: relationship with negative mood, chronic thought suppression, and compulsive drinking. *Biological Psychiatry*. 2003, roč. 54, č. 12, s. 1427–1436. ISSN 0006-3223. Dostupné z DOI: 10.1016/S0006-3223(02)01926-1.
84. LANE, Richard D. Neural Substrates of Implicit and Explicit Emotional Processes: A Unifying Framework for Psychosomatic Medicine. *Psychosomatic Medicine*. 2008, roč. 70, č. 2, s. 214. ISSN 0033-3174. Dostupné z DOI: 10.1097/PSY.0b013e3181647e44.
85. MELZIG, Christiane A.; WEIKE, Almut I.; HAMM, Alfons O.; THAYER, Julian F. Individual differences in fear-potentiated startle as a function of resting heart rate variability: Implications for panic disorder. *International Journal of Psychophysiology*. 2009, roč. 71, č. 2, s. 109–117. ISSN 0167-8760. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2008.07.013.
86. THAYER, Julian F.; BROSSCHOT, Jos F. Psychosomatics and psychopathology: looking up and down from the brain. *Psychoneuroendocrinology*. 2005, roč. 30, č. 10, s. 1050–1058. ISSN 0306-4530. Dostupné z DOI: 10.1016/j.psyneuen.2005.04.014.
87. HANSEN, Anita Lill; JOHNSEN, Bjørn Helge; THAYER, Julian F. Vagal influence on working memory and attention. *International Journal of Psychophysiology*. 2003, roč. 48, č. 3, s. 263–274. ISSN 0167-8760. Dostupné z DOI: 10.1016/S0167-8760(03)00073-4.
88. JOHNSEN, Bjørn Helge; THAYER, Julian F; LABERG, Jon C; WORMNES, Bjørn; RAADAL, Magne et al. Attentional and physiological characteristics of patients with dental anxiety. *Journal of Anxiety Disorders*. 2003, roč. 17, č. 1, s. 75–87. ISSN 0887-6185. Dostupné z DOI: 10.1016/S0887-6185(02)00178-0.
89. SAUS, Evelyn-Rose; JOHNSEN, Bjørn Helge; EID, Jarle; RIISEM, Per Ketil; ANDERSEN, Rune et al. The Effect of Brief Situational Awareness Training in a Police Shooting Simulator: An Experimental Study. *Military Psychology*. 2006, roč. 18, č. sup1, S3–S21. ISSN 0899-5605. Dostupné z DOI: 10.1207/s15327876mp1803s\2.
90. BROSSCHOT, Jos F.; VAN DIJK, Eduard; THAYER, Julian F. Daily worry is related to low heart rate variability during waking and the subsequent nocturnal sleep period. *International Journal of Psychophysiology*. 2007, roč. 63, č. 1, s. 39–47. ISSN 0167-8760. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2006.07.016.
91. LIAO, Duanping; CARNETHON, Mercedes; EVANS, Gregory W.; CASCIO, Wayne E.; HEISS, Gerardo. Lower Heart Rate Variability Is Associated With the Development of Coronary Heart Disease in Individuals With Diabetes: The Atherosclerosis Risk in Communities (ARIC) Study. *Diabetes*. 2002, roč. 51, č. 12, s. 3524–3531. ISSN 0012-1797. Dostupné z DOI: 10.2337/diabetes.51.12.3524.
92. THAYER, J. F.; FISCHER, J. E. Heart rate variability, overnight urinary norepinephrine and C-reactive protein: evidence for the cholinergic anti-inflammatory pathway in healthy human adults. *Journal of Internal Medicine*. 2009, roč. 265, č. 4, s. 439–447. ISSN 1365-2796. Dostupné z DOI: 10.1111/j.1365-2796.2008.02023.x.
93. THAYER, Julian F.; LANE, Richard D. The role of vagal function in the risk for cardiovascular disease and mortality. *Biological Psychology*. 2007, roč. 74, č. 2, s. 224–242. ISSN 0301-0511. Dostupné z DOI: 10.1016/j.biopsycho.2005.11.013.
94. GORMAN, Jack M.; SLOAN, Richard P. Heart rate variability in depressive and anxiety disorders. *American Heart Journal*. 2000, roč. 140, č. 4, Supplement, S77–S83. ISSN 0002-8703. Dostupné z DOI: 10.1067/mhj.2000.109981.

95. KEMP, Andrew H.; QUINTANA, Daniel S. The relationship between mental and physical health: Insights from the study of heart rate variability. *International Journal of Psychophysiology*. 2013, roč. 89, č. 3, s. 288–296. ISSN 0167-8760. Dostupné z DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2013.06.018.
96. KEMP, Andrew H.; QUINTANA, Daniel S.; FELMINGHAM, Kim L.; MATTHEWS, Slade; JELINEK, Herbert F. Depression, Comorbid Anxiety Disorders, and Heart Rate Variability in Physically Healthy, Unmedicated Patients: Implications for Cardiovascular Risk. *PLOS ONE*. 2012, roč. 7, č. 2, e30777. ISSN 1932-6203. Dostupné z DOI: 10.1371/journal.pone.0030777.
97. GIANAROS, P.J. Brain-body pathways to cardiovascular disease risk. In: *Herbert Weiner Early Career Award Lecture, 66th Annual Meeting of the American Psychosomatic Society, Baltimore, MD, March*. 2008.
98. BEISSNER, Florian; MEISSNER, Karin; BÄR, Karl-Jürgen; NAPADOW, Vitaly. The Autonomic Brain: An Activation Likelihood Estimation Meta-Analysis for Central Processing of Autonomic Function. *Journal of Neuroscience*. 2013, roč. 33, č. 25, s. 10503–10511. ISSN 0270-6474, ISSN 1529-2401. Dostupné z DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1103-13.2013.
99. THAYER, Julian F; LANE, Richard D. A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation. *Journal of Affective Disorders*. 2000, roč. 61, č. 3, s. 201–216. ISSN 0165-0327. Dostupné z DOI: 10.1016/S0165-0327(00)00338-4.
100. THAYER, Julian F.; LANE, Richard D. Claude Bernard and the heart–brain connection: Further elaboration of a model of neurovisceral integration. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2009, roč. 33, č. 2, s. 81–88. ISSN 0149-7634. Dostupné z DOI: 10.1016/J.NEUBIOREV.2008.08.004.
101. SHAFFER, Fred; MCCRATY, Rollin; ZERR, Christopher L. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the hearts anatomy and heart rate variability. *Frontiers in psychology*. 2014, roč. 5, s. 1040. ISSN 1664-1078. Dostupné z DOI: 10.3389/fpsyg.2014.01040.
102. RAICHLER, Marcus E.; MACLEOD, Ann Mary; SNYDER, Abraham Z.; POWERS, William J.; GUSNARD, Debra A. et al. A default mode of brain function. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2001, roč. 98, č. 2, s. 676–682. Dostupné z DOI: 10.1073/pnas.98.2.676.
103. NAGAI, Y; CRITCHLEY, H. D; FEATHERSTONE, E; TRIMBLE, M. R; DOLAN, R. J. Activity in ventromedial prefrontal cortex covaries with sympathetic skin conductance level: a physiological account of a “default mode” of brain function. *NeuroImage*. 2004, roč. 22, č. 1, s. 243–251. ISSN 1053-8119. Dostupné z DOI: 10.1016/j.neuroimage.2004.01.019.
104. SMITH, Ryan; THAYER, Julian F.; KHALSA, Sahib S.; LANE, Richard D. The hierarchical basis of neurovisceral integration. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. 2017, roč. 75, s. 274–296. ISSN 0149-7634. Dostupné z DOI: 10.1016/J.NEUBIOREV.2017.02.003.
105. LUJAN, Matthew R.; PEREZ-POZUELO, Ignacio; GRANDNER, Michael A. Past, Present, and Future of Multisensory Wearable Technology to Monitor Sleep and Circadian Rhythms. *Frontiers in Digital Health*. 2021, roč. 3. ISSN 2673-253X. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fdgth.2021.721919>.
106. ŠTEJFA, Miloš. *Kardiologie: 3., přepracované a doplněné vydání*. 1. elektronické vydání. Grada, 2006. ISBN 978-80-247-7034-5.

107. WEINHAUS, Anthony J.; ROBERTS, Kenneth P. Anatomy of the Human Heart. In: *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices* [online]. Totowa, NJ: Humana Press, 2005, s. 51–79 [cit. 2021-02-27]. ISBN 978-1-58829-443-2. Dostupné z DOI: 10.1007/978-1-59259-835-9\_4.
108. ČIHÁK, Radomír. Anatomie 3. In: Třetí, upravené a doplněné vydání. Praha: Grada, 2016, s. 7–79. ISBN 9788024756363.
109. GOLDBERGER, Ary L.; GOLDBERGER, Zachary D.; SHVILKIN, Alexei. Goldberger's Clinical Electrocardiography: A Simplified Approach. In: 9th edition. Philadelphia: Elsevier Inc., 2017. ISBN 9780323508773.
110. PORR, Bernd; HOWELL, Luis. R-peak detector stress test with a new noisy ECG database reveals significant performance differences amongst popular detectors. *bioRxiv* [online]. 2019 [cit. 2023-02-24]. Dostupné z DOI: 10.1101/722397.
111. FATISSON, Julien; OSWALD, Victor; LALONDE, François. Influence diagram of physiological and environmental factors affecting heart rate variability: an extended literature overview. *Heart International*. 2016, roč. 11, e32–e40.
112. HAYANO, Junichiro; YUDA, Emi. Pitfalls of assessment of autonomic function by heart rate variability. *Journal of physiological anthropology*. 2019, roč. 38, č. 1, s. 1–8.
113. BIGGER, J.Thomas; ALBRECHT, Paul; STEINMAN, Richard C.; ROLNITZKY, Linda M.; FLEISS, Joseph L. et al. Comparison of time- and frequency domain-based measures of cardiac parasympathetic activity in Holter recordings after myocardial infarction. *The American Journal of Cardiology*. 1989, roč. 64, č. 8, s. 536–538. ISSN 0002-9149. Dostupné z DOI: [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(89\)90436-0](https://doi.org/10.1016/0002-9149(89)90436-0).
114. MALIK, M.; CAMM, A. J.; BIGGER, J. T.; BREITHARDT, G.; CERUTTI, S. et al. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *European Heart Journal*. 1996, roč. 17, č. 3, s. 354–381. ISSN 0195668X. Dostupné z DOI: 10.1093/OXFORDJOURNALS.EURHEARTJ.A014868.
115. ACHARYA, U. Rajendra; JOSEPH, K. Paul; KANNATHAL, N.; LIM, Choo Min; SURI, Jasjit S. Heart rate variability: A review. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 2006, roč. 44, č. 12, s. 1031–1051. ISSN 01400118. Dostupné z DOI: 10.1007/S11517-006-0119-0.
116. CICCONE, Anthony B.; SIEDLIK, Jacob A.; WECHT, Jill M.; DECKERT, Jake A.; NGUYEN, Nhuquynh D. et al. Reminder: RMSSD and SD1 are identical heart rate variability metrics. *Muscle & Nerve*. 2017, roč. 56, č. 4, s. 674–678. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1002/mus.25573>.
117. PHAM, Tam; LAU, Zen Juen; SH ANNABEL CHEN, PhD; MAKOWSKI, Dominique. *Unveiling the Structure of Heart Rate Variability (HRV) Indices: A Data-driven Meta-clustering Approach*. PsyArXiv, [b.r.]. Dostupné z DOI: 10.31234/OSF.IO/MWA6X.
118. LEITE, Marcelli R; RAMOS, Ercy Mara C; KALVA-FILHO, Carlos A; RODRIGUES, Fernanda Maria M; FREIRE, Ana Paula CF et al. Correlation between heart rate variability indexes and aerobic physiological variables in patients with COPD. *Respirology*. 2015, roč. 20, č. 2, s. 273–278.
119. PENG, Rong-Chao; ZHOU, Xiao-Lin; LIN, Wan-Hua; ZHANG, Yuan-Ting. Extraction of heart rate variability from smartphone photoplethysmograms. *Computational and mathematical methods in medicine*. 2015, roč. 2015.

120. DORMANN, Carsten F; ELITH, Jane; BACHER, Sven; BUCHMANN, Carsten; CARL, Gudrun et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*. 2013, roč. 36, č. 1, s. 27–46.
121. GUZIK, Przemyslaw; PISKORSKI, Jaroslaw; AWAN, Kokab; KRAUZE, Tomasz; FITZPATRICK, Michael et al. Obstructive sleep apnea and heart rate asymmetry microstructure during sleep. *Clinical Autonomic Research*. 2013, roč. 23, s. 91–100.
122. BRENNAN, Michael; PALANISWAMI, Marimuthu; KAMEN, Peter. Poincaré plot interpretation using a physiological model of HRV based on a network of oscillators. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 2002, roč. 283, č. 5, H1873–H1886. Dostupné z DOI: 10.1152/ajpheart.00405.2000. PMID: 12384465.
123. BOUCSEIN, Wolfram. Electrodermal activity: Second edition. *Electrodermal Activity: Second Edition*. 2012, roč. 9781461411260, s. 1–618. ISBN 9781461411260. Dostupné z DOI: 10.1007/978-1-4614-1126-0.
124. CRITCHLEY, Hugo D. Electrodermal responses: What happens in the brain. *Neuroscientist*. 2002, roč. 8, č. 2, s. 132–142. ISSN 10738584. Dostupné z DOI: 10.1177/107385840200800209.
125. TRONSTAD, Christian; AMINI, Maryam; BACH, Dominik R; MARTINSEN, Ørjan G. Current trends and opportunities in the methodology of electrodermal activity measurement. *Physiological Measurement*. 2022, roč. 43, č. 2, 02TR01. ISSN 0967-3334. Dostupné z DOI: 10.1088/1361-6579/AC5007.
126. FREDRIKSON, Mats; FURMARK, Tomas; OLSSON, Maria Tillfors; FISCHER, Håkan; ANDERSSON, Jesper et al. Functional neuroanatomical correlates of electrodermal activity: A positron emission tomographic study. *Psychophysiology*. 1998, roč. 35, č. 2, s. 179–185. ISSN 1469-8986, ISSN 0048-5772. Dostupné z DOI: 10.1111/1469-8986.3520179.
127. BUCHWALD, Mikolaj; KUPINSKI, Szymo; BYKOWSKI, Adam; MARCINKOWSKA, Joanna; RATAJCZYK, Dawid et al. Electrodermal activity as a measure of cognitive load: A methodological approach. *Signal Processing - Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications Conference Proceedings, SPA*. 2019, roč. 2019-September, s. 175–179. ISBN 9788362065363. ISSN 23260319. Dostupné z DOI: 10.23919/SPA.2019.8936745.
128. CARUELLE, Delphine; GUSTAFSSON, Anders; SHAMS, Poja; LERVIK-OLSEN, Line. The use of electrodermal activity (EDA) measurement to understand consumer emotions – A literature review and a call for action. *Journal of Business Research*. 2019, roč. 104, s. 146–160. ISSN 01482963. Dostupné z DOI: 10.1016/J.JBUSRES.2019.06.041.
129. SÁNCHEZ-REOLID, Roberto; LÓPEZ, María T.; FERNÁNDEZ-CABALLERO, Antonio. Machine Learning for Stress Detection from Electrodermal Activity: A Scoping Review. 2020. Dostupné z DOI: 10.20944/PREPRINTS202011.0043.V1.
130. BLECHERT, Jens; PEYK, Peter; LIEDLGRUBER, Michael; WILHELM, Frank H. ANSLAB: Integrated multichannel peripheral biosignal processing in psychophysiological science. *Behavior Research Methods*. 2016, roč. 48, č. 4, s. 1528–1545. ISSN 1554-3528. Dostupné z DOI: 10.3758/s13428-015-0665-1.
131. BAHAUDDIN SIKDER, Md Saif Bin; MD. SALIMULLAH, Shah; AHMED, Inkeyad; HOSSAIN, Delowar; RAJIB, Moshiul Alam et al. Galvanic Skin Response Based Cognitive Load Measurement for Online Exams. *2021 5th International Conference on Electrical Information and Communication Technology, EICT 2021*. 2021. ISBN 9781665409063. Dostupné z DOI: 10.1109/EICT54103.2021.9733564.

132. GHADERYAN, Peyvand; ABBASI, Ataollah; EBRAHIMI, Afshin. Time-varying singular value decomposition analysis of electrodermal activity: A novel method of cognitive load estimation. *Measurement*. 2018, roč. 126, s. 102–109. ISSN 0263-2241. Dostupné z DOI: 10.1016/J.MEASUREMENT.2018.05.015.
133. HOSSAIN, Delowar; SALIMULLAH, Shah Md; CHOWDHURY, Abrar Nayeem; NESHAD HASAN, Syed Md; KABIR, Erfan et al. Measurement of cognitive load for writing tasks using galvanic skin response. *ACM International Conference Proceeding Series*. 2019, s. 122–126. ISBN 9781450376990. Dostupné z DOI: 10.1145/3362966.3362976.
134. NOURBAKHS, Nargess; WANG, Yang; CHEN, Fang; CALVO, Rafael A. Using Galvanic Skin Response for Cognitive Load Measurement in Arithmetic and Reading Tasks. *Proceedings of the 24th Australian Computer-Human Interaction Conference on - OzCHI '12*. 2012. ISBN 9781450314381. Dostupné z DOI: 10.1145/2414536.
135. PAAS, Fred; TUOVINEN, Juhani E.; TABBERS, Huib; VAN GERVEN, Pascal W.M. Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational Psychologist*. 2003, roč. 38, č. 1, s. 63–71. ISSN 00461520. Dostupné z DOI: 10.1207/S15326985EP3801\_8.
136. POSADA-QUINTERO, Hugo F.; FLORIAN, John P.; ORJUELA-CAÑÓN, Alvaro D.; CHON, Ki H. Electrodermal activity is sensitive to cognitive stress under water. *Frontiers in Physiology*. 2018, roč. 8, č. 1, s. 1128. ISSN 1664042X. Dostupné z DOI: 10.3389/FPHYS.2017.01128/BIBTEX.
137. SHI, Yu; RUIZ, Natalie; TAIB, Ronnie; CHOI, Eric; CHEN, Fang. Galvanic skin response (GSR) as an index of cognitive load. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings*. 2007, s. 2651–2656. ISBN 1595936424. Dostupné z DOI: 10.1145/1240866.1241057.
138. SHIMOMURA, Yoshihiro; YODA, Takumi; SUGIURA, Koji; Horiguchi, Akinori; IWANAGA, Koichi et al. Use of frequency domain analysis of skin conductance for evaluation of mental workload. *Journal of Physiological Anthropology*. 2008, roč. 27, č. 4, s. 173–177. ISSN 18806791. Dostupné z DOI: 10.2114/JPA2.27.173.
139. KARA ROGERS SENIOR EDITOR, B.S. *The Respiratory System*. Britannica Educational Pub., 2010. The Human Body. ISBN 978-1-61530-147-8. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=jo5ETXP1WGYC>.
140. AYRES, Paul; LEE, Joy Yeonjoo; PAAS, Fred; MERRIËNBOER, Jeroen J. G. van. The Validity of Physiological Measures to Identify Differences in Intrinsic Cognitive Load. *Frontiers in Psychology*. 2021, roč. 12. ISSN 1664-1078. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.702538>.
141. MIRVIS, David M; GOLDBERGER, Ary L. Electrocardiography. *Heart disease*. 2001, roč. 1, s. 82–128. Dostupné také z: <http://www.doctor33.it/cont/download-center-files/17519/cap-electrocardiography-x20968allp1.pdf>.
142. YAO, Qihang; WANG, Ruxin; FAN, Xiaomao; LIU, Jikui; LI, Ye. Multi-class Arrhythmia detection from 12-lead varied-length ECG using Attention-based Time-Incremental Convolutional Neural Network. *Information Fusion*. 2020, roč. 53, s. 174–182. ISSN 1566-2535. Dostupné z DOI: 10.1016/j.inffus.2019.06.024.
143. BAIG, Mirza Mansoor; GHOLAMHOSSEINI, Hamid; CONNOLLY, Martin J. A comprehensive survey of wearable and wireless ECG monitoring systems for older adults. *Medical & Biological Engineering & Computing*. 2013, roč. 51, č. 5, s. 485–495. ISSN 1741-0444. Dostupné z DOI: 10.1007/s11517-012-1021-6.

144. MAJUMDER, Sumit; CHEN, Leon; MARINOV, Ognian; CHEN, Chih-Hung; MONDAL, Tapas et al. Noncontact Wearable Wireless ECG Systems for Long-Term Monitoring. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2018, roč. 11, s. 306–321. ISSN 1941-1189. Dostupné z DOI: 10.1109/RBME.2018.2840336.
145. SERHANI, Mohamed Adel; T. EL KASSABI, Hadeel; ISMAIL, Heba; NUJUM NAVAZ, Alramzana. ECG Monitoring Systems: Review, Architecture, Processes, and Key Challenges. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 66, s. 1796. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s20061796.
146. DOOREN, Marieke van; VRIES, J. J. G. (Gert-1) de; JANSSEN, Joris H. Emotional sweating across the body: Comparing 16 different skin conductance measurement locations. *Physiology & Behavior*. 2012, roč. 106, č. 2, s. 298–304. ISSN 0031-9384. Dostupné z DOI: 10.1016/j.physbeh.2012.01.020.
147. VAVRINSKY, Erik; STOPJAKOVA, Viera; KOPANI, Martin; KOSNACOVA, Helena. The Concept of Advanced Multi-Sensor Monitoring of Human Stress. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 1010, s. 3499. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s21103499.
148. LI, Shanshi; SUNG, Billy; LIN, Yuxia; MITAS, Ondrej. Electrodermal activity measure: A methodological review. *Annals of Tourism Research*. 2022, roč. 96, s. 103460. ISSN 0160-7383. Dostupné z DOI: 10.1016/j.annals.2022.103460.
149. POSADA-QUINTERO, Hugo F.; CHON, Ki H. Innovations in Electrodermal Activity Data Collection and Signal Processing: A Systematic Review. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 22, s. 479. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s20020479.
150. MASSARONI, Carlo; NICOLÒ, Andrea; LO PRESTI, Daniela; SACCHETTI, Massimo; SILVESTRI, Sergio et al. Contact-Based Methods for Measuring Respiratory Rate. *Sensors*. 2019, roč. 19, č. 44, s. 908. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s19040908.
151. MASSARONI, Carlo; NICOLO, Andrea; SACCHETTI, Massimo; SCHENA, Emiliano. Contactless Methods for Measuring Respiratory Rate: A Review. *IEEE Sensors Journal*. 2021, roč. 21, č. 11, s. 12821–12839. ISSN 15581748. Dostupné z DOI: 10.1109/JSEN.2020.3023486.
152. LIU, Haipeng; ALLEN, John; ZHENG, Dingchang; CHEN, Fei. Recent development of respiratory rate measurement technologies. *Physiological Measurement*. 2019, roč. 40, č. 7, 07TR01. ISSN 0967-3334. Dostupné z DOI: 10.1088/1361-6579/ab299e.
153. DE FAZIO, Roberto; STABILE, Marco; DE VITTORIO, Massimo; VELÁZQUEZ, Ramiro; VISCONTI, Paolo. An Overview of Wearable Piezoresistive and Inertial Sensors for Respiration Rate Monitoring. *Electronics*. 2021, roč. 10, č. 1717, s. 2178. ISSN 2079-9292. Dostupné z DOI: 10.3390/electronics10172178.
154. LEUBE, Julian; ZSCHOCKE, Johannes; KLUGE, Maria; PELIKAN, Luise; GRAF, Antonia et al. Reconstruction of the respiratory signal through ECG and wrist accelerometer data. *Scientific Reports*. 2020, roč. 10, č. 11, s. 14530. ISSN 2045-2322. Dostupné z DOI: 10.1038/s41598-020-71539-0.
155. NAM, Seungyeon; BAUTISTA, John Lorenzo; HAHM, Chanyoung; SHIN, Hyunsoon. Recognition of Respiratory Instability using a Photoplethysmography of Wrist-watch type Wearable Device. *IEIE Transactions on Smart Processing & Computing*. 2022, roč. 11, č. 2, s. 97–104.
156. ZSCHOCKE, Johannes; LEUBE, Julian; GLOS, Martin; SEMYACHKINA-GLUSHKOV-SKAYA, Oxana; PENZEL, Thomas et al. Reconstruction of Pulse Wave and Respiration From Wrist Accelerometer During Sleep. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 2022, roč. 69, č. 2, s. 830–839. ISSN 1558-2531. Dostupné z DOI: 10.1109/TBME.2021.3107978.

157. ESCABÍ, Monty A. 10 - BIOSIGNAL PROCESSING. In: *Introduction to Biomedical Engineering (Second Edition)*. Ed. ENDERLE, John D.; BLANCHARD, Susan M.; BRONZINO, Joseph D. Boston: Academic Press, 2005, s. 549–625. Biomedical Engineering. ISBN 978-0-12-238662-6. Dostupné z DOI: 10.1016/B978-0-12-238662-6.50012-4.
158. KARAGIANNIS, Alexandros; CONSTANTINO, Philip; VOUYIOUKAS, Demosthenes; KARAGIANNIS, Alexandros; CONSTANTINO, Philip et al. *Biomedical Time Series Processing and Analysis Methods: The Case of Empirical Mode Decomposition*. IntechOpen, 2011. ISBN 978-953-307-555-6. Dostupné z DOI: 10.5772/20906.
159. KHODADAD, D.; NORDEBO, S.; MÜLLER, B.; WALDMANN, A.; YERWORTH, R. et al. Optimized breath detection algorithm in electrical impedance tomography. *Physiological Measurement*. 2018, roč. 39, č. 9, s. 094001. ISSN 0967-3334. Dostupné z DOI: 10.1088/1361-6579/aad7e6.
160. POWER, Jonathan D.; LYNCH, Charles J.; DUBIN, Marc J.; SILVER, Benjamin M.; MARTIN, Alex et al. Characteristics of respiratory measures in young adults scanned at rest, including systematic changes and “missed” deep breaths. *NeuroImage*. 2020, roč. 204, s. 116234. ISSN 1053-8119. Dostupné z DOI: 10.1016/j.neuroimage.2019.116234.
161. SUBRAMANIAN, Sandya; BARBIERI, Riccardo; BROWN, Emery N. A Systematic Method for Preprocessing and Analyzing Electrodermal Activity. In: *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. 2019, s. 6902–6905. ISSN 1558-4615. Dostupné z DOI: 10.1109/EMBC.2019.8857757.
162. KRISHNAN, Sridhar; ATHAVALE, Yashodhan. Trends in biomedical signal feature extraction. *Biomedical Signal Processing and Control*. 2018, roč. 43, s. 41–63. ISSN 1746-8094. Dostupné z DOI: 10.1016/j.bspc.2018.02.008.
163. FOSTER, Kenneth R.; KOPROWSKI, Robert; SKUFCA, Joseph D. Machine learning, medical diagnosis, and biomedical engineering research - commentary. *BioMedical Engineering OnLine*. 2014, roč. 13, č. 1, s. 94. ISSN 1475-925X. Dostupné z DOI: 10.1186/1475-925X-13-94.
164. KORDING, Konrad Paul; BENJAMIN, Ari S.; FARHOODI, Roozbeh; GLASER, Joshua I. *The Roles of Machine Learning in Biomedical Science*. National Academies Press (US), 2018. Dostupné také z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK481619/>.
165. STRZELECKI, Michał; BADURA, Paweł. Machine Learning for Biomedical Application. *Applied Sciences*. 2022, roč. 12, č. 44, s. 2022. ISSN 2076-3417. Dostupné z DOI: 10.3390/app12042022.
166. GERON, Aurelien. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*. 3rd. O’Reilly Media, Inc., 2022. ISBN 9781098125974.
167. MURPHY, Kevin P. *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*. The MIT Press, 2012. ISBN 0262018020.
168. GOODFELLOW, Ian; BENGIO, Yoshua; COURVILLE, Aaron. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. <http://www.deeplearningbook.org>.
169. *Plot with polygons, ellipses, squares and rectangles* [online]. 2019. [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://tex.stackexchange.com/a/507813/289947>.
170. EFRON, Bradley; TIBSHIRANI, R. J. *An Introduction to the Bootstrap*. 1st edition. New York: Chapman a Hall/CRC, 1993. ISBN 978-0-412-04231-7.

171. ANGUIA, Davide; GHIO, Alessandro; ONETO, Luca; PARRA, Xavier; REYES-ORTIZ, Jorge Luis et al. A public domain dataset for human activity recognition using smartphones. In: *Esann*. 2013, sv. 3, s. 3.
172. KOHAVI, Ron. A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In: *Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence - Volume 2*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1995, s. 1137–1143. IJCAI'95. ISBN 978-1-55860-363-9.
173. GHOJOGH, Benyamin; CROWLEY, Mark. *The Theory Behind Overfitting, Cross Validation, Regularization, Bagging, and Boosting: Tutorial*. arXiv, 2019. Dostupné z DOI: 10.48550/ARXIV.1905.12787.
174. *Adding text to a graphic in tikz* [online]. 2020. [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://tex.stackexchange.com/a/562199/289947>.
175. LIASHCHYNSKYI, Petro; LIASHCHYNSKYI, Pavlo. Grid Search, Random Search, Genetic Algorithm: A Big Comparison for NAS. *CoRR*. 2019, roč. abs/1912.06059. Dostupné z arXiv: 1912.06059.
176. ANGGORO, Dimas Aryo; MUKTI, Salsa Sasmita. Performance Comparison of Grid Search and Random Search Methods for Hyperparameter Tuning in Extreme Gradient Boosting Algorithm to Predict Chronic Kidney Failure. *Int. J. Intell. Eng. Syst.* 2021, roč. 14, č. 6, s. 198–207.
177. BERGSTRA, James; BENGIO, Yoshua. Random search for hyper-parameter optimization. *The Journal of Machine Learning Research*. 2012, roč. 13, č. null, s. 281–305. ISSN 1532-4435.
178. ALIBRAHIM, Hussain; LUDWIG, Simone A. Hyperparameter Optimization: Comparing Genetic Algorithm against Grid Search and Bayesian Optimization. In: *2021 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. 2021, s. 1551–1559. Dostupné z DOI: 10.1109/CEC45853.2021.9504761.
179. PARKER, Wendy S. Ensemble modeling, uncertainty and robust predictions. *WIREs Climate Change*. 2013, roč. 4, č. 3, s. 213–223. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1002/wcc.220>.
180. SUZUKI, Kenji. *Artificial Neural Networks - Architectures and Applications*. 2013. ISBN 978-953-51-0935-8. Dostupné z DOI: 10.5772/3409.
181. *Plotting the gradient descent?* [online]. 2019. [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://tex.stackexchange.com/questions/497165/plotting-the-gradient-descent>.
182. SHARMA, Sagar; SHARMA, Simone; ATHAIYA, Anidhya. Activation functions in neural networks. *Towards Data Sci* [online]. 2017, roč. 6, č. 12, s. 310–316 [cit. 2022-06-24]. Dostupné z: <https://www.ijeast.com/papers/310-316,Tesma412,IJEAST.pdf>.
183. *How to format table with images?* [online]. 2018. [cit. 2022-06-18]. Dostupné z: <https://tex.stackexchange.com/questions/431200/how-to-format-table-with-images>.
184. NAIR, Vinod; HINTON, Geoffrey E. Rectified linear units improve restricted boltzmann machines. In: *Proceedings of the 27th International Conference on International Conference on Machine Learning*. Madison, WI, USA: Omnipress, 2010, s. 807–814. ICML'10. ISBN 978-1-60558-907-7. Dostupné také z: <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3104322.3104425>.
185. *Modicon Modbus Protocol Reference Guide*. U.S.A, North Andover, Massachusetts, 1996. Dostupné také z: [https://modbus.org/docs/PI\\_MBUS\\_300.pdf](https://modbus.org/docs/PI_MBUS_300.pdf).



186. SCHMIDT, Philip; REISS, Attila; DUERICHEN, Robert; MARBERGER, Claus; VAN LAERHOVEN, Kristof. Introducing WESAD, a Multimodal Dataset for Wearable Stress and Affect Detection. In: *Proceedings of the 20th ACM International Conference on Multimodal Interaction* [online]. Boulder, CO, USA: Association for Computing Machinery, 2018, s. 400–408 [cit. 2021-06-18]. ICMI '18. ISBN 9781450356923. Dostupné z DOI: 10.1145/3242969.3242985.
187. MARKOVA, Valentina; GANCHEV, Todor; KALINKOV, Kalin. CLAS: A Database for Cognitive Load, Affect and Stress Recognition. In: *2019 International Conference on Biomedical Innovations and Applications (BIA)* [online]. 2019, s. 1–4 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.1109/BIA48344.2019.8967457.
188. KALIDAS, Vignesh; TAMIL, Lakshman. Real-time QRS detector using Stationary Wavelet Transform for Automated ECG Analysis. In: *2017 IEEE 17th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)* [online]. 2017, s. 457–461 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.1109/BIBE.2017.00–12.
189. PAN, Jiapu; TOMPKINS, Willis J. A Real-Time QRS Detection Algorithm. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* [online]. 1985, roč. BME-32, č. 3, s. 230–236 [cit. 2021-06-24]. Dostupné z DOI: 10.1109/TBME.1985.325532.
190. NASON, G. P.; SILVERMAN, B. W. The Stationary Wavelet Transform and some Statistical Applications. In: *Wavelets and Statistics*. Ed. ANTONIADIS, Anestis; OPPENHEIM, Georges. New York, NY: Springer, 1995, s. 281–299. Lecture Notes in Statistics. ISBN 978-1-4612-2544-7. Dostupné z DOI: 10.1007/978-1-4612-2544-7\_17.
191. GOLDBERGER, A. L.; AMARAL, L. A. N.; GLASS, L.; HAUSDORFF, J. M.; IVANOV, P. Ch. et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals. *Circulation*. 2000, roč. 101, č. 23, e215–e220. Circulation Electronic Pages: <http://circ.ahajournals.org/content/101/23/e215.full> PMID:1085218; doi: 10.1161/01.CIR.101.23.e215.
192. MOODY, G.B.; MARK, R.G. The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine* [online]. 2001, roč. 20, č. 3, s. 45–50 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.1109/51.932724.
193. THE BETH ISRAEL DEACONESS MEDICAL CENTER, The Arrhythmia Laboratory. *The MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database*. physionet.org, 1990. Dostupné z DOI: 10.13026/C2NK5R.
194. HOWELL, L.; PORR, B. *High precision ECG Database with annotated R peaks, recorded and filmed under realistic conditions* [online]. 2018. [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.5525/gla.researchdata.716. University of Glasgow.
195. IYENGAR, N.; PENG, C. K.; MORIN, R.; GOLDBERGER, A. L.; LIPSITZ, L. A. Age-related alterations in the fractal scaling of cardiac interbeat interval dynamics. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology* [online]. 1996, roč. 271, č. 4, R1078–R1084 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.1152/ajpregu.1996.271.4.R1078. PMID: 8898003.
196. KALYAKULINA, Alena; YUSIPOV, Igor; MOSKALENKO, Viktor; NIKOLSKIY, Alexander; KOSONOGOV, Konstantin et al. LUDB: A New Open-Access Validation Tool for Electrocardiogram Delineation Algorithms. *IEEE Access* [online]. 2020, roč. 8, s. 186181–186190 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3029211.

197. VOLLMER, M.; BLÄSING, D.; REISER, J. E.; NISSER, M.; BUDER, A. *Simultaneous physiological measurements with five devices at different cognitive and physical loads (version 1.0.0)* [online]. 2020. [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.13026/chd5-t946. PhysioNet.
198. MEHRGARDT, P.; KHUSHI, M.; POON, S.; WITHANA, A. *Pulse Transit Time PPG Dataset (version 1.1.0)* [online]. 2022. [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.13026/jpan-6n92. PhysioNet.
199. HALEM, Sjoerd van; ROEKEL, Eeske van; KROENCKE, Lara; KUPER, Niclas; DENISSEN, Jaap. Moments that Matter? On the Complexity of using Triggers Based on Skin Conductance to Sample Arousing Events within an Experience Sampling Framework. *European Journal of Personality* [online]. 2020, roč. 34, č. 5, s. 794–807 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.1002/per.2252.
200. POSADA-QUINTERO, Hugo; FLORIAN, John; ORJUELA-CañÓN, Alvaro; CORRALES, Tomás; CHARLESTON-VILLALOBOS, Sonia et al. Power Spectral Density Analysis of Electrodermal Activity for Sympathetic Function Assessment. *Annals of Biomedical Engineering* [online]. 2016, roč. 44 [cit. 2021-06-18]. Dostupné z DOI: 10.1007/s10439-016-1606-6.
201. CASTALDO, R.; MONTESINOS, L.; MELILLO, P.; JAMES, C.; PECCHIA, L. Ultra-short term HRV features as surrogates of short term HRV: a case study on mental stress detection in real life. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2019, roč. 19, č. 1, s. 12. ISSN 1472-6947. Dostupné z DOI: 10.1186/s12911-019-0742-y.
202. KIM, Jin Woong; SEOK, Hyeon Seok; SHIN, Hangsik. Is Ultra-Short-Term Heart Rate Variability Valid in Non-static Conditions? *Frontiers in Physiology*. 2021, roč. 12. ISSN 1664-042X. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2021.596060>.
203. PECCHIA, Leandro; CASTALDO, Rossana; MONTESINOS, Luis; MELILLO, Paolo. Are ultra-short heart rate variability features good surrogates of short-term ones? State-of-the-art review and recommendations. *Healthcare Technology Letters*. 2018, roč. 5, č. 3, s. 94–100. ISSN 2053-3713. Dostupné z DOI: 10.1049/htl.2017.0090.
204. SHAFFER, Fred; MEEHAN, Zachary M.; ZERR, Christopher L. A Critical Review of Ultra-Short-Term Heart Rate Variability Norms Research. *Frontiers in Neuroscience*. 2020, roč. 14. ISSN 1662-453X. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2020.594880>.
205. TERVONEN, Jaakko; PETTERSSON, Kati; MÄNTYJÄRVI, Jani. Ultra-Short Window Length and Feature Importance Analysis for Cognitive Load Detection from Wearable Sensors. *Electronics*. 2021, roč. 10, č. 55, s. 613. ISSN 2079-9292. Dostupné z DOI: 10.3390/electronics10050613.
206. ZHAO, Zhidong; ZHANG, Yefei. SQI Quality Evaluation Mechanism of Single-Lead ECG Signal Based on Simple Heuristic Fusion and Fuzzy Comprehensive Evaluation. *Frontiers in Physiology*. 2018, roč. 9. ISSN 1664-042X. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2018.00727>.
207. PEREIRA, Tânia; ALMEIDA, Pedro R.; CUNHA, João P. S.; AGUIAR, Ana. Heart rate variability metrics for fine-grained stress level assessment. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2017, roč. 148, s. 71–80. ISSN 0169-2607. Dostupné z DOI: 10.1016/j.cmpb.2017.06.018.

208. SHAFFER, Fred; GINSBERG, J. P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*. 2017, roč. 5. ISSN 2296-2565. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2017.00258>.
209. GREEN, Peter; MACLEOD, Catriona J. SIMR: an R package for power analysis of generalized linear mixed models by simulation. *Methods in Ecology and Evolution*. 2016, roč. 7, č. 4, s. 493–498. ISSN 2041-210X. Dostupné z DOI: 10.1111/2041-210X.12504.
210. BOLKER, Benjamin M. Ecological Models and Data in R. In: *Ecological Models and Data in R*. Princeton University Press, 2008. ISBN 978-1-4008-4090-8. Dostupné z DOI: 10.1515/9781400840908.
211. JOHNSON, Paul C. D.; BARRY, Sarah J. E.; FERGUSON, Heather M.; MÜLLER, Pie. Power analysis for generalized linear mixed models in ecology and evolution. *Methods in Ecology and Evolution*. 2015, roč. 6, č. 2, s. 133–142. ISSN 2041-210X. Dostupné z DOI: 10.1111/2041-210X.12306.
212. GENT, Paul van; FARAH, Haneen; NES, Nicole van; AREM, Bart van. HeartPy: A novel heart rate algorithm for the analysis of noisy signals. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*. 2019, roč. 66, s. 368–378. ISSN 1369-8478. Dostupné z DOI: 10.1016/j.trf.2019.09.015.
213. MCINNES, Leland; HEALY, John; MELVILLE, James. *UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction* [online]. arXiv, 2018 [cit. 2021-06-24]. Dostupné z DOI: 10.48550/ARXIV.1802.03426.
214. BATISTA, Gustavo; BAZZAN, Ana; MONARD, Maria-Carolina. Balancing Training Data for Automated Annotation of Keywords: a Case Study. In: *WOB*. 2003, s. 18.
215. CHAWLA, N. V.; BOWYER, K. W.; HALL, L. O.; KEGELMEYER, W. P. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2002, roč. 16, s. 321–357. ISSN 1076-9757. Dostupné z DOI: 10.1613/jair.953.
216. SCHINDLER, Katerina. *Granger Lasso Causal Models in Higher Dimensions - Application to Gene Expression Regulatory Networks*. 2013.
217. *Decision Making: Uncertainty, Imperfection, Deliberation and Scalability*. Softcover reprint of the original 1st ed. 2015 edition. Springer, 2016. ISBN 978-3-319-35020-2.
218. LIU, Yan; BAHADORI, Taha; LI, Hongfei. Sparse-GEV: Sparse Latent Space Model for Multivariate Extreme Value Time Serie Modeling. 2012, č. arXiv:1206.4685. Dostupné z DOI: 10.48550/arXiv.1206.4685.
219. WANG, Zhiguang; OATES, Tim. Imaging Time-Series to Improve Classification and Imputation. 2015, č. arXiv:1506.00327. Dostupné z DOI: 10.48550/arXiv.1506.00327.
220. MAZZIA, Vittorio; SALVETTI, Francesco; CHIABERGE, Marcello. Efficient-CapsNet: capsule network with self-attention routing. *Scientific Reports*. 2021, roč. 11, č. 11, s. 14634. ISSN 2045-2322. Dostupné z DOI: 10.1038/s41598-021-93977-0.
221. ZHOU, Houliang; KAN, Chen. Tensor-Based ECG Anomaly Detection toward Cardiac Monitoring in the Internet of Health Things. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 1212, s. 4173. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s21124173.
222. HINTON, Geoffrey E.; KRIZHEVSKY, Alex; WANG, Sida D. Transforming Auto-Encoders. In: HONKELA, Timo; DUCH, Włodzisław; GIROLAMI, Mark; KASKI, Samuel (ed.). *Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2011*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, s. 44–51. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-642-21735-7. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-642-21735-7\_6.

223. WEST, Brady T.; WELCH, Kathleen B.; GALECKI, Andrzej T. *Linear Mixed Models: A Practical Guide Using Statistical Software*. CRC Press, 2022. ISBN 978-1-00-059827-8.
224. GRANGER, C. W. J. Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. *Econometrica*. 1969, roč. 37, č. 3, s. 424–438. ISSN 0012-9682. Dostupné z DOI: 10.2307/1912791.
225. ARNOLD, Andrew; LIU, Yan; ABE, Naoki. Temporal causal modeling with graphical granger methods. In: *Proceedings of the 13th ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2007, s. 66–75. KDD '07. ISBN 978-1-59593-609-7. Dostupné z DOI: 10.1145/1281192.1281203.
226. TIBSHIRANI, Robert. Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*. 1996, roč. 58, č. 1, s. 267–288. ISSN 2517-6161. Dostupné z DOI: 10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x.
227. BAHADORI, Mohammad Taha; LIU, Yan. An Examination of Practical Granger Causality Inference. In: *Proceedings of the 2013 SIAM International Conference on Data Mining (SDM)*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2013, s. 467–475. Proceedings. ISBN 978-1-61197-262-7. Dostupné z DOI: 10.1137/1.9781611972832.52.
228. CHRISTOV, Ivaylo I. Real time electrocardiogram QRS detection using combined adaptive threshold. *BioMedical Engineering OnLine*. 2004, roč. 3, č. 1, s. 28. ISSN 1475-925X. Dostupné z DOI: 10.1186/1475-925X-3-28.
229. NABIAN, Mohsen; YIN, Yu; WORMWOOD, Jolie; QUIGLEY, Karen S.; BARRETT, Lisa F. et al. An Open-Source Feature Extraction Tool for the Analysis of Peripheral Physiological Data. *IEEE journal of translational engineering in health and medicine*. 2018, roč. 6, s. 2800711. ISSN 2168-2372. Dostupné z DOI: 10.1109/JTEHM.2018.2878000.
230. RODRIGUES, Tiago; SAMOUTPHONH, Sirisack; SILVA, Hugo; FRED, Ana. A Low-Complexity R-peak Detection Algorithm with Adaptive Thresholding for Wearable Devices. In: *2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*. 2021, s. 1–8. ISSN 1051-4651. Dostupné z DOI: 10.1109/ICPR48806.2021.9413245.
231. ELGENDI, Mohamed; JONKMAN, Mirjam; DE BOER, Friso. Frequency Bands Effects on QRS Detection. In: 2010, s. 431. ISBN 978-989-674-018-4.
232. GAMBOA, Hugo. *Multi-modal behavioral biometrics based on HCI and electrophysiology*. 2008. Dis. pr. Universidade Técnica de Lisboa.
233. FERADOV, Firgan; GANCHEV, Todor; MARKOVA, Valentina. Automated Detection of Cognitive Load from Peripheral Physiological Signals based on Hjorth's Parameters. In: *2020 International Conference on Biomedical Innovations and Applications (BIA)*. 2020, s. 85–88. Dostupné z DOI: 10.1109/BIA50171.2020.9244287.
234. AHMAD, Zeeshan; RABBANI, Suha; ZAFAR, Muhammad Rehman; ISHAQUE, Syem; KRISHNAN, Sridhar et al. Multi-level Stress Assessment from ECG in a Virtual Reality Environment using Multimodal Fusion. 2021, č. arXiv:2107.04566. Dostupné z DOI: 10.48550/arXiv.2107.04566.
235. GARG, Prerna; SANTHOSH, Jayasankar; DENGEL, Andreas; ISHIMARU, Shoya. Stress Detection by Machine Learning and Wearable Sensors. In: *26th International Conference on Intelligent User Interfaces - Companion*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, s. 43–45. IUI '21 Companion. ISBN 978-1-4503-8018-8. Dostupné z DOI: 10.1145/3397482.3450732.

236. RABBANI, Suha; KHAN, Naimul. Contrastive Self-Supervised Learning for Stress Detection from ECG Data. *Bioengineering*. 2022, roč. 9, č. 88, s. 374. ISSN 2306-5354. Dostupné z DOI: 10.3390/bioengineering9080374.
237. ZHU, Lili; SPACHOS, Petros; GREGORI, Stefano. Multimodal Physiological Signals and Machine Learning for Stress Detection by Wearable Devices. In: *2022 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*. 2022, s. 1–6. Dostupné z DOI: 10.1109/MeMeA54994.2022.9856558.
238. QUADRINI, Michela; DABERDAKU, Sebastian; BLANDA, Alessandro; CAPUCCIO, Antonino; BELLANOVA, Luca et al. Stress Detection from Wearable Sensor Data Using Gramian Angular Fields and CNN. In: PASCAL, Poncelet; IENCO, Dino (ed.). *Discovery Science*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2022, s. 173–183. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-031-18840-4. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-031-18840-4\_13.
239. CHATTERJEE, Debatri; DUTTA, Souvik; SHAIKH, Rahul; SAHA, Sanjoy Kumar. A lightweight deep neural network for detection of mental states from physiological signals. *Innovations in Systems and Software Engineering*. 2022. ISSN 1614-5054. Dostupné z DOI: 10.1007/s11334-022-00470-6.
240. DAIR, Zachary; DOCKRAY, Samantha; O'REILLY, Ruairi. Inter and Intra Signal Variance in Feature Extraction and Classification of Affective State. In: LONGO, Luca; O'REILLY, Ruairi (ed.). *Artificial Intelligence and Cognitive Science*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, s. 3–17. Communications in Computer and Information Science. ISBN 978-3-031-26438-2. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-031-26438-2\_1.
241. RASHID, Nafiul; MORTLOCK, Trier; FARUQUE, Mohammad Abdullah Al. Stress Detection using Context-Aware Sensor Fusion from Wearable Devices. *IEEE Internet of Things Journal*. 2023, s. 1–1. ISSN 2327-4662. Dostupné z DOI: 10.1109/JIOT.2023.3265768.
242. SAGASTIBELTZA GALARRAGA, Nagore; SALAZAR RAMÍREZ, Asier; MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, Raquel; JODRÁ LUQUE, José Luis; MUGUERZA RIVERO, Javier Francisco. Automatic detection of the mental state in responses towards relaxation. 2023. ISSN 1433-3058. Dostupné z DOI: 10.1007/s00521-022-07435-7.
243. HENRY, John; LLOYD, Huw; TURNER, Martin; KENDRICK, Connah. On the robustness of machine learning models for stress and anxiety recognition from heart activity signals. 2023. Dostupné z DOI: 10.36227/techrxiv.21688352.v2.
244. YONG, Zirui; SU, Guoxin; LI, Xiaohu; SUN, Lingyun; LI, Zejian et al. Recognizing Cognitive Load by a Hybrid Spatio-Temporal Causal Model from Multivariate Physiological Data. In: AMINI, Massih-Reza; CANU, Stéphane; FISCHER, Asja; GUNS, Tias; KRALJ NOVAK, Petra et al. (ed.). *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, s. 318–334. Lecture Notes in Computer Science. ISBN 978-3-031-26422-1. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-031-26422-1\_20.
245. SINGH, Ghanapriya; PHUKAN, Orchid Chetia; KUMAR, Ravinder. Stress recognition with multi-modal sensing using bootstrapped ensemble deep learning model. *Expert Systems*. [B.r.], roč. n/a, č. n/a, e13239. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1111/exsy.13239>.
246. NIGUSSE, Abreha Bayrau; MALENGIER, Benny; MENGISTIE, Desalegn Alemu; TSEGHAJ, Granch Berhe; VAN LANGENHOVE, Lieva. Development of Washable Silver Printed Textile Electrodes for Long-Term ECG Monitoring. *Sensors*. 2020, roč. 20, č. 2121, s. 6233. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s20216233.

247. NIGUSSE, Abreha Bayrau; MENGISTIE, Desalegn Alemu; MALENGIER, Benny; TSEGHAJ, Granch Berhe; LANGENHOVE, Lieva Van. Wearable Smart Textiles for Long-Term Electrocardiography Monitoring—A Review. *Sensors*. 2021, roč. 21, č. 1212, s. 4174. ISSN 1424-8220. Dostupné z DOI: 10.3390/s21124174.
248. BIJL, Kirina van der; ELGENDI, Mohamed; MENON, Carlo. Automatic ECG Quality Assessment Techniques: A Systematic Review. *Diagnostics*. 2022, roč. 12, č. 1111, s. 2578. ISSN 2075-4418. Dostupné z DOI: 10.3390/diagnostics12112578.
249. SATIJA, Udit; RAMKUMAR, Barathram; MANIKANDAN, M. Sabarimalai. A Review of Signal Processing Techniques for Electrocardiogram Signal Quality Assessment. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2018, roč. 11, s. 36–52. ISSN 1941-1189. Dostupné z DOI: 10.1109/RBME.2018.2810957.
250. CLARK, Tom S.; LINZER, Drew A. Should I Use Fixed or Random Effects? *Political Science Research and Methods*. 2015, roč. 3, č. 2, s. 399–408. ISSN 2049-8470, ISSN 2049-8489. Dostupné z DOI: 10.1017/psrm.2014.32.
251. GOMES, Dylan G.E. Should I use fixed effects or random effects when I have fewer than five levels of a grouping factor in a mixed-effects model? *PeerJ*. 2022, roč. 10, e12794. ISSN 2167-8359. Dostupné z DOI: 10.7717/peerj.12794.
252. WINTER, De; C .F, J. Using the Student’s “t”-Test with Extremely Small Sample Sizes. *Practical Assessment, Research & Evaluation*. 2013, roč. 18, č. 10. ISSN 1531-7714. Dostupné také z: <https://eric.ed.gov/?id=EJ1015748>.
253. MUTH, Chelsea; BALES, Karen L.; HINDE, Katie; MANINGER, Nicole; MENDOZA, Sally P. et al. Alternative Models for Small Samples in Psychological Research: Applying Linear Mixed Effects Models and Generalized Estimating Equations to Repeated Measures Data. *Educational and Psychological Measurement*. 2016, roč. 76, č. 1, s. 64–87. ISSN 1552-3888. Dostupné z DOI: 10.1177/0013164415580432.
254. CHAPPELL, Steven P.; ABERCROMBY, Andrew F.; GERNHARDT, Michael L. NEEMO 15: Evaluation of human exploration systems for near-Earth asteroids. *Acta Astronautica*. 2013, roč. 89, s. 166–178. ISSN 0094-5765. Dostupné z DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.03.002.
255. LAFÈRE, Pierre; LAMBRECHTS, Kate; GERMONPRÉ, Peter; BALESTRA, Ambre; GERMONPRÉ, Faye Lisa et al. Heart Rate Variability During a Standard Dive: A Role for Inspired Oxygen Pressure? *Frontiers in Physiology*. 2021, roč. 12. ISSN 1664-042X. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2021.635132>.
256. LUND, V. E.; KENTALA, E.; SCHEININ, H.; KLOSSNER, J.; HELENIUS, H. et al. Heart rate variability in healthy volunteers during normobaric and hyperbaric hyperoxia. *Acta Physiologica Scandinavica*. 1999, roč. 167, č. 1, s. 29–35. ISSN 0001-6772. Dostupné z DOI: 10.1046/j.1365-201x.1999.00581.x.
257. LUND, V.; KENTALA, E.; SCHEININ, H.; KLOSSNER, J.; SARIOLA-HEINONEN, K. et al. Hyperbaric oxygen increases parasympathetic activity in professional divers. *Acta Physiologica Scandinavica*. 2000, roč. 170, č. 1, s. 39–44. ISSN 0001-6772. Dostupné z DOI: 10.1046/j.1365-201x.2000.00761.x.
258. MA, Chenbin; XU, Haoran; YAN, Muyang; HUANG, Jie; YAN, Wei et al. Longitudinal Changes and Recovery in Heart Rate Variability of Young Healthy Subjects When Exposure to a Hypobaric Hypoxic Environment. *Frontiers in Physiology*. 2022, roč. 12. ISSN 1664-042X. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphys.2021.688921>.

259. GOYAL, Amandeep; CHONIS, Tyler; BHYAN, Poonam; COOPER, Jeffrey S. Hyperbaric Cardiovascular Effects. In: *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2023. Dostupné také z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482231/>.
260. PAULA-RIBEIRO, Marcelle; RIBEIRO, Indyanara C.; ARANDA, Liliane C.; SILVA, Talita M.; COSTA, Camila M. et al. Carotid chemoreflex activity restrains post-exercise cardiac autonomic control in healthy humans and in patients with pulmonary arterial hypertension. *The Journal of Physiology*. 2019, roč. 597, č. 5, s. 1347–1360. ISSN 1469-7793. Dostupné z DOI: 10.1113/JP277190.
261. FORTE, Giuseppe; FAVIERI, Francesca; CASAGRANDE, Maria. Heart Rate Variability and Cognitive Function: A Systematic Review. *Frontiers in Neuroscience*. 2019, roč. 13. ISSN 1662-453X. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2019.00710>.
262. MONTI, Stefano; TAMAYO, Pablo; MESIROV, Jill; GOLUB, Todd. Consensus Clustering: A Resampling-Based Method for Class Discovery and Visualization of Gene Expression Microarray Data. *Machine Learning*. 2003, roč. 52, č. 1, s. 91–118. ISSN 1573-0565. Dostupné z DOI: 10.1023/A:1023949509487.
263. CHAMBERS, Christopher D.; FEREDOES, Eva; MUTHUKUMARASWAMY, Suresh Daniel; ETCHELLES, Peter. Instead of “playing the game” it is time to change the rules: Registered Reports at AIMS Neuroscience and beyond. *AIMS Neuroscience*. 2014, roč. 1, č. 11, s. 4–17. Dostupné z DOI: 10.3934/Neuroscience.2014.1.4.
264. SZUCS, Denes; IOANNIDIS, John PA. When null hypothesis significance testing is unsuitable for research: a reassessment. 2016, s. 095570. Dostupné z DOI: 10.1101/095570.
265. BENJAMIN, Daniel J.; BERGER, James O.; JOHANNESSON, Magnus; NOSEK, Brian A.; WAGENMAKERS, E.-J. et al. Redefine statistical significance. *Nature Human Behaviour*. 2018, roč. 2, č. 11, s. 6–10. ISSN 2397-3374. Dostupné z DOI: 10.1038/s41562-017-0189-z.
266. WINKLER, R. L. Why Bayesian analysis hasn't caught on in healthcare decision making. *International Journal of Technology Assessment in Health Care*. 2001, roč. 17, č. 1, s. 56–66. ISSN 0266-4623. Dostupné z DOI: 10.1017/s026646230110406x.
267. FERREIRA, David; BARTHOULOT, Mael; POTTECHER, Julien; TORP, Klaus D.; DIEMUNSCH, Pierre et al. Theory and practical use of Bayesian methods in interpreting clinical trial data: a narrative review. *British Journal of Anaesthesia*. 2020, roč. 125, č. 2, s. 201–207. ISSN 0007-0912, ISSN 1471-6771. Dostupné z DOI: 10.1016/j.bja.2020.04.092.
268. ETZ, Alexander; VANDEKERCKHOVE, Joachim. A Bayesian Perspective on the Reproducibility Project: Psychology. *PLOS ONE*. 2016, roč. 11, č. 2, e0149794. ISSN 1932-6203. Dostupné z DOI: 10.1371/journal.pone.0149794.
269. KRUSCHKE, John K.; AGUINIS, Herman; JOO, Harry. The Time Has Come: Bayesian Methods for Data Analysis in the Organizational Sciences. *Organizational Research Methods*. 2012, roč. 15, č. 4, s. 722–752. ISSN 1094-4281. Dostupné z DOI: 10.1177/1094428112457829.
270. KRUSCHKE, John K. What to believe: Bayesian methods for data analysis. *Trends in Cognitive Sciences*. 2010, roč. 14, č. 7, s. 293–300. ISSN 1364-6613. Dostupné z DOI: 10.1016/j.tics.2010.05.001.

# Přílohy



# Informovaný souhlas

## Informovaný souhlas s účastí ve výzkumu a souhlas se zpracováním osobních údajů v rámci projektu TAČR s názvem „Nástroj pro zkoumání vlivu osobnostních charakteristik a vnějších faktorů na dynamiku týmu při dlouhodobém pobytu v ICE environment“

dle nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2016/679 (dále jen „GDPR“) a dle Etického kodexu Evropské federace psychologických asociací (Meta-Code of Ethics; European Federation of Psychologists' Associations; 2005; <http://www.efpa.eu/ethics/ethical-codes>; dále jen „etické standardy výzkumu“)

Cílem projektu je vytvoření a ověření funkčnosti rozličných nástrojů pro zkoumání vlivu osobnostních charakteristik a jiných vnějších faktorů ovlivňujících psychiku na prožívání jedince a dynamiku celého týmu při pobytu v izolovaných, stísněných a extrémních podmínkách. Jedná se o analogickou vesmírnou misi simulující průzkum měsíčního povrchu probíhající paralelně s dvěma tříčlennými posádkami v experimentálních habitatech Hydronaut (na hladině a pod hladinou vody).

Během experimentu budou s etickými standardy výzkumu Správcem sledovány a sbírány následující informace a údaje o účastnících výzkumu - Subjektech údajů:

- identifikační a kontaktní údaje,
- výsledky psychologických diagnostických nástrojů zaměřených na kognitivní výkon, osobnostní charakteristiky, vztahy ve skupině a reflexi zvládnání úkolů a prožívání během experimentu,
- kontinuální sledování biometrických údajů o srdeční činnosti,
- údaje o zdravotním stavu na základě pravidelných lékařských prohlídek,
- kontinuální nahrávky z vícero kamer z prostředí habitatů,
- obličejová exprese emocí,
- videozáznamy individuálních polostrukturovaných rozhovorů,
- dokumenty vytvořené posádkami během experimentu.

Sběr dat probíhá ve spolupráci s Katedrou zdravotnických oborů a ochrany obyvatelstva na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVÚT. Sebraná data mohou být bez spojitosti se Subjektem údajů (tj. anonymizovaně) využita při analýze a publikování a v rámci projektu „Nástroj pro zkoumání vlivu osobnostních charakteristik a vnějších faktorů na dynamiku týmu při dlouhodobém pobytu v ICE environment“, číslo: TL05000228. K osobním údajům a datům z výzkumu budou mít přístup pouze členové projektu TAČR TL05000228 z týmu Katedry psychologie na Filozofické fakultě univerzity Palackého v Olomouci. Konkrétně se jedná o tyto výzkumné pracovníky: Roman Procházka, Klára Seitlová, Martin Seitl, Miroslav Charvát a Martin Dolejš. K anonymizovaným datům budou mít přístup pověřeni pracovníci projektu TAČR TL05000228. Řešitelský tým se řídí etickými standardy výzkumu.

Data budou Správcem bezpečně uchovávána, po dobu pěti let.

Subjekt údajů má právo:

- požádat o bezplatný přístup ke svým osobním údajům zpracovávaným Správcem,
- požádat o kopii těchto osobních údajů,
- požádat o opravu nepřesných osobních údajů,
- požádat o výmaz osobních údajů zpracovávaných Správcem, pokud již pominul účel zpracování, pokud Subjekt údajů souhlas odvolá, pokud vznese námitky proti zpracování, nebo pokud jsou Správcem zpracovávány protiprávně,
- požádat o omezení zpracování svých osobních údajů (např. Správce již údaje nepotřebuje, ale Subjekt je požaduje pro určení, výkon nebo obhajobu právních nároků),
- na přenositelnost údajů (Správce je povinen vydat osobní údaje Subjektu údajů zpracovávané automatizovaně na základě souhlasu Subjektu jinému správci ve strukturovaném, běžně používaném a strojově čitelném formátu.).

Správce má pověření pro ochranu osobních údajů. Kontaktní údaje pověření pro ochranu osobních údajů jsou: doc. PhDr. Mgr. Roman Procházka, Ph.D., [roman.prochazka@upol.cz](mailto:roman.prochazka@upol.cz).

Subjekt údajů má právo podat stížnost proti zpracování u dozorového orgánu, kterým je Úřad na ochranu osobních údajů, případně může podat žalobu u soudu.

Souhlas se zpracováním osobních údajů může Subjekt kdykoliv odvolat.

Správce je oprávněn zpracovávat výše uvedené osobní údaje v souladu s GDPR a zákonem na ochranu osobních údajů i bez souhlasu Subjektu údaje jen v případech, pokud je zpracování nezbytné pro splnění právní povinnosti nebo pro plnění smlouvy, jakož i v případech oprávněných zájmů Správce.



Projekt TL05000228 Nástroj pro zkoumání vlivu osobnostních charakteristik a vnějších faktorů na dynamiku týmu při dlouhodobém pobytu v ICE environment je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu na podporu aplikovaného společenskovědního a humanitního výzkumu, experimentálního vývoje a inovací ÉTA

Stránka 1 z 2

---

Další informace o svých právech v oblasti zpracování osobních údajů a o tom, jak svá práva na Univerzitě Palackého v Olomouci uplatnit, naleznete na internetových stránkách Univerzity Palackého v Olomouci, sekce Univerzita, oddíl Ochrana osobních údajů - <https://www.upol.cz/univerzita/ochrana-osobnich-udaju/>.

Já, níže podepsaný/á ..... , narozen dne .....  
(Subjekt údajů)

**dávám instituci**

Univerzita Palackého v Olomouci, Filozofická fakulta, Katedra psychologie,  
se sídlem: Křížkovského 511/8, 779 00 Olomouc, Česká republika, IČ: 61989592  
(Správce)

**dobrovolně souhlas se zpracováním výše uvedených osobních a výzkumných údajů o mé osobě za výše uvedených podmínek.**

**Potvrzuji, že jsem byl/a poučen/a o svých právech v souvislosti se sběrem a zpracováním mých osobních údajů v rámci GDPR i etických standardů výzkumu.**

**Souhlasím s účastí na tomto experimentálním výzkumu.**

**Zavazuji se k mlčenlivosti o citlivých a důvěrných informacích, které během experimentu o ostatních účastnících získám.**

Místo: ..... Datum: ..... Podpis: .....

Za Správce

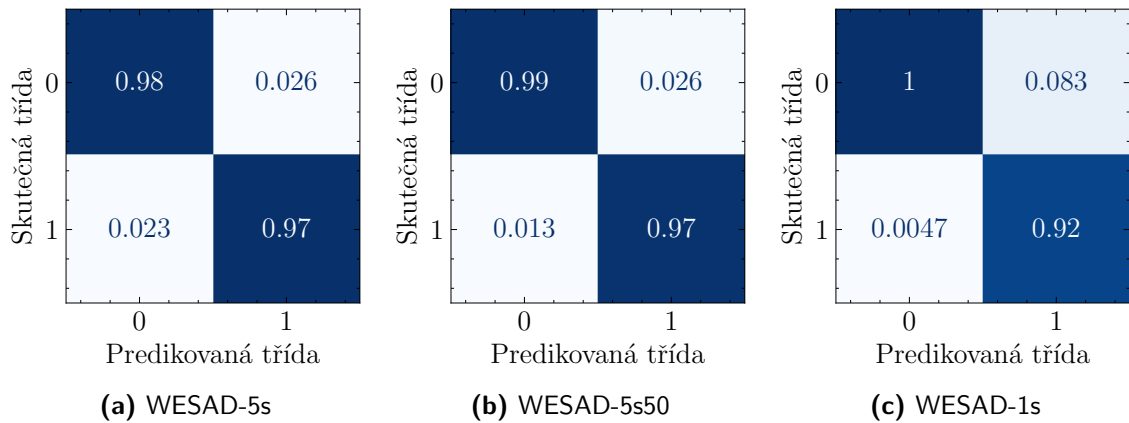
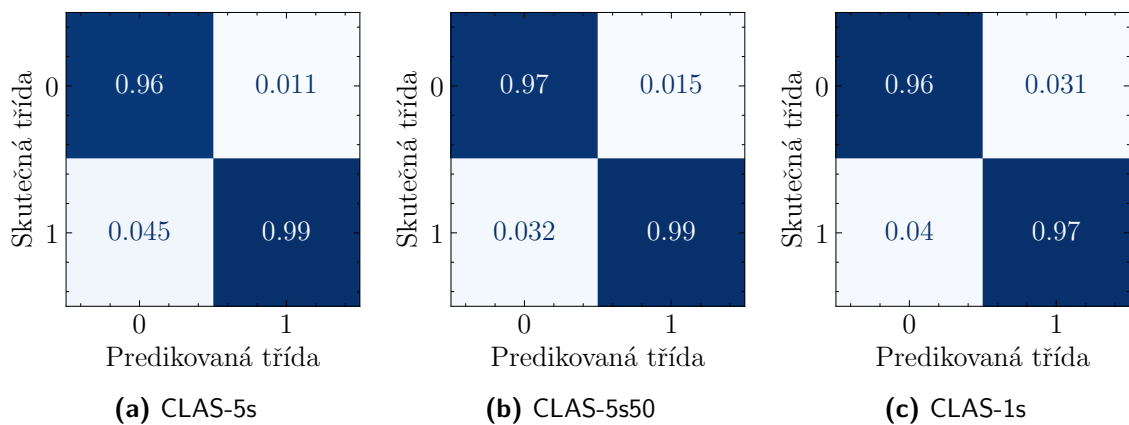
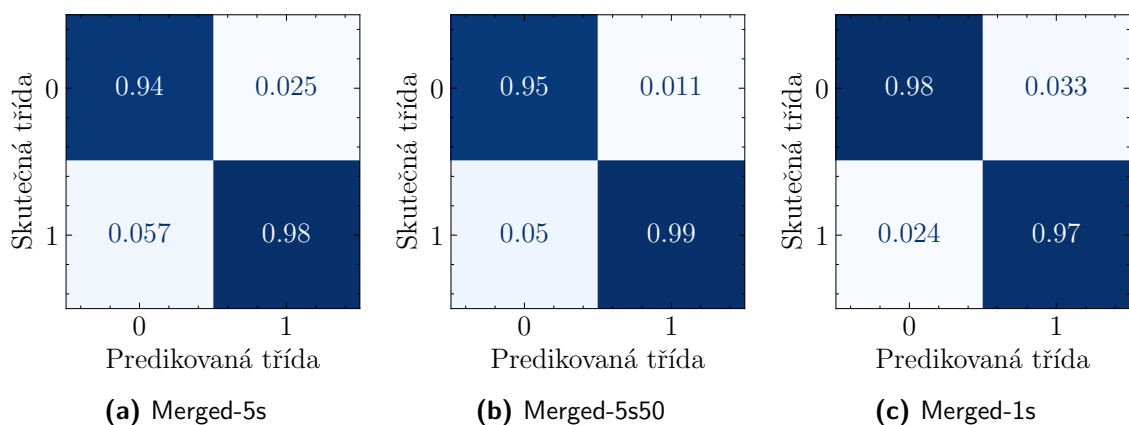
doc. PhDr. Mgr. Roman Procházka, Ph.D.

Místo: ..... Datum: ..... Podpis: .....



Projekt TL05000228 Nástroj pro zkoumání vlivu osobnostních charakteristik a vnějších faktorů na dynamiku týmu při dlouhodobém pobytu v ICE environment je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu na podporu aplikovaného společenskovedního a humanitního výzkumu, experimentálního vývoje a inovací ÉTA

Stránka 2 z 2

**Matice záměn****Obrázek B.1:** Matice záměn pro aug. WESAD modely (0 = klidový stav, 1 = CL stav)**Obrázek B.2:** Matice záměn pro aug. CLAS modely (0 = klidový stav, 1 = CL stav)**Obrázek B.3:** Matice záměn pro aug. Merged modely (0 = klidový stav, 1 = CL stav)

---

## Obsah přiloženého ZIP souboru

```
/
├── abstract_cs.txt.....abstrakt v jazyce práce
├── abstract_en.txt..... abstrakt anglicky
├── keywords_en.txt.....klíčová slova v jazyce práce
├── keywords_cs.txt..... klíčová slova anglicky
├── README.txt ..... textový soubor s popisem obsahu přílohy
├── all_params.txt....seznam všech vypočítaných parametrů z biosignálů
├── thesis
│   ├── src.zip.....zdrojové kódy LaTeXu a obrázky použité v práci
│   └── DP_Marek_Sokol_2023.pdf.....PDF s textem práce
├── scripts
│   ├── Python.....skripty pro navrženou metodu hodnocení CL
│   │   ├── experiments.....IPython notebooky
│   │   ├── misc.....pomocné funkce pro tvorbu ilustrací v práci
│   │   ├── utils.....pomocné nástroje a funkce
│   │   └── :
│   ├── Matlab.....skripty pro tvorbu kauzálních vícerozměrných matic
│   │   └── :
│   └── R.....skripty pro statistickou analýzu a modelování
│       └── :
```