



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**Katedra biomedicínské techniky**

**Význam vzduchové kapsy pro přežití člověka zasypaného  
lavinovým sněhem**

**Effects of Air Pocket for Survival of a Victim Covered with  
Avalanche Snow**

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínské inženýrství

Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.

**Bc. Lukáš Povišer**

---

**Kladno 2022**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Povišer** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **465500**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**  
Studijní program: **Biomedicínské inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Význam vzduchové kapsy pro přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem**

Název diplomové práce anglicky:

**Effects of Air Pocket for Survival of a Victim Covered with Avalanche Snow - COPY**

Pokyny pro vypracování:

Analýzujte možné přínosy přítomnosti vzduchové kapsy pro přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem. Navrhněte experiment a proveďte pilotní měření na dobrovolnících pro studium mechanismů příznivého účinku přítomnosti vzduchové kapsy na výměnu plynů při dýchání obětí pod lavinou.

Seznam doporučené literatury:

[1] Roubík K., Sieger L., Sýkora K., Work of Breathing into Snow in the Presence versus Absence of an Artificial Air Pocket Affects Hypoxia and Hypercapnia of a Victim Covered with Avalanche Snow: A Randomized Double Blind Crossover Study, PLOS ONE, ročník 10, číslo 12, 2015, e0144332 s.

[2] Brugger H. et al., Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in snow: implications for avalanche survival, Resuscitation, ročník 58, číslo 1, 2003, 81–88 s.

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **22.09.2023**

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

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

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem Význam vzduchové kapsy pro přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem vypracoval samostatně a použil 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 10. 5. 2022

.....

Bc. Lukáš Povišer

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Karlovi Roubíkovi, Ph.D. za ochotu a trpělivost, kterou projevoval při vedení této práce. Taktéž bych rád poděkoval všem členům Ventilačního týmu, kteří se podíleli na výzkumech spojených s lavinovým zavalením za pomoc a cenné rady. Zejména pak Ing. Š. Němcovi a Ing. Š. Walzelovi za spolupráci a výpomoc při experimentu.



## **ABSTRAKT**

### **Význam vzduchové kapsy pro přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem:**

Dominantní příčinou úmrtí při zavalení lavinou je akutní udušení s následnou těžkou hypoxií a hyperkapnií. Vzduchová kapsa má významný vliv na koncentraci O<sub>2</sub> a CO<sub>2</sub> ve vdechovaném a vydechovaném vzduchu. Tento efekt je možné vysvětlit dvěma mechanismy, zvýšením dechové práce nebo promícháváním vydechnutého plynu s čerstvějším v kapse. Cílem této práce bylo analyzovat bylo možné výhody přítomnosti vzduchové kapsy na výměnu plynů. Bylo provedeno pilotní měření na dobrovolnících s dýcháním do simulované laviny. Závěrem této práce je, že kapsa má znatelný vliv na kvalitnější složení vdechnuté směsi plynů. Bez vzduchové kapsy se oběť snaží CO<sub>2</sub> odventilovat zvýšením frekvence dýchání a zvětšením dechových objemů. U kapsy s umělým navýšením odporu v dýchacích cestách oběť nadechuje menší objemy s nižší frekvencí než bez kapsy. Do těla je tak přiváděno menší množství O<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> a z těla je i menší množství odventilováno. Dechový profil je pravděpodobně více řízen množstvím vdechnutého CO<sub>2</sub> než velikostí dechové práce.

### **Klíčová slova**

dýchání pod lavinou, výměna plynů, zavalení lavinou, vzduchová kapsa

## **ABSTRACT**

### **Effects of Air Pocket for Survival of a Victim Covered with Avalanche Snow:**

The dominant cause of death from an avalanche is acute suffocation, followed by severe hypoxia and hypercapnia. The air pocket has a significant effect on the concentration of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> in the inhaled and exhaled air. This effect can be explained by two mechanisms, increasing breathing work or mixing exhaled gas with fresher in the pocket. The aim of this work was to analyze the possible benefits of the presence of an air pocket for gas exchange. A pilot measurement was performed on volunteers breathing into a simulated avalanche. The conclusion of this work is that the pocket has a significant effect on the better composition of the inhaled gas mixture. Without an air pocket, the victim tries to vent the CO<sub>2</sub> by increasing his breathing rate and increasing tidal volumes. With a pocket with an artificial increase in airway resistance, the victim inhales smaller volumes with a lower frequency than without a pocket. Thus, a smaller amount of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> is supplied to the body, and even a smaller amount is vented from the body. The respiratory profile is probably more controlled by the amount of inhaled CO<sub>2</sub> than by the amount of respiratory work.

### **Keywords**

breathing under avalanche snow, avalanche, gas exchange, air pocket

# Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratek .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Přehled současného stavu .....</b>	<b>11</b>
2.1 Dýchání oběti při zavalení lavinou.....	12
2.2 Perlit jako vhodný model sněhu .....	14
<b>3 Cíle práce.....</b>	<b>16</b>
<b>4 Metody .....</b>	<b>17</b>
4.1 Aparatura pro experimentální měření na probandech .....	17
4.1.1 Návrh studie .....	17
4.1.2 Model sněhu .....	18
4.1.3 Kompenzační odpor .....	18
4.1.4 Aparatura .....	18
4.2 Výběr probandů.....	20
4.3 Průběh experimentu.....	22
4.4 Zpracování dat.....	25
4.4.1 Předzpracování naměřených digitální dat .....	25
4.4.2 Interpolace nádechu a výdechu pro CO <sub>2</sub> a O <sub>2</sub> .....	34
4.4.3 Vydechnutý a nadechnutý objem vzduchu a plynů.....	35
4.4.4 Rozdílné množství inspirovaného a exspirovaného plynu .....	35
4.4.5 Statistické zpracování výsledků .....	35
<b>5 Výsledky .....</b>	<b>37</b>
5.1 Frakce CO <sub>2</sub> .....	37
5.1.1 Inspirovaná frakce CO <sub>2</sub> .....	37
5.1.2 Exspirovaná frakce CO <sub>2</sub> .....	39
5.1.3 Inspirovaná frakce O <sub>2</sub> .....	41
5.2 Dechové objemy vzduchu .....	43
5.2.1 Objem nádechu.....	43
5.2.2 Objem výdechu.....	44
5.2.3 Minutová ventilace vzduchu .....	45
5.2.4 Minutová ventilace vzduchu standardizovaná na hmotnost.....	46

5.3	Objem CO <sub>2</sub> v dechu.....	46
5.3.1	Objem CO <sub>2</sub> v nádechu.....	47
5.3.2	Objem CO <sub>2</sub> ve výdechu.....	47
5.3.3	Minutová ventilace CO <sub>2</sub> .....	48
5.3.4	Minutová ventilace CO <sub>2</sub> standardizovaná na hmotnost.....	48
5.4	Objem O <sub>2</sub> v dechu.....	49
5.4.1	Objem O <sub>2</sub> v nádechu.....	49
5.4.2	Objem O <sub>2</sub> ve výdechu.....	50
5.4.3	Minutová ventilace O <sub>2</sub> .....	51
5.4.4	Minutová ventilace O <sub>2</sub> standardizovaná na hmotnost.....	51
5.5	Časové charakteristiky dýchání.....	52
5.5.1	Poměr nádechu k celkové době dechu.....	52
5.5.2	Dechová frekvence.....	53
5.6	Akumulovaný objem CO <sub>2</sub> a O <sub>2</sub> .....	54
<b>6</b>	<b>Diskuse.....</b>	<b>56</b>
6.1	Program na detekci fáze dechu.....	56
6.2	Profil koncentrace plynu v průběhu dechu.....	56
6.3	Profil dýchání.....	57
6.4	Limitace práce.....	60
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>62</b>
	<b>Seznam použité literatury.....</b>	<b>63</b>
	<b>Příloha A: Žádost pro etickou komisi.....</b>	<b>65</b>
	<b>Příloha B: Syllabus výzkumného projektu.....</b>	<b>66</b>
	<b>Příloha C: Informovaný souhlas.....</b>	<b>70</b>
	<b>Příloha D: Protokol probanda.....</b>	<b>72</b>
	<b>Příloha E: Obsah přiloženého CD/DVD.....</b>	<b>81</b>

# Seznam symbolů a zkratek

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$V_T$	L	Dechový objem
$RR$	Hz	Dechová frekvence
$EtO_2$	%	Objemové procento kyslíku na konci výdechu
$EiO_2$	%	Objemové procento oxidu uhličitého na konci výdechu
$SpO_2$	%	Saturace periferní krve kyslíkem
$FiCO_2$	%	Inspirovaná frakce oxidu uhličitého
$FiO_2$	%	Inspirovaná frakce kyslíku
$t$	s	čas
$p_{aw}$	cmH <sub>2</sub> O	Tlak v dýchacích cestách
$q$	L/min	Objemový průtok
$q_{aw}$	L/min	Objemový průtok v dýchacích cestách
$a$	-	Koeficient mocninné funkce

## Seznam zkratek

Zkratka	Význam
HF	High flow
A	Vzduchová kapsa
C	Vzduchová kapsa s kompenzačním odporem
F	Plně vysypaný perlit
FFT	Fast Fourier transform
FIR	Finite impulse response

# 1 Úvod

Riziko spuštění laviny činí lyžařské túry nejnebezpečnějším zimním sportem, který si vyžádá asi 150 životů ročně pouze v Alpách. Pomocí dat o všech lavinových katastrofách ve Švýcarsku od roku 1981 do roku 1991 byla vypočítána pravděpodobnost přežití ve vztahu k délce doby zavalení pod sněhem. Po 15 minutách je pravděpodobnost přežití 92 %. Ale již po 35 minutách šance na přežití strmě klesá na pouhých 30 %, kdy dojde k úmrtí z důvodu akutního udušení. Poté je přežití bez vzduchové kapsy již takřka nemožné. Po 90 minutách zavalení oběti postupně podléhají hypoxii a podchlazení. Tato zjištění pravděpodobnosti přežití mají dalekosáhlé důsledky pro doporučené záchranné strategie, zdůrazňuje význam rychlé a efektivní pomoci nezraněných společníků a vysvětluje nízkou úspěšnost, jíž dosáhly organizované záchranné složky [1].

Z analyzovaných dat od 422 zasypaných lyžařů bylo 241 (57 %) mrtvých již při vyproštění. Průměrná hloubka pohřbu pod sněhem v oblasti hlavy byla  $105 \pm 85$  cm. Analýza vztahu mezi výsledkem záchrany, hloubkou zavalení a dobou do vyproštění naznačuje, že neexistuje žádný přímý vliv hloubky zavalení na přežití. Špatné výsledky při vyproštění hluboce zavalených lyžařů tak pouze odrážejí obecně prodlouženou dobu záchrany [1, 2].

Při zavalení nastává z fyziologického hlediska syndrom tří H – hyperkapnie (nadměrné množství oxidu uhličitého v krvi), hypoxemie (nízká koncentrace kyslíku v krvi) a hypotermie (pokles tělesné teploty). Dominantní příčinou úmrtí je akutní udušení, ke kterému dochází v důsledku komprese hrudníku znemožňující nadechnutí, ucpaní dýchacích cest nebo v důsledku opětovného vdechování dříve vydechnutého plynu, což má za následek těžkou hypoxii a hyperkapnií [3].

V současné době se vědci zabývají hypotézami souvisejícími s tělesnými stavy oběti po zavalení lavinou. Zejména se věnují syndromu tří H a parametrů zavalení, které mají vliv na celkovou dobu přežití v simulovaném lavinovém závalu. Mezi sledované parametry patří například přítomnost či absence různě velkých vzduchových kapes, dynamika dýchání a vlastnosti sněhu. Doprovodná vzduchová kapsa je definována jako jakýkoli detekovatelný vzduchový prostor kolem obličeje a dýchacích cest [3, 4].

## 2 Přehled současného stavu

Jedním ze syndromu tří H je hypotermie. S cílem lépe porozumět vývoji hypotermie během zasypávání laviny se Grissom (2004) rozhodl změřit rychlost ochlazování teploty jádra těla během zasypávání sněhu v kontrolovaném experimentu. U subjektů zasypaných ve sněhu, kteří měli na sobě funkční oblečení s dobrou tepelnou izolací a dýchali pomocí zařízení, které způsobovalo hyperkapnii, došli k závěru, že rychlost ochlazování teploty jádra byla 1,2 až 1,3 °C/h, tedy vyšší rychlost než při normokapnických podmínkách 0,6 až 0,7 °C/h. Rychlost ochlazování teploty jádra během zasypání laviny nelze jednoznačně určit za všech okolností, ale spíše závisí na řadě faktorů, včetně izolace oděvu, traumatických poranění, teploty sněhu a adekvátnosti ventilace a okysličení, taktéž velikostí vzduchové kapsy. Nicméně s takovou rychlostí ochlazování dojde dříve k akutnímu udušení než ke smrti z důvodu hypotermie. Lze tedy předpokládat, že hypotermie není primárním důvodem úmrtí [6, 7].

Pokud oběť zavalení nedisponuje ochranou pomůcku jako je, např. AvaLung nebo airbagové vesty, nastává u obětí výrazná ventilační insuficience. Zejména z důvodu nedostatečného prostoru pro nádech a opětovného vdechování již exspirovaných plynů. U zavaleného postupně nastává akutní respirační acidóza, ke které dochází zejména díky dvěma faktorům. Prvním faktorem je snižující se zásoba kyslíku, který má zavalený k dispozici. Druhým faktorem je nemožnost odstranění exspirovaného CO<sub>2</sub> z prostoru inspirace. V prvních chvílích po zavalení má sníh určitou kapacitu, která umožňuje pojmout určité množství CO<sub>2</sub>, nicméně po nějakém čase se již oběť dostává do situace, kdy inspiruje vlastní expirační směs [8, 9].

Respirační acidózu se lidské tělo snaží kompenzovat. Při poklesu parciálního tlaku kyslíku v cévním řečišti dochází k aktivaci periferních chemoreceptorů a jejich vyhodnocování v prodloužené míše, ve které se nachází centrum dýchání. Prodloužená míchaná vysílá odpověď za účelem spuštění kompenzačních mechanismů pro zachování homeostázy. Jako hlavní mechanismus se uplatňuje zvýšení minutové ventilace, kterou může organismus zvýšit dvěma způsoby. Prvním způsobem je zvýšení dechového objemu ( $V_T$ ), což se projeví hlubokými nádechy a výdechy. A druhým způsobem je zvýšení dechové frekvence ( $RR$ ) [9, 10].

Při dlouhodobém (v řádech minut) stavu hyperkapnie a hypoxie dochází k patofyziologickým procesům, které výrazně ohrožují zavaleného na životě. Při lehkém až středně těžkém stavu dochází k závratím, bolestem hlavy, zmatenosti až letargii. Z fyziologického hlediska nastává u zavalených tachypnoe, tělo se snaží odventilovat přebytečný oxid uhličitý. Současně dochází k tachykardii, organismus je taktéž zatížen sníženou neuronovou aktivitou a rozvratem elektrolytů, což má za následek srdeční arytmie. V konečném důsledku mají stavy hypoxie a hyperkapnie nezvratné změny na tkáních mozku a srdce [11].

## 2.1 Dýchání oběti při zavalení lavinou

Z experimentu, který provedl Roubík (2015) vyplývá, že při zavalení je dýchání možné i bez vytvořené vzduchové kapsy před nosem a ústní dutinou. Avšak za těchto podmínek je dýchání spojeno s výrazně zvýšenou dechovou prací. Pokud jde o rozdíly v dýchacích plynech mezi žádnou vzduchovou kapsou a litrovou vzduchovou kapsou, významný rozdíl byl nejprve pozorován u hodnot inspirace a expirace ( $EtO_2$  a  $EtCO_2$ ) a periferní saturace krve kyslíkem ( $SpO_2$ ). Tyto výsledky naznačují dva hlavní závěry. Zaprvé, extrémně zvýšená práce s dýcháním bezprostředně na začátku experimentu bez vzduchové kapsy se zdá být zodpovědná za rychlé změny hodnot  $EtO_2$ ,  $EtCO_2$  a  $SpO_2$  na konci. Je to důsledek zvýšené práce dýchacích svalů a tím zvýšeného metabolismu organismu, což vede ke zvýšené spotřebě kyslíku a produkci oxidu uhličitého. Zvýšená spotřeba kyslíku a produkce oxidu uhličitého dále zhoršují fyziologický stav organismu. Za druhé, méně znatelné rozdíly ve frakcích inspiračního kyslíku a oxidu uhličitého v dýchacím plynu naznačují, že sníh je prostředí, které je schopné dodávat určité množství kyslíku a pohlcovat určité množství oxidu uhličitého [12].

Když oběť zasype lavina, opakovaně vdechuje dříve vydechnutý vzduch, protože pohyb vzduchu ve sněhu je omezen. Tělesný metabolismus spotřebovává  $O_2$  a produkuje  $CO_2$  a tím klesá koncentrace  $O_2$  a zvyšuje se koncentrace  $CO_2$  ve vdechovaném vzduchu. Lavinový sníh, i když je velmi zhutněný a zhuštěný, stále obsahuje 40 % až 60 % vzduchu, který lze dýchat. Vzduchová kapsa také funguje jako prostředí pro výměnu plynů zahrnující rozhraní vzduch-sníh, kde se kyslík a  $CO_2$  pohybují po porézním povrchu vlivem difuze. Dochází tak k částečné obnově koncentrace  $O_2$  a  $CO_2$ . Tento proces však není dostatečně rychlý vůči rychlosti produkce  $CO_2$  obětí. Obsažené množství kyslíku ve sněhu by však mělo uspokojit potřeby těla. Radwin (2001) prokázal, že dobrovolníci zasypaní sněhem a s průběžným odstraňováním vydechaného plynu neměli problémy ani po hodinovém zavalení. Naproti tomu, pokud nebyly odstraňovány exspirované plyny, tak to vedlo k vážné hyperkapnii již do 10 minut. Což potvrzuje hypotézu, že v hustém sněhu je dostatek kyslíku k dispozici pro udržení adekvátního dýchání po delší dobu zavalení [9, 13].

V experimentu s průběžným odstraňováním  $CO_2$  zůstaly zavalení probandí normoxičtí i bez jakékoli vzduchové kapsy. Zatímco kontrolní subjekty (bez odstraňování  $CO_2$ ) se rychle staly hyperkapniky a 4 z 5 se staly hypoxickými navzdory malé vzduchové kapse [13]. Zdá se tedy, že vzduchová kapsa nezlepšuje extrakci kyslíku ze sněhu, ale spíše podporuje odstraňování  $CO_2$  z bezprostředního dýchacího prostoru. Mechanismus, který funguje ve vzduchové kapse, může být zvětšená povrchová plocha pro zvýšení difúze. Tento proces umožňuje pronikání kyslíku do vzduchové kapsy a  $CO_2$  ven do sněhové pokrývky. Dochází tak k prostupu napříč jejich příslušnými koncentračními gradienty, které jsou pravděpodobně ovlivněnými proměnnými, jako je pórovitost, teplota, obsah vody a strukturální charakteristiky okolního sněhu. V pozdější fázi se sníh nasytí  $CO_2$ , kdy už je procento  $CO_2$  ve směsi větší, než se vlivem difúze může odvádět do

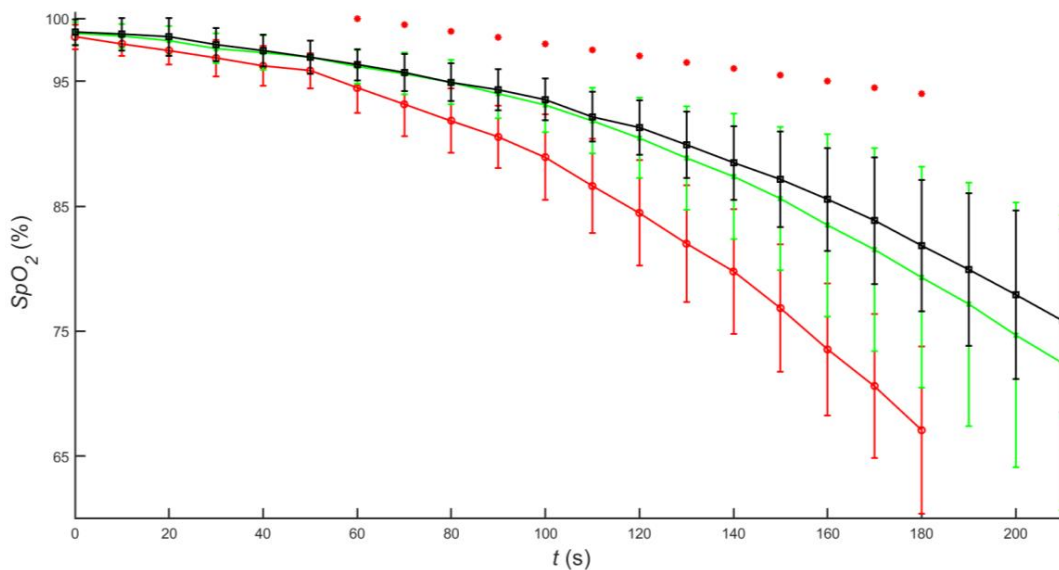


sněhu. Oběť tak začne vdechovat větší množství  $\text{CO}_2$  a začnou se objevovat škodlivé účinky hyperkapnie. Bránění difúze  $\text{CO}_2$  ze vzduchové kapsy do sněhu je způsobeno díky ledu nebo málo poréznímu sněhu. Ve výsledku tak dochází k ještě rychlejšímu nahromadění  $\text{CO}_2$ . Vliv na lepší prostupnost  $\text{CO}_2$  do sněhu by mohla mít i velikost plochy vzduchové kapsy se sněhem [14].

Brugger (2003) provedl experiment na 12 dobrovolnicích dýchajících do sněhových kapes o objemu 1 L nebo 2 L. Pokles periferní saturace kyslíkem ( $SpO_2$ ) během 4 minut byl významně větší v testech s menší vzduchovou kapsou. Dále pozorovali velmi významnou závislost mezi poklesem  $SpO_2$  a časem ukončení. Jak již bylo dříve zdokumentováno, objem vzduchové kapsy hraje důležitou roli při přežití osoby pohřbené pod lavinovým sněhem [9].

Přítomnost vzduchové kapsy také ovlivňuje velikost dechové práce. Zpočátku se výměna plynů jeví jako dostatečná ve všech případech, ale postupem času výrazně zvýšená práce s dýcháním při absenci vzduchové kapsy způsobí rychlé zhoršení stavu oběti. Roubík (2015) provedl experiment, kdy dobrovolníci dýchali trubící, jejíž konec ústil do kapsy ve sněhu různého objemu. Prokázali, že velikost kapsy má významný vliv na koncentraci  $\text{O}_2$  a  $\text{CO}_2$  ve vdechovaném a vydechovaném vzduchu. Existují alespoň dva možné mechanismy způsobující tento efekt. Za prvé, malá kapsa má malý povrch rozhraní vzduch sněh, a tak je odpor pro proudění vzduchu vysoký. To způsobuje zvýšení dechové práce, zrychlení metabolismu a tím i zvýšení spotřeby  $\text{O}_2$  a produkce  $\text{CO}_2$ . Za druhé, vydechovaný vzduch se v kapse mísí s větším množstvím čerstvého vzduchu a vdechovaný vzduch je pak také čerstvější. Oba mechanismy pravděpodobně probíhají v procesu. Otázkou je, který dominuje [12, 14].

V rámci své diplomové práce řešil Ing. Štěpán Němec vliv dechové práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí. Zjistil, že pokud není přítomna vzduchová kapsa o objemu 2 litry, je zavalená osoba nucena vykonávat zvýšenou dechovou práci, a to během inspirace i expirace. Během experimentu se probandí dostávali do stavu hyperventilace a navyšovali dechovým úsilím tlak v dechové dráze pro zajištění dostatečné ventilace. Při obstrukční ventilační insuficienci probandí lehce navýšili tlak v systému, což zvýšilo jejich metabolickou zátěž. Jak je vidět na grafu č. 2.1 s výsledkem vývoje saturace periferní krve kyslíkem, je zde patrný vliv navýšené dechové práce, nicméně není statisticky významný. Autor taktéž konstatuje, že větší vliv na vývoj parametru  $SpO_2$  by bylo možné sledovat u možnosti promíchávání vzduchu v kapse a tím si zlepšit profil jednotlivých respiračních plynů [15].



Graf. č. 2.1: Vývoj  $SpO_2$  (převzato a upraveno z [15])

## 2.2 Perlit jako vhodný model sněhu

Obvykle jsou lavinové experimenty s dobrovolníky organizovány v horském terénu se simulací lavinového sněhu. I v tomto prostředí je složité zahrnout všechny faktory ovlivňující přežití (např. mechanické faktory, hypotermie atd.). Návrh a příprava těchto experimentů jsou velmi náročné i kvůli omezené dostupnosti sněhu a kvůli nepředvídatelným povětrnostním podmínkám.

Je všeobecně uznávaným předpokladem, že fyzikální vlastnosti sněhu mohou přispět k rychlosti přežití obětí laviny [8, 9, 12]. Vlastnosti sněhu se však mezi publikovanými studiemi lišily. Průměrná hustota lavinového sněhu se běžně pohybuje od  $200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (suchý sníh) do  $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (mokrý sníh) [16]. Ve svých studiích Brugger (2003) použil sníh se střední hustotou  $376 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (rozsah  $144\text{--}546 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [6]. Roubík (2015) použil sníh podobné hustoty s mnohem menším rozptylem ( $380 \pm 14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [13]. Strapazzon (2017) dokonce provedl tři série experimentů, časově oddělených, se střední hustotou sněhu  $364 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (rozsah  $155\text{--}481 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) [14].

Prostředí v terénu představuje pro experimenty další výzvy. Zdrojem chybných odečtů fyziologických parametrů mohou být například standardní lékařské přístroje používané venku [17]. Některá omezení lze překonat ve speciální laboratoři schopné simulovat různé aspekty horského prostředí [18]

Roubík (2020) provedl malou prospektivní laboratorní studii s cílem vybrat materiál, který by mohl sloužit jako možný model lavinového sněhu pro studium parametrů ventilace a výměny plynů. Ze tří sypkých porézních materiálů (perlit, dřevěné hobliny a polystyren) byl perlit shledán jako nejvhodnější pro simulaci lavinového sněhu, protože

výsledné koncentrace dýchacích plynů kopírovaly koncentrace naměřené při dýchání do skutečného sněhu. Dále má perlit příznivé vlastnosti, především homogenitu a snadno se s ním manipuluje. Změnou obsahu vody v perlitu dokázali upravit jeho fyzikální vlastnosti a ovlivnit tak výměnu plynů při simulaci zasypání v tomto materiálu [19].

Charakteristiky perlitu z hlediska výměny plynů jsou podobné jako u sněhu o vysoké hustotě použitého v této studii, a navíc trendy parametrů výměny plynů ve sněhu leží mezi trendy mokrého a suchého perlitu. Pokud jde o oxid uhličitý, mezi testovanými materiály nebyly žádné rozdíly v koncentracích vdechu ( $FiCO_2$ ) a výdechu ( $EtCO_2$ ). Trendy křivek reprezentujících  $EtCO_2$  při dýchání do sněhu, mokrého a suchého perlitu se vzájemně překrývaly a stejné chování bylo pozorováno u  $FiCO_2$ . U kyslíku se parametry  $FiO_2$  a  $EtO_2$  lišily pro sněh, mokrý a suchý perlit, nicméně trendy měly u všech materiálů podobný tvar a křivka představující sněh ležela mezi křivkami mokrého a suchého perlitu [20].

Prezentované výsledky podporují myšlenku využití perlitu jako vhodného materiálu, který může nahradit lavinový sněh při laboratorních experimentech. Trendy parametrů výměny plynů u všech testovaných materiálů byly podobné nebo se mírně lišily. Když se lišily, ležela křivka pro sněh vždy mezi odpovídajícími křivkami pro mokrý a suchý perlit. Průběh desaturace subjektu byl podobný při dýchání do suchého perlitu a do sněhu. Přidání vody k perlitu způsobilo rychlejší průběh desaturace. Tato zjištění tak potvrzují, že perlit je vhodným materiálem simulujícím vysokou hustotu sněhu při lavinových experimentech se sledováním dechu a že vlhkost perlitu mírně modifikuje jeho vlastnosti z pohledu výměny plynů [20].

Na základě prezentovaných výsledků autoři předpokládají, že perlit může simulovat vlastnosti sněhu o vysoké hustotě týkající se výměny plynů. Jednoduchou úpravou množstvím vody můžeme modifikovat nejen vlastnosti samotného materiálu, ale také jeho vliv na dýchací plyny ( $FiO_2$ ,  $EtO_2$ ) a periferní saturaci kyslíkem ( $SpO_2$ ) při dýchacích experimentech. Největší výhodou perlitu je jeho homogenita a stabilita v čase a tím i reprodukovatelnost experimentů. Jedná se o velmi levný materiál a snadno se s ním manipuluje. Autoři doporučují v budoucích experimentech prováděných s perlitem používat HEPA filtry účinné při odstraňování prachových částic [20].

Jak již bylo zmíněno, přítomnost vzduchové kapsy má významný vliv na koncentraci  $O_2$  a  $CO_2$  ve vdechovaném a vydechovaném vzduchu. Uvažuje se o dvou mechanismech, které by mohly způsobovat tento efekt. Snížením dechové práce nedochází ke zvýšené spotřebě  $O_2$  a produkci  $CO_2$ . Za druhé, vydechovaný vzduch se v kapse mísí s větším množstvím čerstvého vzduchu a vdechovaný vzduch je pak také kvalitnější z pohledu složení plynů. Oba mechanismy pravděpodobně probíhají v procesu. Otázkou je, který dominuje. Je zde tedy prostor pro vysvětlení významu vzduchové kapsy na výměnu plynů.

### **3 Cíle práce**

Cílem této práce je analyzovat možné výhody přítomnosti vzduchové kapsy pro přežití osoby zasypané lavinovým sněhem. Navrhnout experiment a provést pilotní měření na dobrovolnících pro studium mechanismů příznivého vlivu přítomnosti vzduchové kapsy na výměnu plynů při dýchání oběti pod lavinou. Prostudovat dýchání z pohledu složení jednotlivých plynů a statisticky vyhodnotit rozdíly mezi dýcháním do kapsy, do kapsy s přidáním členu zvyšujícího dechovou práci a bez přítomnosti vzduchové kapsy.

## 4 Metody

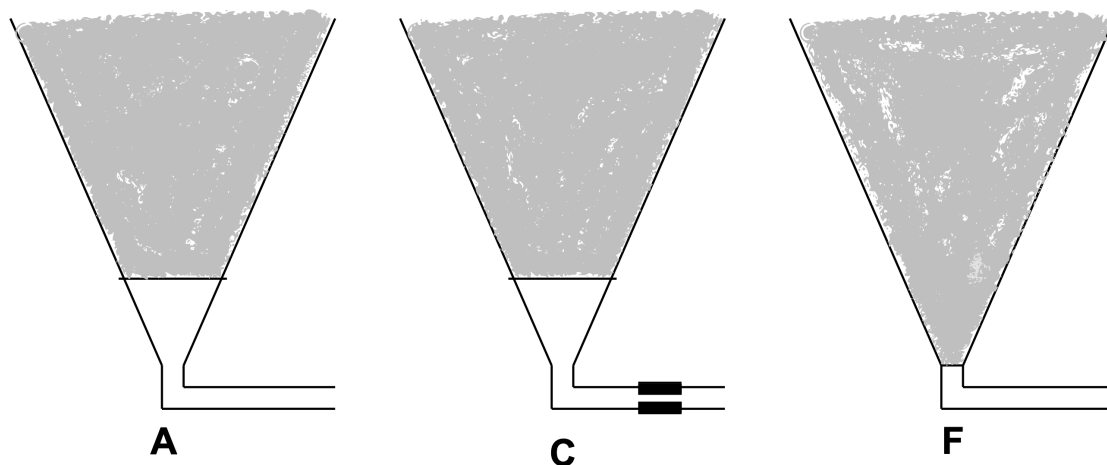
V této kapitole jsou popsány jednotlivé kroky, které vedly k realizaci diplomové práce. V první části kapitoly je popsán návrh a provedení experimentu. Jak byla realizována aparatura a její jednotlivé modifikace. Taktéž za jakých podmínek byl experiment prováděn a jaké všechny parametry byly sledovány. Další část práce je věnována digitálnímu zpracování naměřených dat a postup k dosažení sledovaných hodnot pro studium vlivu přítomnosti vzduchové kapsy na výměnu plynů.

### 4.1 Aparatura pro experimentální měření na probandech

Aby bylo možné studovat složení vdechované a vydechované směsi při simulovaném zavalení probanda lavinou, bylo nutné nejdříve navrhnout vhodnou aparaturu. Její nutné součásti byly model sněhu, prvky pro dechovou dráhu a kompenzační odpor, který simuloval dechovou práci při zavalení člověka bez přítomnosti vzduchové kapsy.

#### 4.1.1 Návrh studie

Studie se skládala ze tří sledovaných fází. První fází bylo dýchání do aparatury bez vzduchové kapsy (F). V druhé fázi proband dýchal do aparatury se 2 L vzduchovou kapsou (A) a při třetí fázi proband dýchal taktéž do vzduchové, ale do dýchací cesty byl přidán kompenzační odpor, který simuloval dechovou práci jako by proband dýchal do aparatury bez vzduchové kapsy (C). Schéma aparatury pro jednotlivé fáze je možné vidět na obrázku č. 4.1.



Obr. č. 4.1: Aparatura pro tři různé fáze experimentu

### 4.1.2 Model sněhu

Jako model sněhu byl vybrán vlhký perlit o hustotě  $250 \text{ kg/m}^3$ . S podobnou hustotou pracoval i Roubík (2015). Pro výrobu simulovaného sněhu byl využit suchý perlit s velikostí zrn od 1 mm po 3 mm (“Expandovaný perlit EP AGRO”; Perlit ltd., Česká republika). Perlit byl připraven do dvou 50 L nádob, kde byl smíchán s vodou, tak aby byla dosažena požadovaná hustota  $250 \text{ kg/m}^3$ . Po vytvoření takovéto směsi byly obě nádoby ponechány po 4 dny v klidu pouze s občasným promícháním pro dosažení homogenizace navázané vody na perlit.

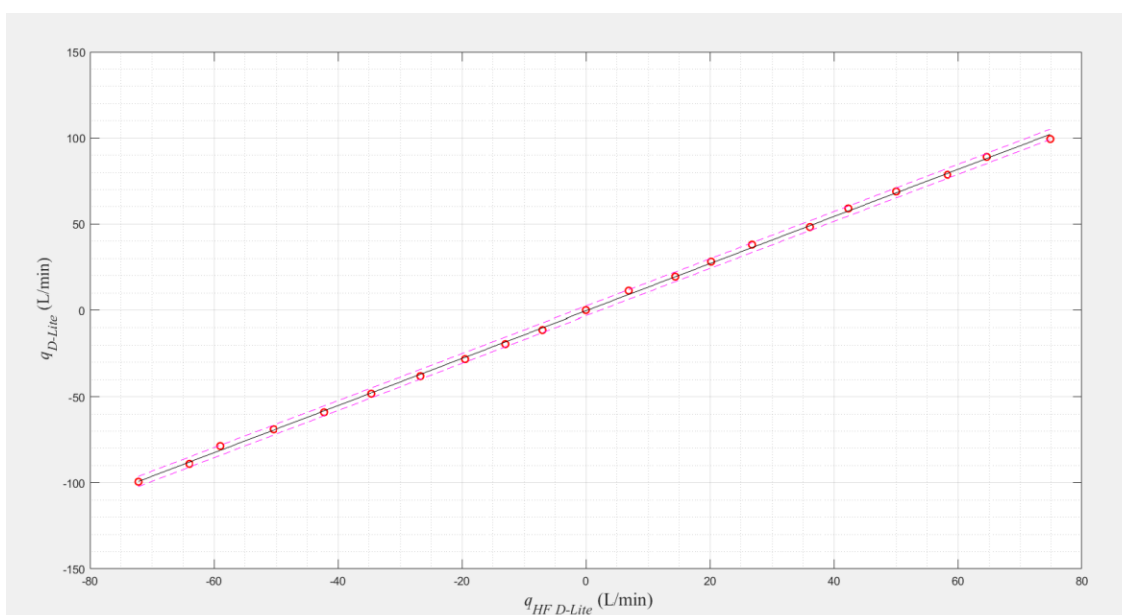
### 4.1.3 Kompenzační odpor

Aby bylo možné sledovat vliv dechové práce na výměnu plynů. Byla přidána do experimentu třetí fáze (verze aparatury). Kdy se do dechové dráhy přidal kompenzační odpor, který simuloval dechovou práci jako při dýchání do perlitu bez přítomnosti vzduchové kapsy před dýchacími cestami. Kompenzační odpor byl tvořený centrickou kruhovou clonou, kterou navrhnul a vyrobil Ing. Štěpán Němec v rámci své diplomové práce zabývající se dechovou prací v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí [15]. Odpor měl průtočnou plochu o průměru 8 mm tvořenou větším počtem malých kruhových otvorů. Clonka měla šířku 1 mm a byla vsazena mezi dvě součásti, které se daly zašroubovat do sebe. Délka celého profilu byla 10 mm.

### 4.1.4 Aparatura

Aparatura, která sloužila k simulování zavalení člověka lavinovým sněhem se skládala z plechového kužele s polypropylenovou folií. V kuželu se nacházel vlhký perlit, který simuloval lavinový sníh. Ve dvou ze tří modifikací aparatury bylo nutné vytvoření vzduchové kapsy o objemu 2 litry. K tomu sloužilo hrubé síto překryté jemnou síťovinou, aby došlo k zabránění propadu malých částic do dýchacího okruhu. Síto bylo uloženo ve špičce kužele, kde tak oddělovalo prostor vzduchové kapsy a vlhkého perlitu. U třetí modifikace, kde nebyla vytvořena žádná vzduchová kapsa, se využilo síto ze stejných materiálů, akorát s menším průměrem, tak aby pasovalo do špičky kužele. K trychtýři byla připojena průchodka s pravým úhlem, která měnila směr dechové dráhy z vertikálního na horizontální. K pravoúhlé průchodce byla připojena běžná průchodka nebo v druhém případě kompenzační odpor, dle zvolené modifikace. Do dechové dráhy byly zapojeny prvky sloužící k zaznamenávání dat. Pro zaznamenávání vývoje průtoku a tlaku byla využita clona HF D-Lite. Za clonou následovala propojka s odběrným místem k analýze plynů. Poslední segment dechové dráhy tvořila vrapová hadice a redukce pro připojení antibakteriálního a virového filtru Pulmosafe II (MR Diagnostic s.r.o., ČR). Pružná vrapová hadice byla zvolena z důvodu umožnění alespoň částečné polohovatelnosti pohybu probandovo hlavy.

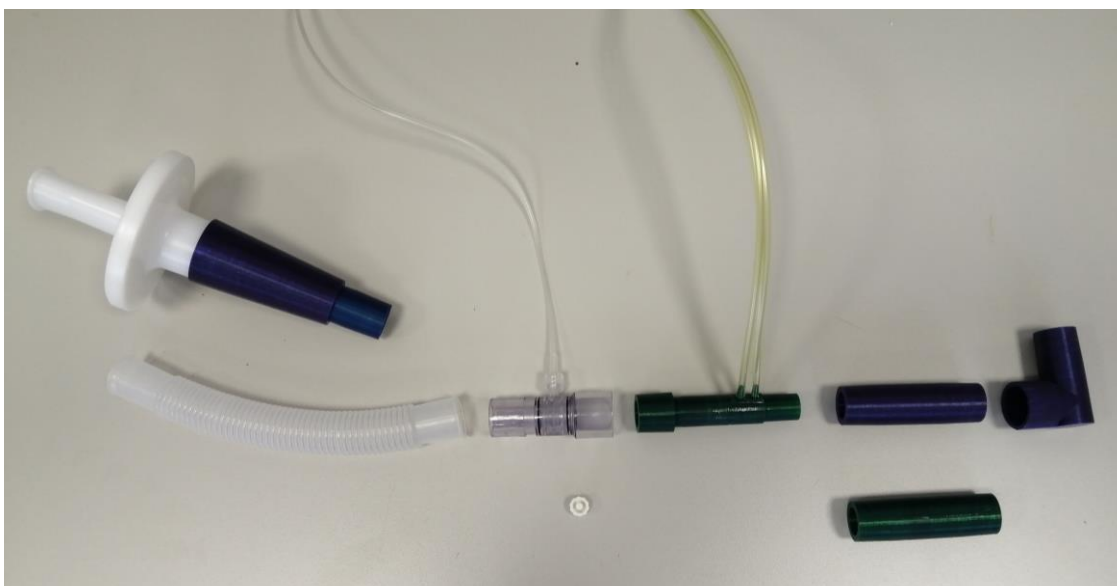
U pacientů, kteří jsou připojeni k plicnímu ventilátoru nedochází k tak vysokým průtokům dýchající směsi jako u člověka vystaveného vysoké stresové situaci, proto nejsou ani optimalizovány clony pro snímání dat průtoku a tlaku pro takové případy. Z toho důvodu nebyla k měření zvolena běžně dostupná clona D-Lite, ale bylo využito clony HF D-Lite, která je upravená pro vysoké průtoky a byla vytvořena v rámci bakalářské práce Bc. Ladislava Bíse [21]. Tuto tištěnou clonu bylo nutné podrobit kalibraci na kalibrační dráze s průtokoměrem CITREX H4 (IMT Medical, USA) pro výpočet korekčního koeficientu clony. S korekčním koeficientem bylo nutné veškerá měřená data přepočítat pro získání skutečných hodnot tlaku a průtoku. V grafu č. 4.1 je zobrazena převodní charakteristika pro naměřená data. Charakteristika byla proložena lineární přímkou s předpisem  $y = 1,37 \cdot x - 0,47$  a s koeficientem determinace 0,9995.



**Graf č. 4.1:** Převodní charakteristika D-Lite na vysokoprutokový D-Lite (HF D-Lite)

Ke sběru dat o složení analyzované dechové směsi plynů a z průtokové clony byl použit monitor vitálních funkcí Datex-Ohmeda S/5™ (GE Healthcare, USA). K monitoru byla taktéž připojena kompresní manžeta pro měření krevního tlaku, EKG svody a senzor pro měření krevního tlaku. Z monitoru vitálních funkcí byla nahrávána data pomocí softwaru Datex-Ohmeda S/5 Collect (GE Healthcare, USA).

Ještě před provedením experimentu na probandech byly všechny tři verze aparatury pro jednotlivé fáze experimentu, tedy dýchání do kapsy o objemu 2 L, do kapsy o objemu 2 L s kompenzačním odporem a do plně vysypaného perlitu, sedmkrát proměřeny pro ověření stability měřených průtokových charakteristik. Kdy by se mohla vlivem přesypávání perlitu a manipulací s aparaturou měnit stabilita. Zapojení HEPA filtru, vrapové hadice, průchodek a HF D-Lite clonky je možné vidět na obrázku 4.2.



**Obr. č. 4.2:** Aparatura s HF D-Lite, HEPA filtrem, vrapovou hadicí a kolenem

## 4.2 Výběr probandů

K provedení zaslepené prospektivní intervenční studie se zdravými dobrovolníky (dále probandi) bylo nutné mít schválení od etické komise Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT. Žádost a sylabus studie se nachází v příloze (příloha A a B). Studie se zabývala dvěma tématy souvisejícími se zavalením člověka lavinovým sněhem. Jedním z nich bylo téma této diplomové práce a druhým vliv dechové práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí, kterým se zabýval Ing. Štěpán Němec. Z toho důvodu byl celý experiment s probandy prováděn s ním ve spolupráci a v žádosti o schválení etickou komisí byl uveden jako hlavní řešitel studie s probandy. Přílohy A až D jsou tak společné pro obě diplomové práce.

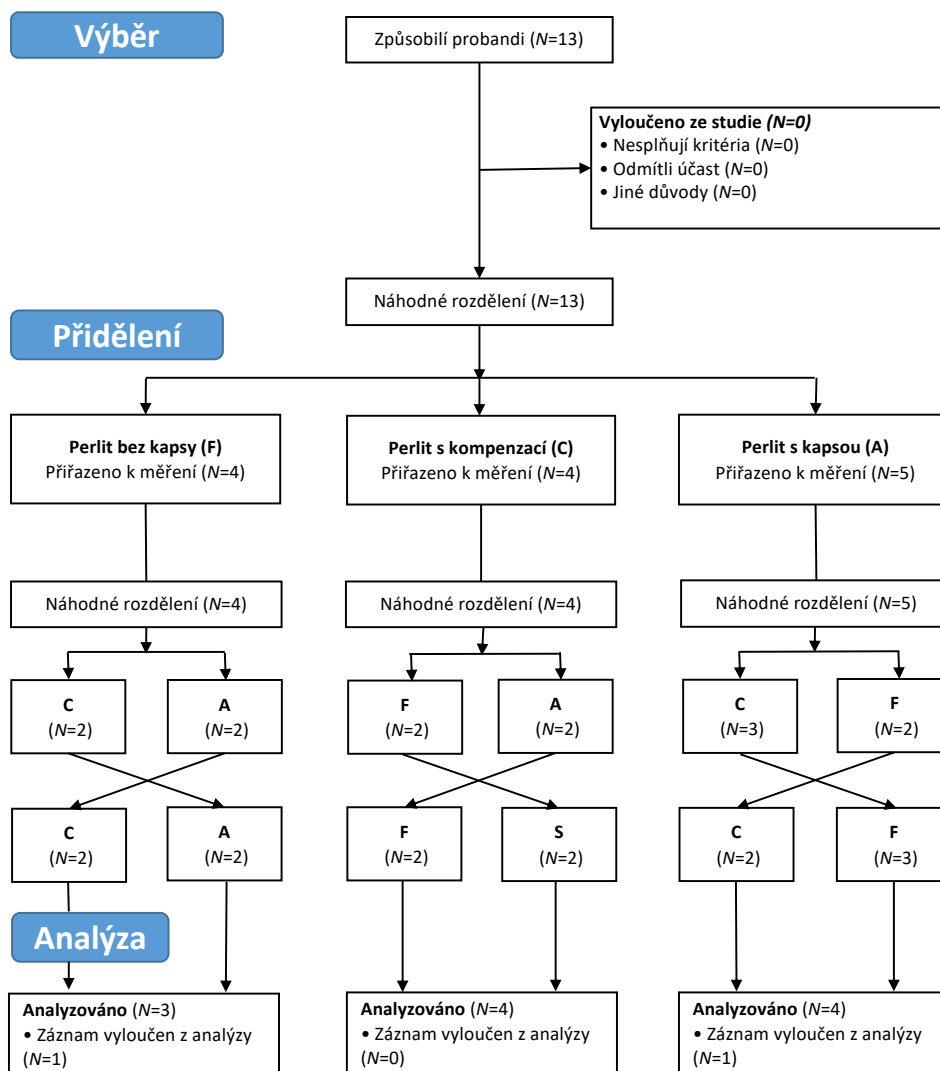
Před začátkem experimentu bylo nutné každého probanda poučit a požádat o podpis informovaného souhlasu (příloha C). V průběhu celého experimentu byl veden protokol o průběhu měření (příloha D). Do studie bylo zařazeno 13 probandů a probíhala v laboratoři lavinových experimentů na Fakultě biomedicínského inženýrství ČVUT (nám. Sítná 3105, Kladno) v březnu 2021. Demografické parametry výběru probandů se nacházejí v tabulce č. 4.1.



**Tabulka č. 4.1:** Demografické parametry probandů ve studii ( $\bar{x} \pm sd$ )

Parametr	Hodnota
Věk (roky)	22,4 ± 1,3
Výška (cm)	175,7 ± 6,4
Váha (kg)	78,1 ± 10,1
BMI (kg/m <sup>2</sup> )	25,2 ± 2,4
FEV1 (L)	3,7 ± 0,6
FVC (L)	4,1 ± 0,7

Před zahájením experimentu bylo nutné náhodně přiřadit pořadí měření jednotlivým probandům, k tomu bylo vytvořeno schéma dle doporučení CONSORT flow diagram. Schéma náhodného přiřazení probandů do experimentu je na obrázku č. 4.3.



Obr. č. 4.3: Schéma náhodného přiřazení probandů do experimentu

### 4.3 Průběh experimentu

Poté co byl proband poučen a seznámen s průběhem experimentu, bylo mu provedeno spirometrické vyšetření. Následně došlo k připojení EKG elektrod a nasazení manžety k měření neinvazivního krevního tlaku a čidlo k měření  $SpO_2$ . Snímané údaje byly vypisovány a zaznamenávány na monitoru vitálních funkcí. Na nos probanda byl ještě připevněn kolíček k zamezení dýchání nosem. Aby bylo možné detekovat případné přídechy probanda mimo dýchačí okruh, tak byla k jeho obličejí přivedena hadička, ze které proudil oxid dusný. Pokud by došlo k nějakému přídechu, byla by ihned vidět okamžitá změna koncentrace  $N_2O$  na monitoru vitálních funkcí.

Experiment se skládal ze 3 po sobě jdoucích fází. První dvě minuty byla ustavovací fáze, kdy u probanda byly snímány zmíněné parametry, ale ještě dýchal mimo kužel s perlitem. Po uplynutí této doby se pacient připojit k okruhu a dýchal do jedné ze tří variant aparatury. Tato fáze trvala 4 minuty. Poté se proband odpojil a znovu se po dobu 2 minut sledovaly jeho životní funkce, než došlo k ustálení na hodnot jako před experimentem. Jestliže proband přidechl a byla zaznamenána změna koncentrace  $N_2O$  do 2 minut od začátku experimentu, došlo k zastavení a opakování experimentu.

Před začátkem a po konci experimentu byla vždy změřena odporová charakteristika zapojené soustavy v rozsahu od 0 do 100 L/min. Použitý perlit byl po ukončení měření propláchnut čistým vzduchem a přesypán do barelu. Na obrázku č. 4.4 je možné vidět zázemí experimentu s přístroji a aparaturou.



**Obr. č. 4.4:** Aparatura s přístroji

Na obrázku č. 4.5 je možné vidět probanda připojeného k měřící aparatuře během experimentu.



**Obr. č. 4.5:** Aparatura s připojeným probandem

Po celou dobu experimentu byl přítomen lékař se specializací v anesteziologii, který hlídal životní funkce probanda a v případě zhoršení jeho stavu by mu poskytl první pomoc. K této příležitosti byla připravena tlaková láhev s kyslíkem napojená na vak s dýchací maskou, zobrazeno na obrázku č. 4.6.



**Obr. č. 4.6:** Lahev s kyslíkem a dýchací maskou, lahev a hadička s  $N_2O$

## 4.4 Zpracování dat

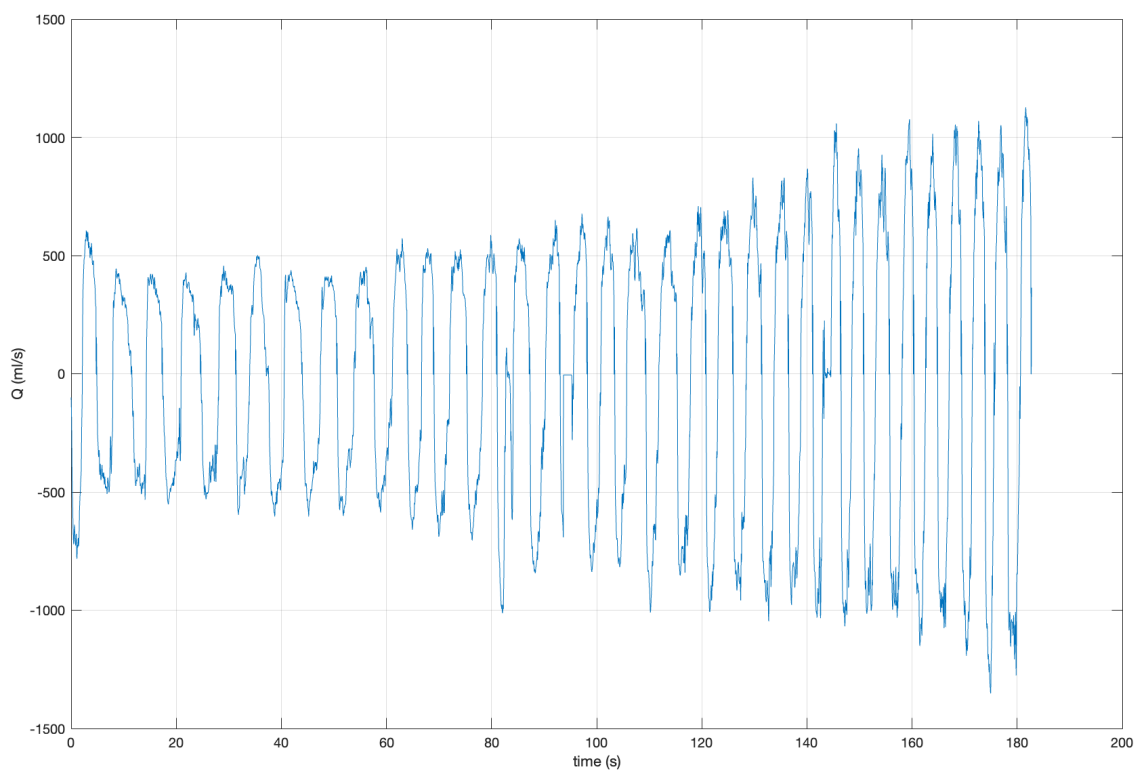
V průběhu experimentu byly u probandů zaznamenávány signály tlaku v dýchacích cestách  $p_{aw}$ , průtoku v dýchacích cestách  $q_{aw}$  a koncentrace oxidu uhličitého, oxidu dusného a kyslíku v dýchací směsi s frekvencí 25 Hz. Ze životních funkcí byly zaznamenávány hodnoty tepové frekvence a saturace periferní krve kyslíkem s frekvencí 2 Hz. Krevní tlak byl měřen jednou za půl minuty nebo na vyžádání dozorujícího lékaře.

Z dat ke zpracování bylo nutné z důvodu významných artefaktů a nedostatečné doby trvání experimentu vyřadit záznamy u probandů 2 a 4. Z důvodu ztráty párových dat byli zmínění probandi vyjmuti ze souhrnného zpracování, ačkoliv ostatní fáze nebyly zatíženy artefakty. Z důvodu rozdílné doby ukončení experimentální části jednotlivých probandů byla zvolena časová hranice pro zpracování všech naměřených signálů 180 s od připojení k měřicí soustavě. Zaznamenaná data byla zpracována v softwaru MATLAB 2021b (The Mathworks, Inc., USA). Výsledný program je součástí ZIP souboru přiloženého k diplomové práci.

Ke sledování koncentrace plynů a objemu v průběhu jednotlivých dechů bylo nutné v signálu identifikovat fáze nádechů a výdechů. Z toho důvodu bylo nutné signály digitálně předzpracovat do vhodné podoby.

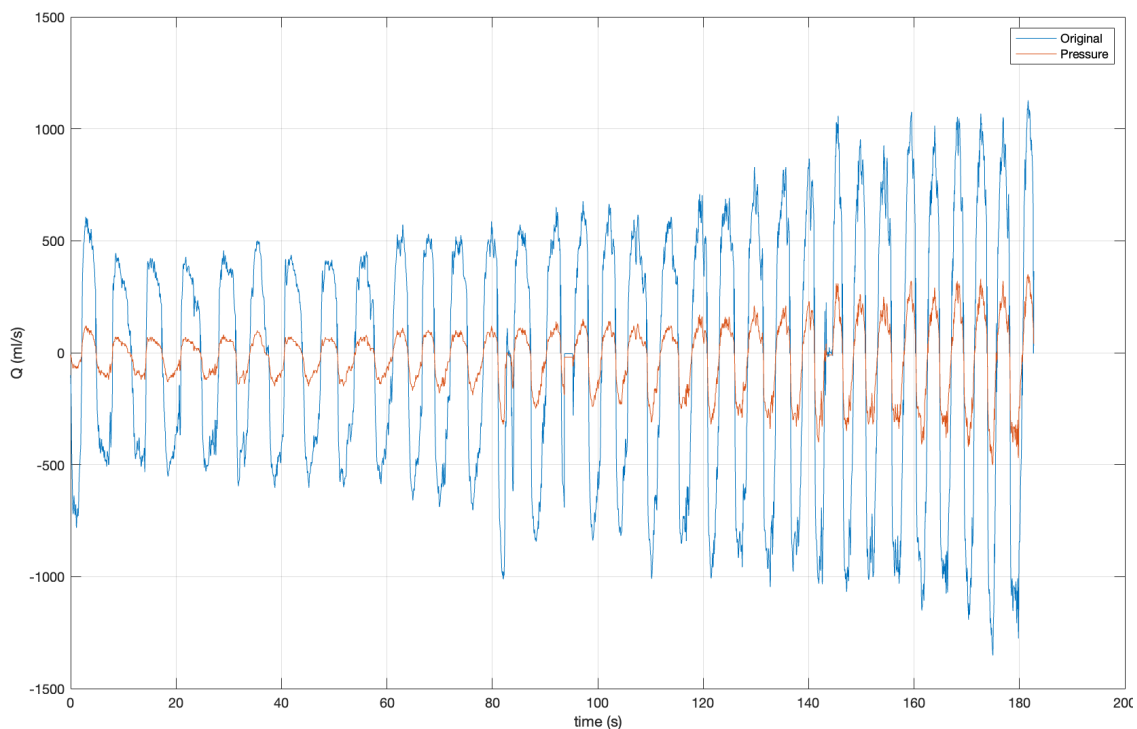
### 4.4.1 Předzpracování naměřených digitální dat

V zaznamenaném signálu objemového průtoku dýchaných plynů se nachází rušení vyššími frekvencemi, než je užitečný signál, jak je možné vidět na dvou místech v grafu č. 4.1 se signálem zaznamenaným u probanda č. 8 dýchajícího do perlitu bez přítomnosti vzduchové kapsy. Toto rušení se v signálu objevovalo zejména při přechodu od nádechu do výdechu a opačně. V případě že by nedošlo k jejich odstranění, mohlo by docházet k falešnému rozpoznání jednotlivých konců a začátku dechů. V následujících odstavcích jsou zpracovány jednotlivé možnosti k odstranění rušení a zmíněn výsledný postup pro identifikaci jednotlivých dechů v signálu.



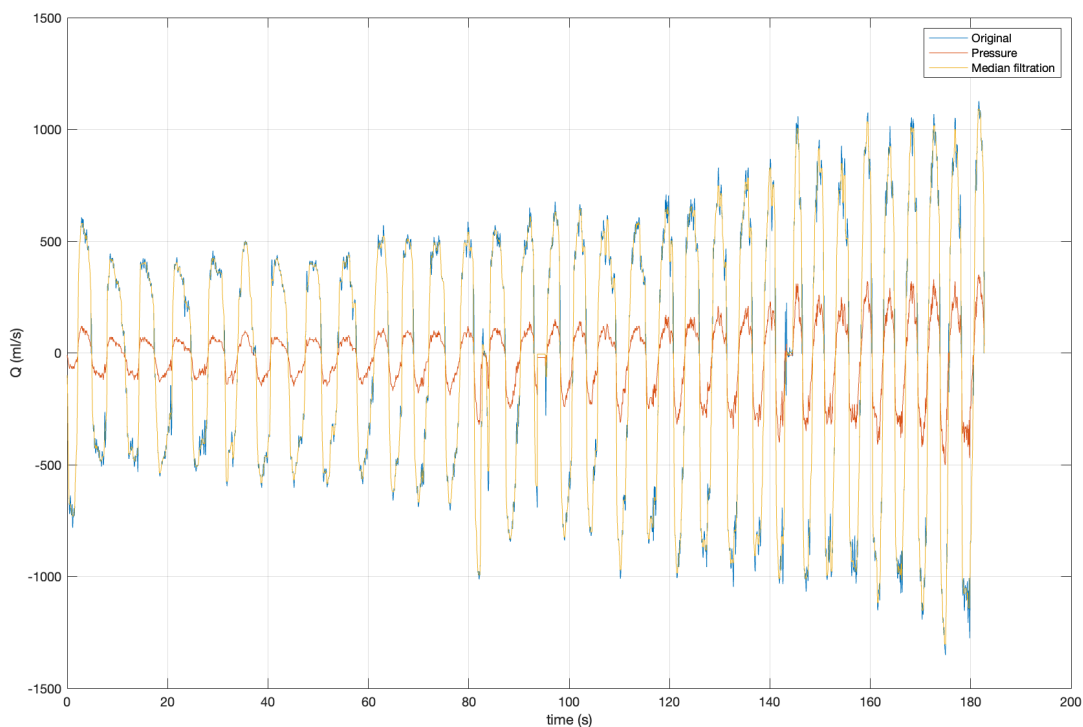
**Graf. č. 4.2:** Nefiltrovaný signál průtoku dýchané směsi

V grafu č. 4.2 je totožný signál průtoku, ale byl k němu ještě přidán signál tlaku v dýchacích cestách. Na průběhu tlakové křivky je možné vidět, že v místech, kde dochází k prudkým (vysokofrekvenčním) změnám v oblasti nuly, tedy při změně směru toku od probanda k probandovi), tak se nejedná o změnu směru průtoku ale o zarušení šumem nebo artefakt. Na dalších řádcích byly popsány různé způsoby odstranění rušení ze signálu průtoku.



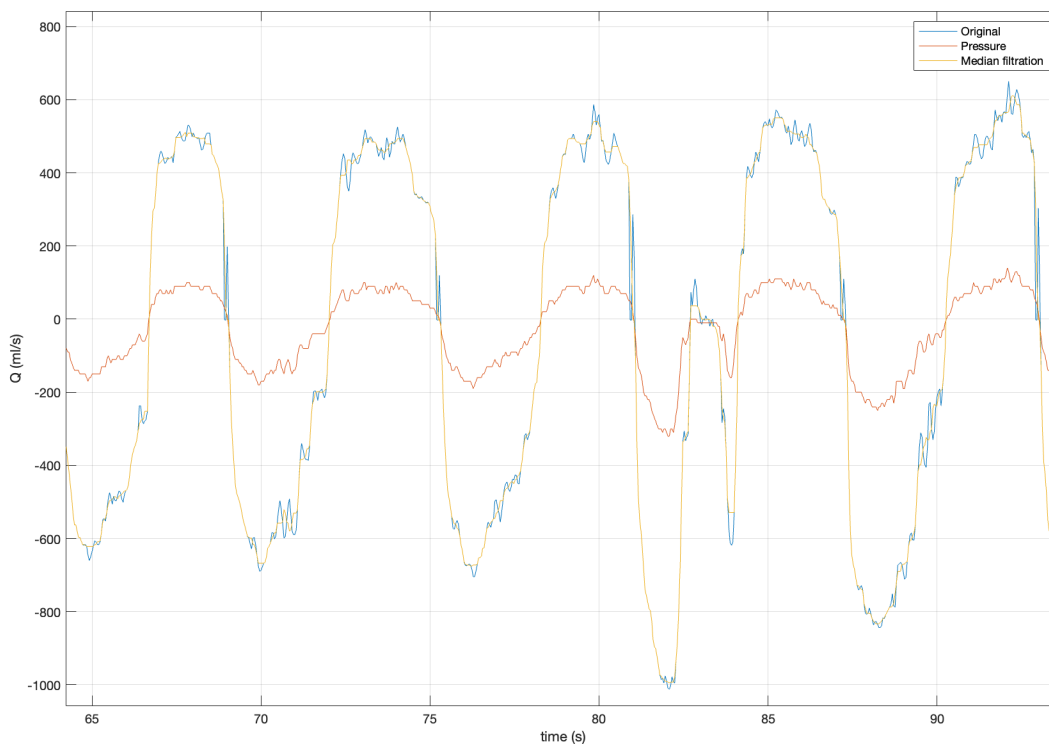
**Graf. č. 4.3:** Nefiltrovaný signál průtoku a tlaku

Jednou z nejnámější nelineární filtrací je mediánový filtr. Používá se k odstranění anomálních hodnot v datových polích, snížení odlehých hodnot a impulsního šumu. Jednotlivé prvky v okně se seřadí od nejmenšího po největší nebo naopak a vybere se střední hodnota (medián), která je považována za výstupní prvek okna. V následujícím grafu č. 4.4 je možné vidět filtrování signálu pomocí mediánové filtru s velikostí okna 9 vzorků. I přes použití zmíněného filtru, tak prudké změny v oblasti kolem nulových hodnot přetrvávají. Proto se přistoupilo k vyzkoušení filtru s klouzavým průměrem.



**Graf. č. 4.4:** Nefiltrovaný signál, tlakový signál a signál s mediánovým filtrem

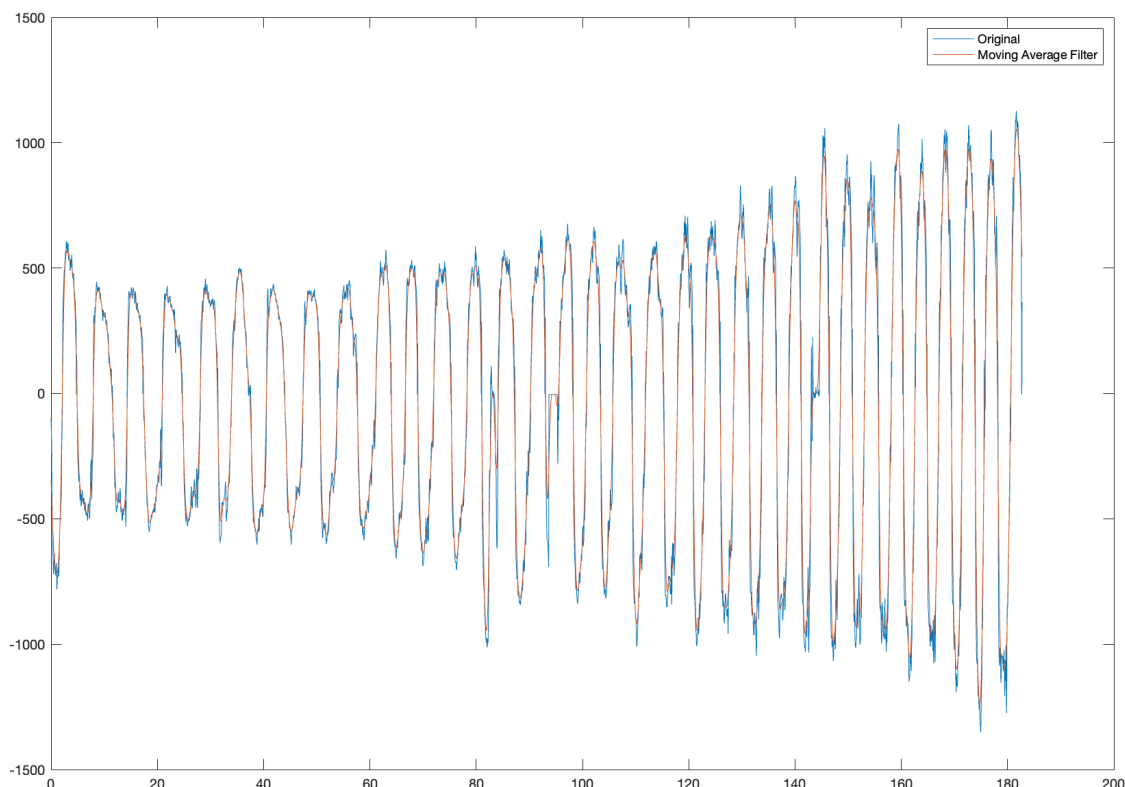
Všechny tři signály je možné vidět s detailem na průběh 5 dechů na následujícím grafu č. 4.5 I přes použití zmíněného mediánové filtru v oblasti po 3 dechu následuje prudká změna průtoku. Došlo by tak k falešné identifikaci začátku dechu.



**Graf. č. 4.5:** Detail na uvedené tři signály

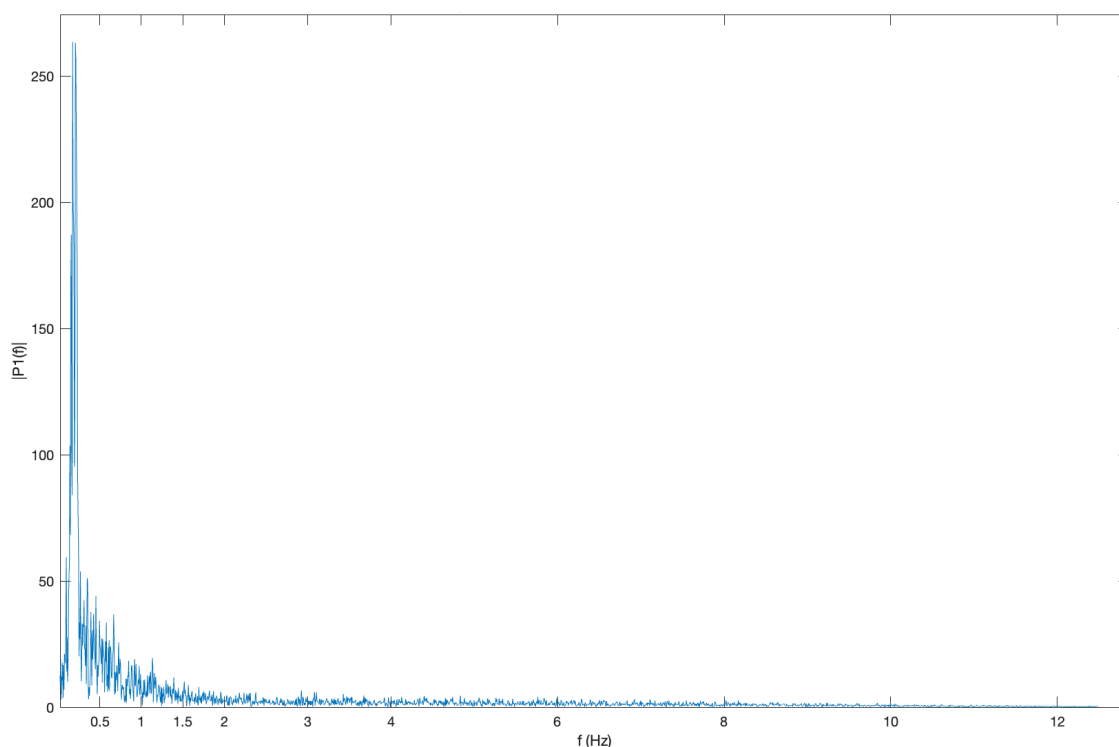


Dalším způsobem, jak vyhladit signál a odstranit šum je použití filtru s klouzavým průměrem a s pevnou délkou okna. Velikost okna je ve většině případů určena heuristicky. Při filtrování se okno posunuje po délce vektoru a vypočítá se průměr z prvků v každém okně. Pokud se vezme v potaz, že 3 minuty záznamu signálu mají zhruba 4500 prvků, tak se jeví jako vhodné použití velikosti okna o 25 prvcích. Velikost okna je nutné stanovit v rozmezí, kdy je filtr účinný, ale zároveň nesmí docházet k přílišnému zkreslení signálu. Vyfiltrovaný signál pomocí klouzavého průměru je vidět na grafu č. 4.6.



**Graf. č. 4.6:** Filtrovaný signál pomocí klouzavého průměru

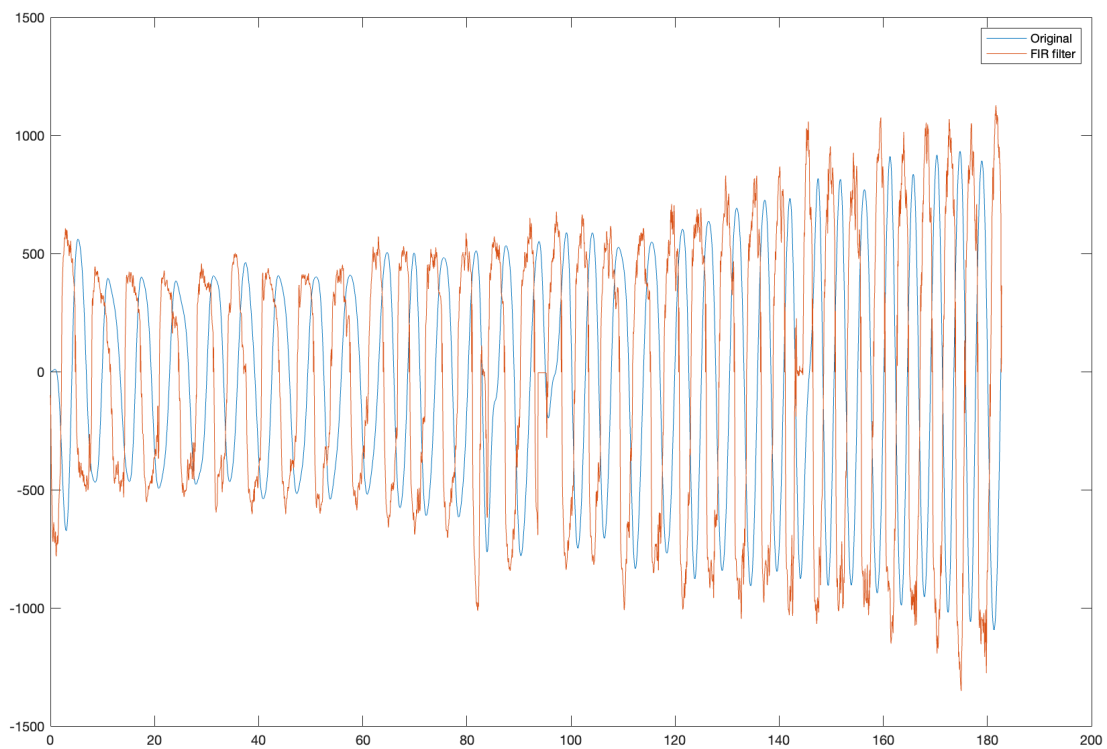
Nicméně ani tento filtr nedokázal spolehlivě odstranit prudké změny hodnot v oblasti kolem nuly. Proto se v dalším kroku nefiltrovaný signál převedl z časové oblasti do frekvenční oblasti pomocí rychlé Fourierovi transformace. Následně bylo možné zobrazit spektrum signálu, na grafu č. 4.7. A pokusit se najít frekvence, které způsobují zarušení užitečného signálu.



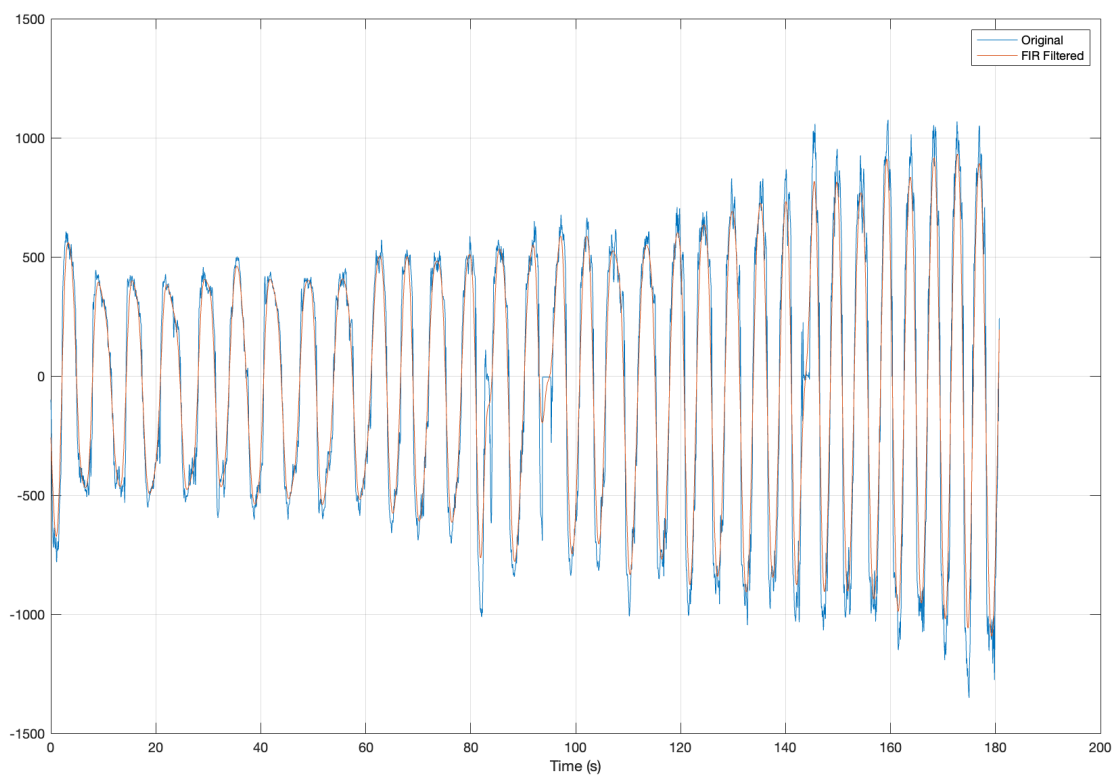
**Graf č. 4.7:** Amplitudové spektrum pomocí FFT

K analogovému ale i digitálnímu odstranění vysokých frekvencí v signálu se běžně používá FIR filtry typu dolní propust. Frekvenční odezva je co možná nejplošší v propustném pásmu. Nastává plynulá změna fáze s frekvencí a skupinové zpoždění je bez vlnění. Změnou řádu filtru  $n$  lze dosáhnout větší selektivity a určuje s jakou přesností jsou modelovány přenosové charakteristiky filtru. Čím je řád vyšší, tím jsou větší nároky na výpočetní výkon. Jelikož naše data nebylo nutné zpracovávat online, tak nároky na výkon jsme mohli zanedbat [22].

Filtrace signálu pomocí FIR filtru s mezní frekvencí 0,5 Hz zvolenou na základě zobrazeného spektra signálu je možné vidět na grafu č. 4.8. Minimální řád filtru byl vypočítán na hodnotu 193 při této mezní frekvenci, stop band frekvenci 0.52 Hz a při zeslabení o 60 dB. V grafu je vidět, že z vyfiltrovaného signálu jsou již odstraněny prudké změny hodnot z oblasti kolem nuly. Ale signál byl nyní časově posunutý vůči originálnímu signálu. Tento posun bylo nutné kompenzovat, protože signál byl párováný s koncentracemi plynů a tlaku. V grafu č. 4.8 je vidět vyfiltrovaný signál bez kompenzace časového posunu a v grafu č. 4.9 je vidět vyfiltrovaný signál s již provedenou kompenzací.

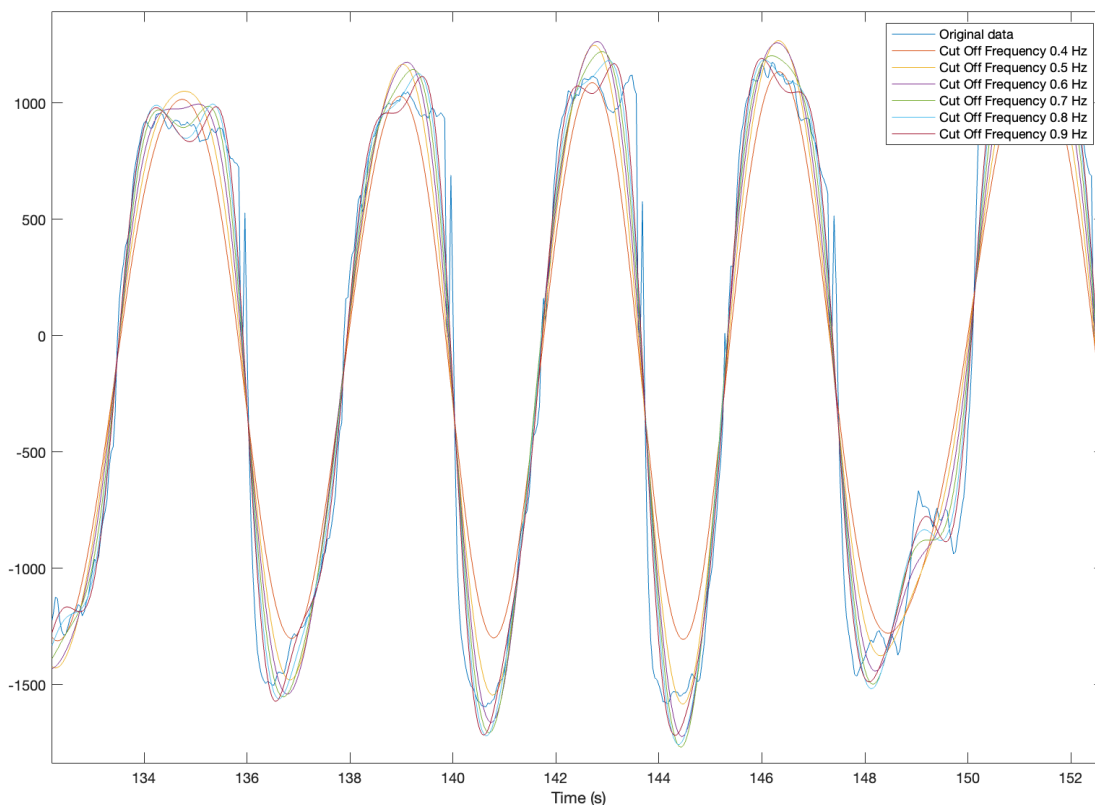


**Graf. č. 4.8:** Nefiltrovaný signál a FIR filtrace



**Graf. č. 4.9:** FIR filtrace s kompenzací časového posunu

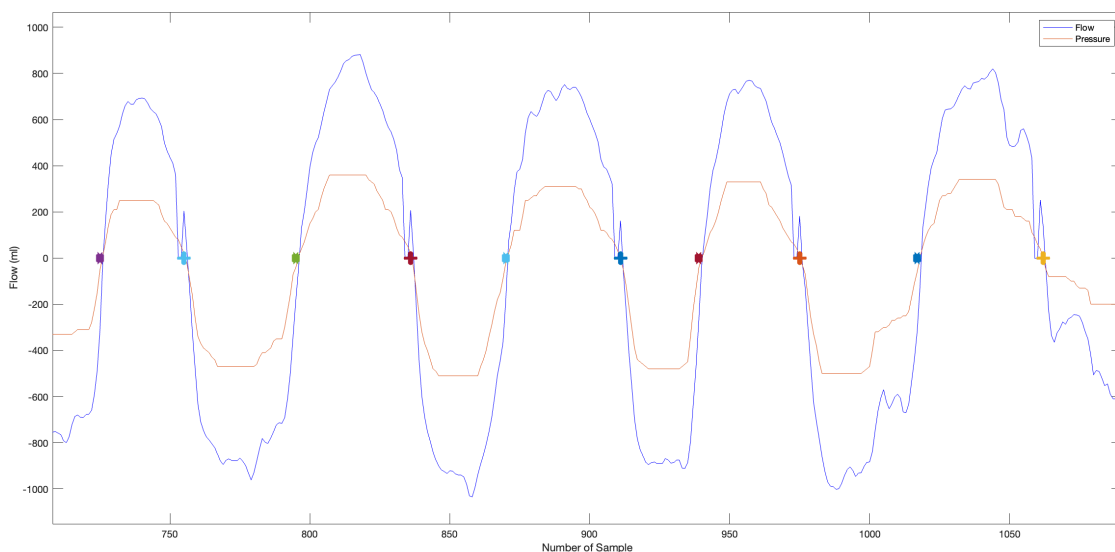
K dosažení kvalitní filtrace, ale minimálního zkreslení signálu bylo nutné vybrat vhodnou mezní frekvenci filtru. Na následujícím grafu č. 4.10 je zobrazen filtrovaný signál s různými mezními frekvencemi. Pomocí FIR filtru se podařilo odstranit vysoké frekvence ze signálu, nicméně i po aplikaci různých mezních frekvencí a řádu filtru se nepodařilo nalézt optimální parametry filtru, tak aby spolehlivě došlo odstranění prudkých změn v oblasti přechodu z inspirační do expirační fáze a zároveň aby nedocházelo ke zkreslení velikosti plochy pod křivkou.



**Graf. č. 4.10:** FIR filtrace s různými mezními frekvencemi

Nakonec se přistoupilo k využití křivky tlaku ze dvou důvodů. Jednak signál tlaku nebyl ovlivněn zmíněným typem rušení. A jednak z fyziologického hlediska aktivní nádech nastává, až když člověk vytvoří aktivní podtlak v dýchacích cestách. Zmíněné dva důvody vedly k rozhodnutí zvolit tlakovou křivku jako vhodnější k detekci začátku a konce dané fáze dechu.

Pomocí změny tlaku bylo možné identifikovat začátky a konce nádechu, respektive výdechu. Jednotlivé změny fáze dechů byly na grafu č. 4.11 označeny hvězdičkou a kolečkem. Díky známým místům změn je možné vypočítat velikost plochy pod křivkou průtoku a stanovit objemy plynů v nádechích a výdeších.



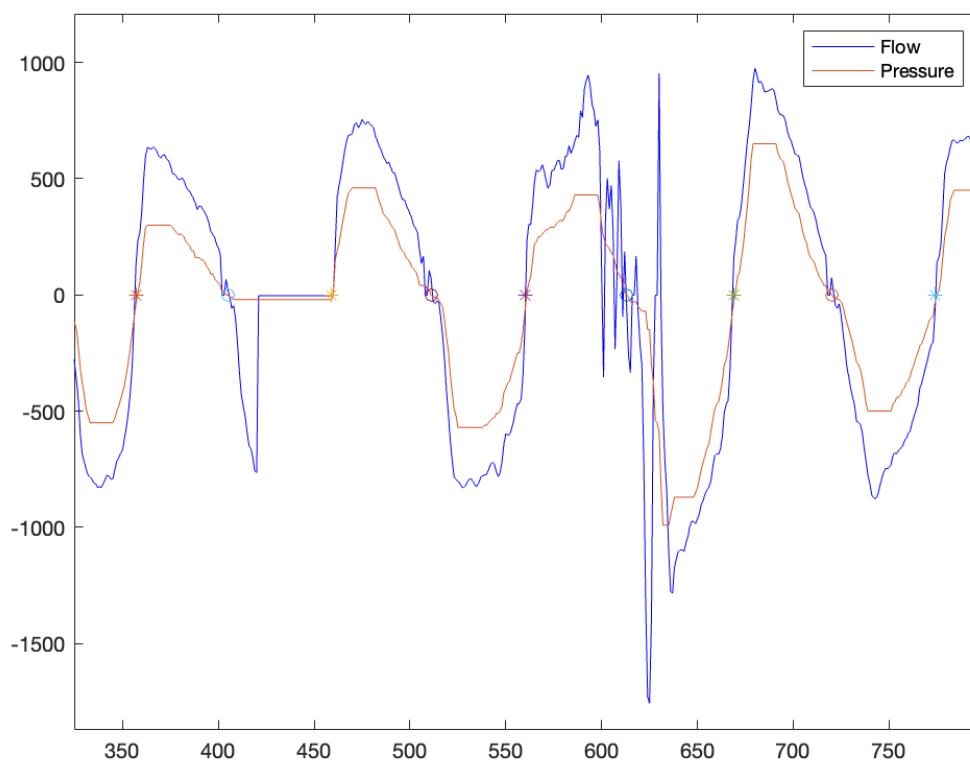
**Graf č. 4.11:** Identifikace začátku a konce nádechu a výdechu z tlakové křivky

Navrhnutý program zpracovával průběh dechu, tak že v případě nádechu se všechny kladné hodnoty označily jako nula a záporné jako jedna. K vektoru jedniček a nul se přiřadil vektor průtoku v odpovídajícím čase.

Následně došlo k zapsání oblastí průtoku s přiřazenou hodnotou tlaku jedna do matice, kde se v každém řádku nachází hodnoty průtoku pro jeden nádech, potažmo výdech. Takto se uložily do jedné matice všechny nádechy a do druhé matice všechny výdechy.

V určitých nepředvídatelných případech byl při změně hodnot tlaku z nádechu do výdechu po dobu několika vzorků (v řádech desítek milisekund) tlak, průtok i koncentrace na hodnotě nula, zobrazeno na grafu č. 4.11. Při procházení záznamů se zjevně jednalo o artefakt způsobený záznamovým přístrojem. Jelikož se hodnoty tlaku používají pouze k detekci změny fáze dechu a tento artefakt se vždy nachází pouze ve směru změny z výdechu na nádech, bylo možné zavést do algoritmu opatření, kdy se nulové hodnoty nahradily hodnotou značící výdech, protože podle profilu průtoku se zjevně stále jednalo o výdech. Umožnilo to eliminaci artefaktů, které se nacházely v záznamu tlaku a průtoku.

Posledním artefaktem, který se vyskytoval v záznamech, byl náhlý výpadek záznamu koncentrace jednoho z plynů. Místo reálných hodnot se objevily nulové koncentrace. Tento typ výpadku přetrvával maximálně v řádech desetin sekundy. Nicméně tento artefakt měl znatelný vliv na celkový objem daného dechu, bohužel došlo ke ztrátě dat, které se nedaly zpětně rekonstruovat. Proto v případě výrazného poklesu objemu plynu v dechu způsobným zmíněnými artefakty, došlo k nahrazení objemu daného dechu průměrem z předchozího dechu, následujícího dechu a expirovaného objemu.



**Graf č. 4.11:** Ukázka artefaktů v záznamu

Ještě než mohlo dojít k vypočtení objemů dechu, bylo nejdříve nutné signál průtoku vynásobit korekčním koeficientem pro přepočítání z vysokoprůtokové clonky HF D-Lite na běžnou clonku D-Lite za účelem získání reálných hodnot a vyfiltrováním signálu průtoku mediánovým filtrem s délkou okna 9 vzorků.

Se známými údaji o začátku a konci jednotlivých fází dechu bylo možné samostatně zpracovávat jenom nádechy a výdechy. Při zpracování v prostředí MATLAB se pomocí vytvořeného algoritmu hodnoty průtoku vzduchu pro inspiraci uložily do jedné matice a pro expiraci do matice druhé. V každém řádku matice se nacházely data pro jednu fázi dechu. U každé hodnoty průtoku byla přiřazena v daném čase odpovídající hodnota koncentrace  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  a čas, aby nedošlo ke ztrátě párových dat.

#### 4.4.2 Interpolace nádechu a výdechu pro $\text{CO}_2$ a $\text{O}_2$

Aby bylo možné porovnat koncentraci  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$  mezi jednotlivými dechy s různou dobou trvání, bylo nutné data interpolovat na stejný počet vzorků. Všechny dechy se prodloužily na stejnou délku. Využita k tomu byla interpolace pomocí funkce *interp* integrovaná v prostředí MATLAB. Data byla interpolována na celkově 100 hodnot, což odpovídá době nádechu nebo výdechu 4 s. Tato hodnota byla zvolena, protože žádný přirozený nádech nebo výdech probandů netrval déle. Zároveň doba 4 s není příliš vzdálená reálné době nádechu či výdechu. Hodnoty poté bylo možné vykreslit do 3 D grafu pomocí *mesh* funkce.

#### **4.4.3 Vydechnutý a nadechnutý objem vzduchu a plynů**

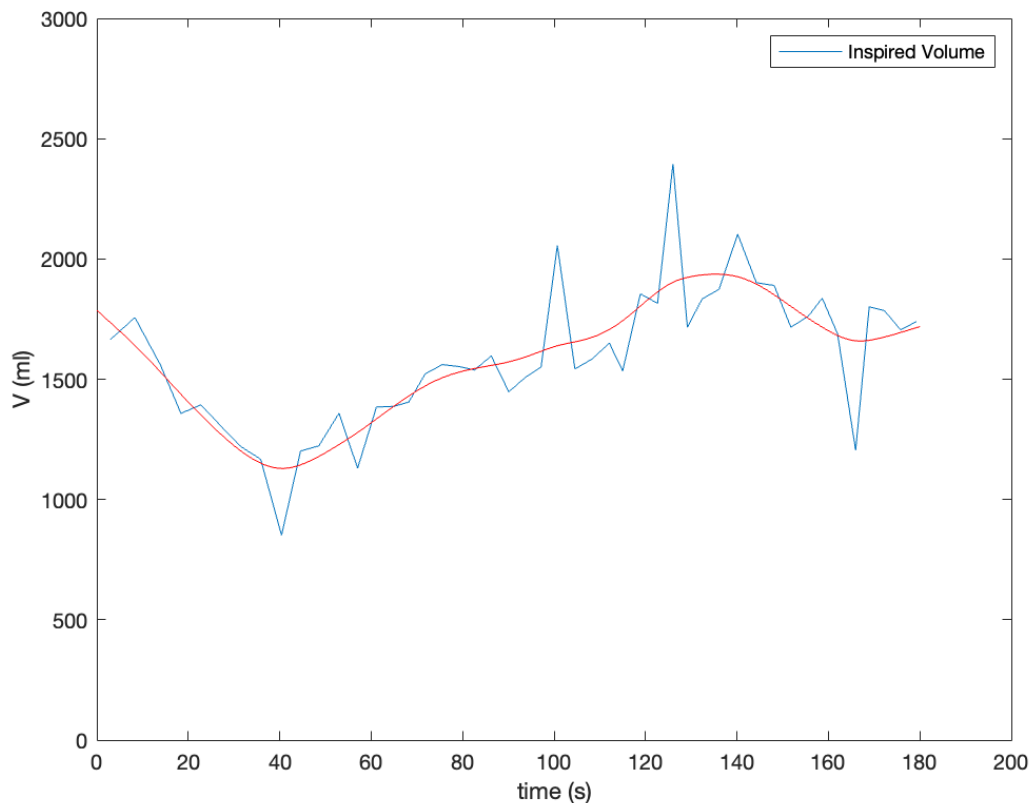
Ze známých hodnot průtoku směsi a koncentrace oxidu uhličitého a kyslíku bylo možné vypočítat objem plynu pro jednotlivé nádechy a výdechy. Po vynásobení hodnoty průtoku s hodnotou frakce plynu vyšla hodnota průtoku daného plynu. Následně se vypočítal určitý integrál lichoběžníkovou metodou a došlo ke stanovení celkového objemu daného plynu pro konkrétní fázi dechu.

#### **4.4.4 Rozdílné množství inspirovaného a expirovaného plynu**

Z hodnot objemu CO<sub>2</sub> pro jednotlivé výdechy a nádechy bylo možné vypočítat množství CO<sub>2</sub> které s každým dechem zůstane v kapse a perlitu. Hodnota prvního nádechu se odečetla od hodnoty prvního výdechu, tento výpočet se postupně provedl pro všechny následující dechy. Výsledné hodnoty bylo možné zobrazit v grafu jako rozdíl expirovaného a inspirovaného množství daného plynu. Při dosazení do kumulativní funkce vyšel graf celkového vydechnutého množství CO<sub>2</sub>. Totožný výpočet se provedl i u O<sub>2</sub>, akorát výslednou hodnotou bylo spotřebované množství O<sub>2</sub>.

#### **4.4.5 Statistické zpracování výsledků**

Při vykreslování grafů byly objemy závislé na čase, kdy došlo k danému dechu. Pro statistické zpracování je ale vhodnější odebírat hodnoty vždy ve stejném čase. Což nebylo možné, protože se proband mohl aktuálně pohybovat v expirační části nebo naopak. Proto byly hodnoty interpolovány na celý průběh signálu a s 10sekundovým intervalem stanoveny hodnoty pro konkrétní čas. Bylo tak možné zobrazit hodnoty s pravidelným rozestupem a snáze porovnávat probandy a fáze mezi sebou. Hodnoty objemu závislé na čase a interpolované jsou zobrazeny na grafu č. 4. 12.



**Graf č. 4.12:** Objemy nádechu v čase a křivka interpolace

U takto vytvořených záznamů byla provedena pomocí programu Microsoft Excel (Microsoft Corporation, USA) testová statistika sledující signifikantní podobnosti mezi jednotlivými fázemi experimentu. Ve výsledných grafech je v každé časové značce vykreslena střední hodnota a směrodatná odchylka. Jednotlivé soubory byly otestovány na normalitu dat pomocí Chí-kvadrát testu dobré shody. Pro otestování podobnosti jednotlivých fází byla využita analýza rozptylu s Bonferroniho ad hoc analýzou pro opakovaná měření. V případě, že když došlo ke statisticky významnému rozdílu hodnot na úrovni významnosti 5 % mezi jednotlivými fázemi, byla přidána do grafu symbolická značka.



## 5 Výsledky

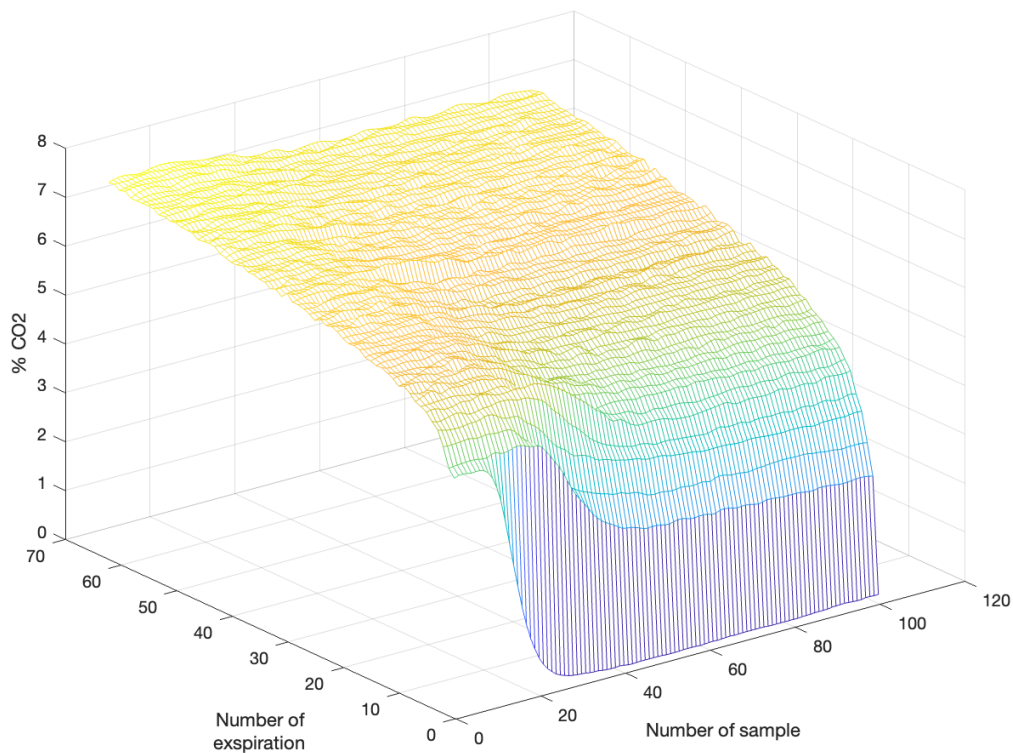
V této kapitole jsou uvedeny výsledky z provedené studie. Zobrazené grafy vycházejí ze zpracovaných signálů sledovaných parametrů jako je průtok, inspirovaná a expirovaná frakce  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$ . Celkem bylo zahrnuto do výsledků 11 probandů u kterých nedocházelo ke značným výpadkům signálu nebo přílišnému zatížení artefakty limitující zpracování. Prezentované grafy jsou ve formě střední hodnoty a směrodatné odchylky. Součástí je také ukazatel statistické významnosti. Jednotlivé fáze experimentu jsou od sebe barevně odlišeny. Fáze s plně vysypaným perlitem (F) je označena červenou barvou. Fáze, kdy proband dýchal do vzduchové kapsy o objemu 2 L (A) je uvedena černou barvou a modrou je vyznačena fáze, kdy proband dýchal do vzduchové kapsy a v dechové dráze se nacházel kompenzační odpor (C). Statisticky významný rozdíl mezi fázemi je vyznačen patřičným symbolem. Pokud byl rozdíl mezi dvěma fázemi, tak je značka dvoubarevná. V případě, že se pouze jedna fáze lišila od ostatních, symbol má barvu dané odlišné fáze.

### 5.1 Frakce $\text{CO}_2$

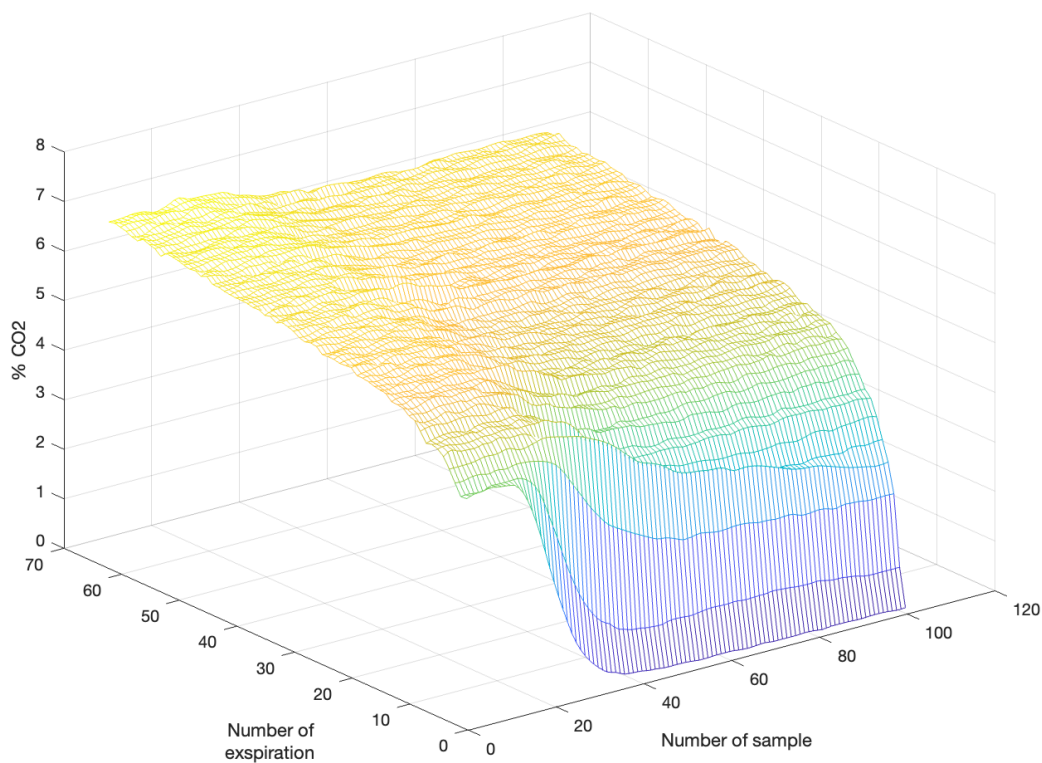
Na následujících grafech je prezentována inspirovaná frakce  $\text{CO}_2$  v průběhu nádechu s pořadím nádechu od počátku experimentu. Na ose  $z$  se nachází frakce  $\text{CO}_2$ , na ose  $x$  je pořadí interpolovaného vzorku a na ose  $y$  je pořadí nádechu od počátku experimentu. K prezentaci výsledku byl vybrán proband č. 11 u kterého nebyl žádný ze signálů zatížen artefakty.

#### 5.1.1 Inspirovaná frakce $\text{CO}_2$

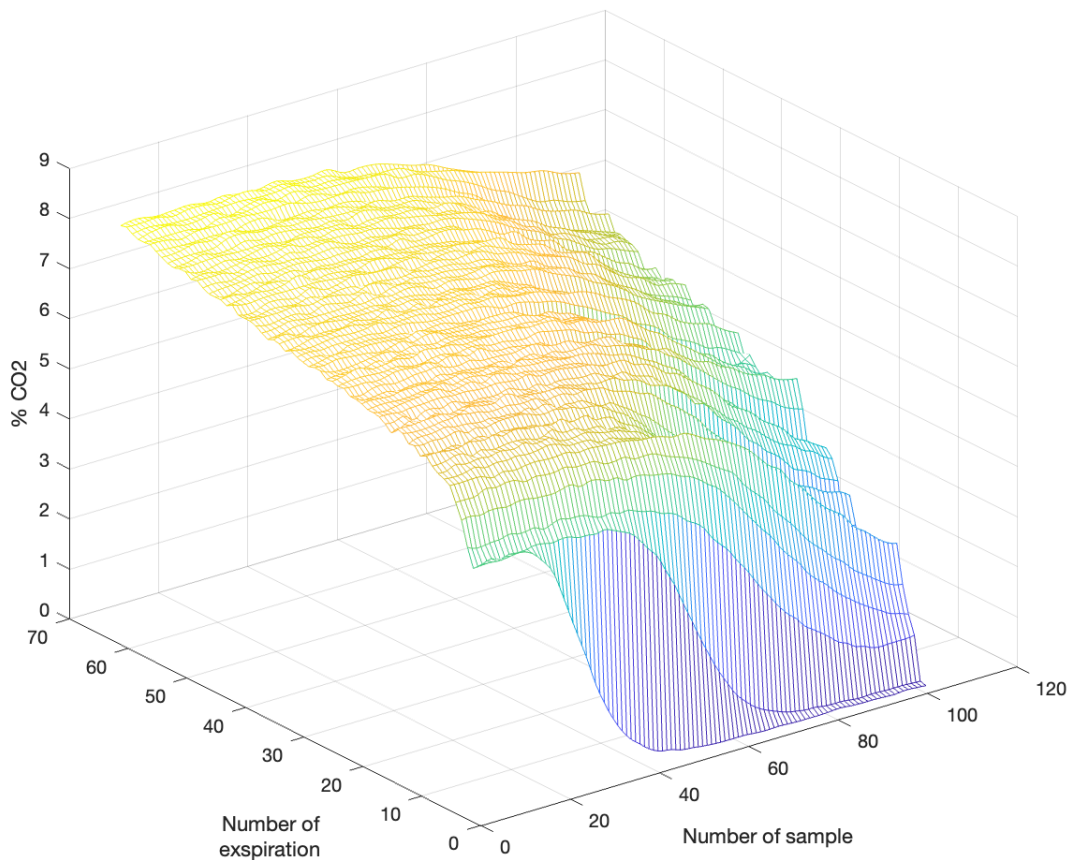
Fáze, ve které se probandi nadechovali ze vzduchové kapsy (A) je zobrazena na 3 D grafu č. 5.1. Fáze, kdy se probandi nadechovali ze vzduchové kapsy s kompenzačním odporem v dechové dráze (C) je na grafu č. 5.2. Na grafu č. 5.3 je zobrazena fáze s plně vysypaným perlitem (F).



**Graf č. 5.1:** Inspirace CO<sub>2</sub> ze vzduchové kapsy



**Graf č. 5.2:** Inspirace CO<sub>2</sub> ze vzduchové kapsy a s kompenzačním odporem

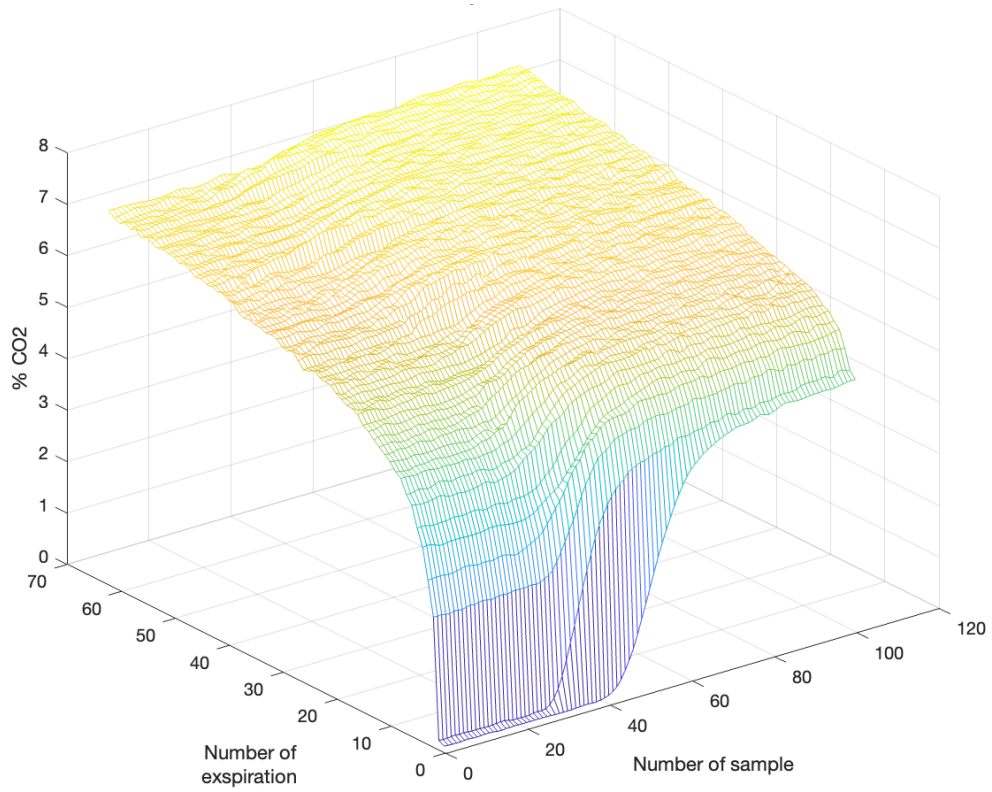


**Obr č. 5.3:** Inspirace CO<sub>2</sub> z plně vysypaného perlitu

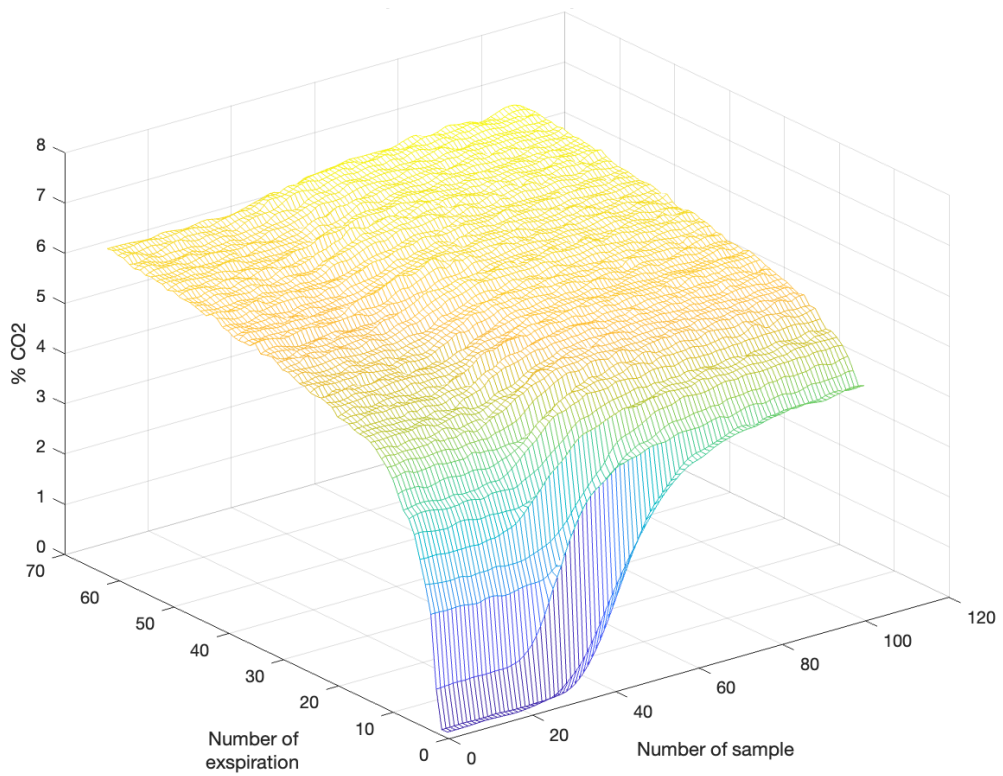
Na grafech je možné vidět efekt kapsy, kdy v kapse dochází k promíchávání plynů a probandi tak následně vdechují po celou dobu nádechu vzduch o podobné koncentraci CO<sub>2</sub>, zatímco u plně vysypaného perlitu nejdříve nadechují již vydechnutý vzduch o vysoké koncentraci CO<sub>2</sub> a ten o nižší koncentraci až na konci nádechu. Koncentrace CO<sub>2</sub> je také u fáze F u každého dechu vyšší oproti ostatním fázím. Rozdíl mezi kapsou a kapsou s kompenzačním odporem není z pohledu průběhu znatelný, ačkoliv u fáze C byla koncentrace u každého dechu nižší oproti fázi A.

### 5.1.2 Exspirovaná frakce CO<sub>2</sub>

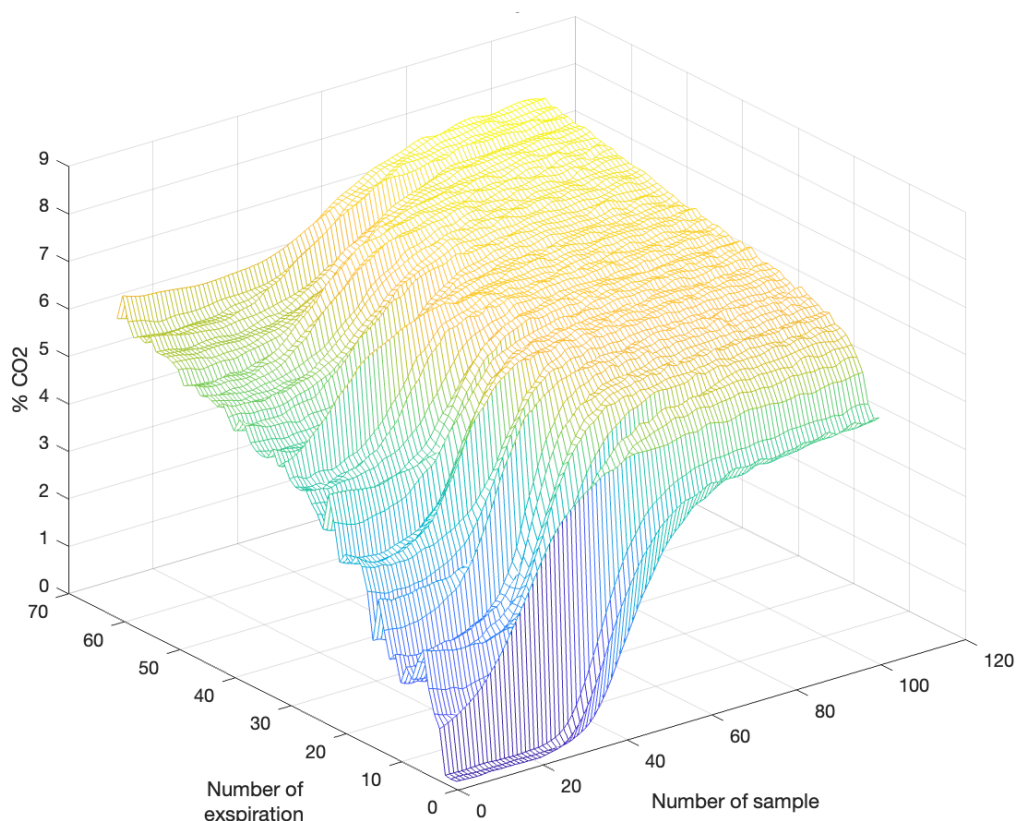
V grafech č. 5.4, 5.5 a 5.6 je zobrazena exspirovaná frakce CO<sub>2</sub> pro všechny tři zmíněné fáze.



**Graf č. 5.4:** Exspirace do vzduchové kapsy



**Graf č. 5.5:** Exspirace do vzduchové kapsy s kompenzačním odporem



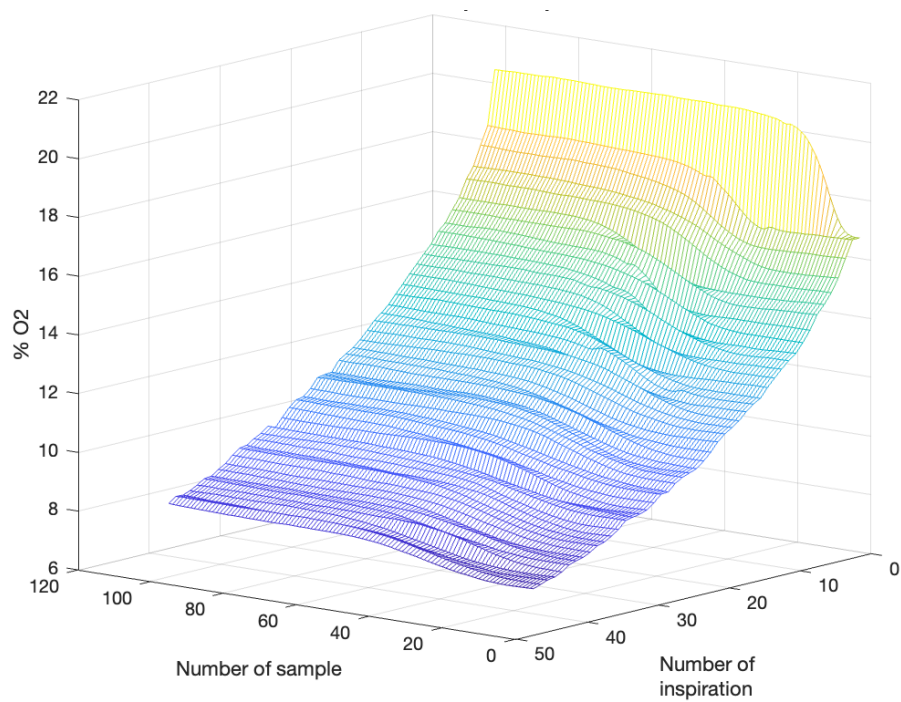
**Graf. č. 5.6:** Exspirace do plně vysypaného perlitu

Na grafech s průběhem koncentrace  $\text{CO}_2$  při výdechu je možné vidět, že z počátku probandi vydechovali do plně vysypaného perlitu nejdříve nižší koncentrace  $\text{CO}_2$  a až přibližně po třetině doby výdechu koncentrace začala narůstat. Při vydechování do kapsy byl průběh koncentrace po celou dobu výdechu velmi podobný. Na začátku výdechu byl vzduch, který zůstal v mrtvém prostoru a až poté následoval vzduch pocházející z alveolární oblasti plic.

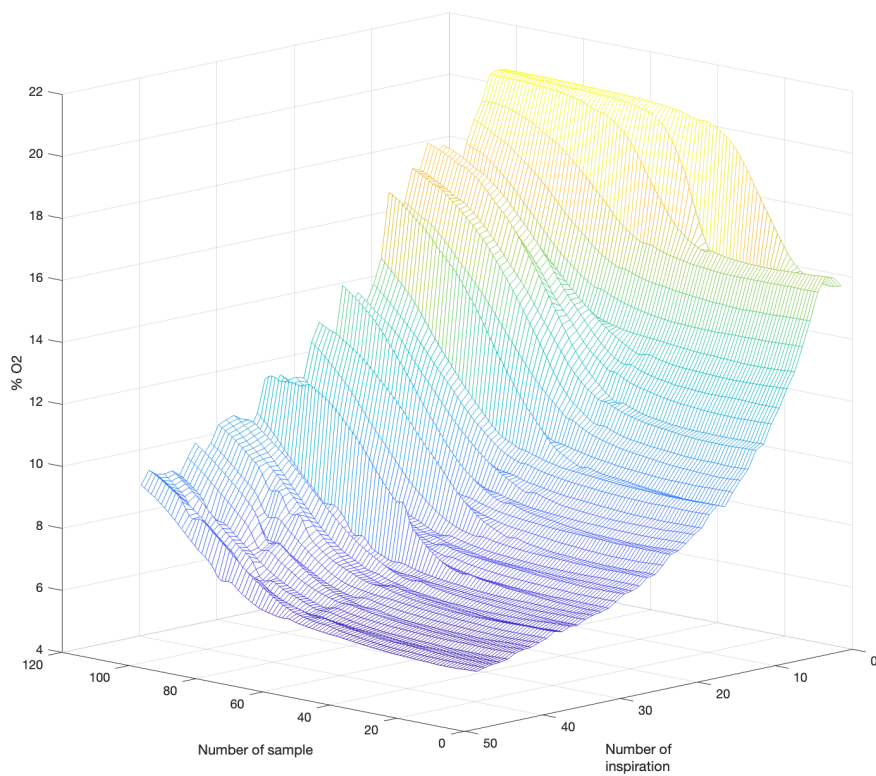
### 5.1.3 Inspirovaná frakce $\text{O}_2$

V grafech č. 5.7 a 5.8 byl zobrazen profil inspirované frakce  $\text{O}_2$  pro fázi s kapsou a s plně vysypaným perlitem. Z důvodu klesající koncentrace od počátku experimentu je zobrazené pořadí dechů otočené oproti grafům s koncentrací  $\text{CO}_2$ , aby bylo možné lépe vizualizovat průběh koncentrace pomocí 3 D grafu.





**Graf č. 5.7:** Inspirovaná frakce O<sub>2</sub> ze vzduchové kapsy



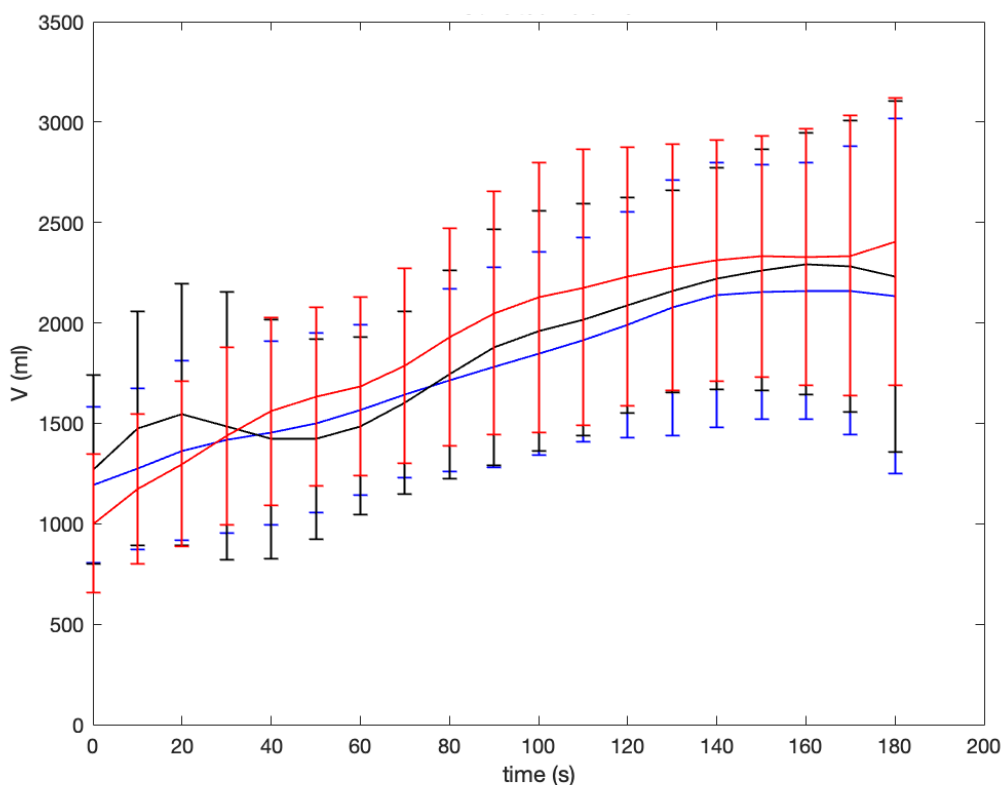
**Graf č. 5.8:** Inspirovaná frakce O<sub>2</sub> z plně vysypaného perlitu

Na grafech pro  $O_2$  je taktěž vidět pozitivní vliv kapsy na promíchávání plynů. Probandi po celou dobu nádechu nadechovali vzduch o podobné koncentraci  $O_2$ . U plně vysypaného perlitu probandi nadechovali vzduch o vyšší koncentraci až v poslední třetině nádechu. Také je možné pozorovat, že ne všechen alveolární plyn se dokáže promíchat v kapse, ale zůstane usazen v mrtvém prostoru dýchacích cest. Na grafech pro exspirovanou frakci  $O_2$  je taktěž zřejmý efekt promíchávání plynů v kapse a jsou uvedeny v příloze diplomové práce.

## 5.2 Dechové objemy vzduchu

V následujících podkapitolách jsou uvedeny výsledné grafy s dechovými objemy. Nejprve jsou zobrazeny celkové objemy vdechnutého a vydechnutého vzduchu a poté objemy pro oxid uhličitý a kyslík.

### 5.2.1 Objem nádechu

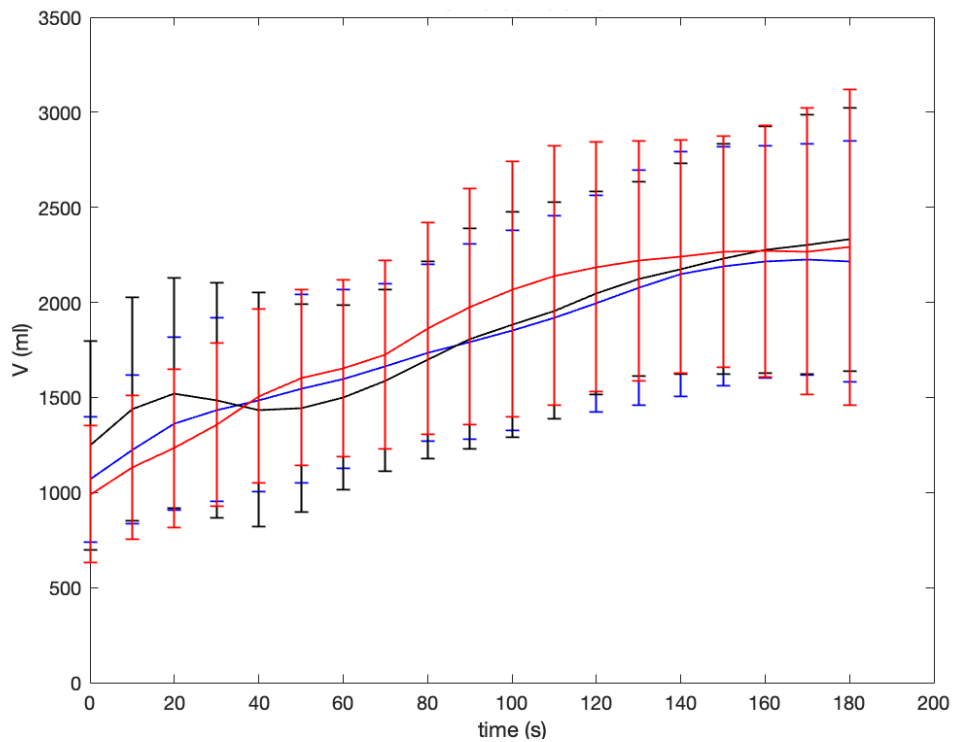


Graf č. 5.9: Objemy nádechu

Na grafu je možné vidět, že probandi z počátku experimentu nadechovali větší objemy při dýchání s kapsou než do plně vysypaného perlitu. Při nadechování z kapsy s kompenzačním odporem jsou nádechy menší než bez kompenzačního odporu. Přibližně po 40 s od začátku experimentu se velikost objemu nádechu změní a probandi nadechující se z plně vysypaného perlitu začnou dělat větší nádechy než u ostatních dvou fází. A až

do konce experimentu měli nejmenší objemy nádechu probandi nadechující se z kapsy s kompenzačním odporem.

## 5.2.2 Objem výdechu

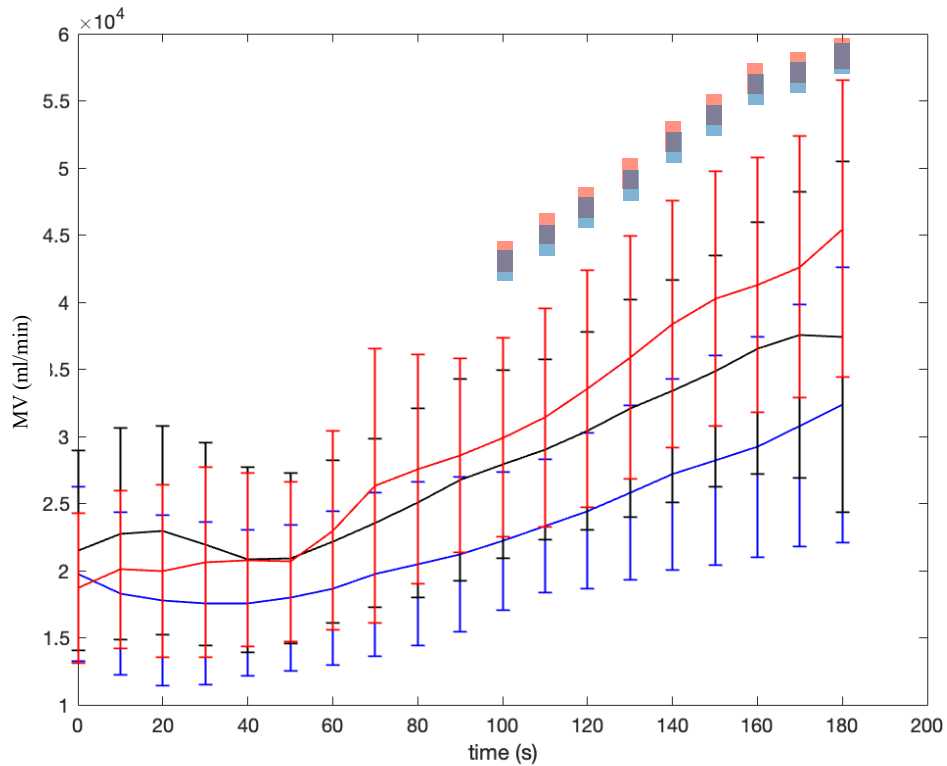


Graf č. 5.10: Objemy výdechu

Objemy výdechů úzce souvisely s objemy nádechu, proto je trend podobný jako v přechozím grafu.



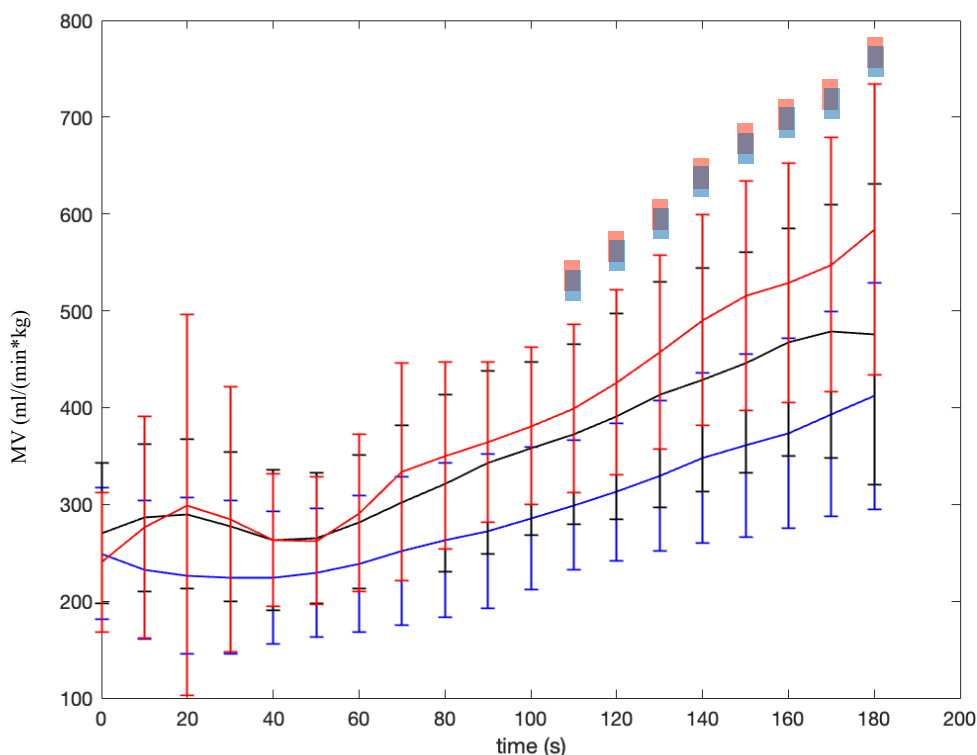
### 5.2.3 Minutová ventilace vzduchu



**Graf č. 5.11:** Minutová ventilace

Minutová ventilace měla podobný průběh jako dechové objemy. Rozdíly mezi jednotlivými fázemi se ještě zvýraznili vlivem odlišné dechové frekvence. Statisticky významný rozdíl mezi fází s dýcháním do kapsy s kompenzačním odporem a s plně vyspaným perlitem se objevil po 100 s od začátku experimentu.

## 5.2.4 Minutová ventilace vzduchu standardizovaná na hmotnost



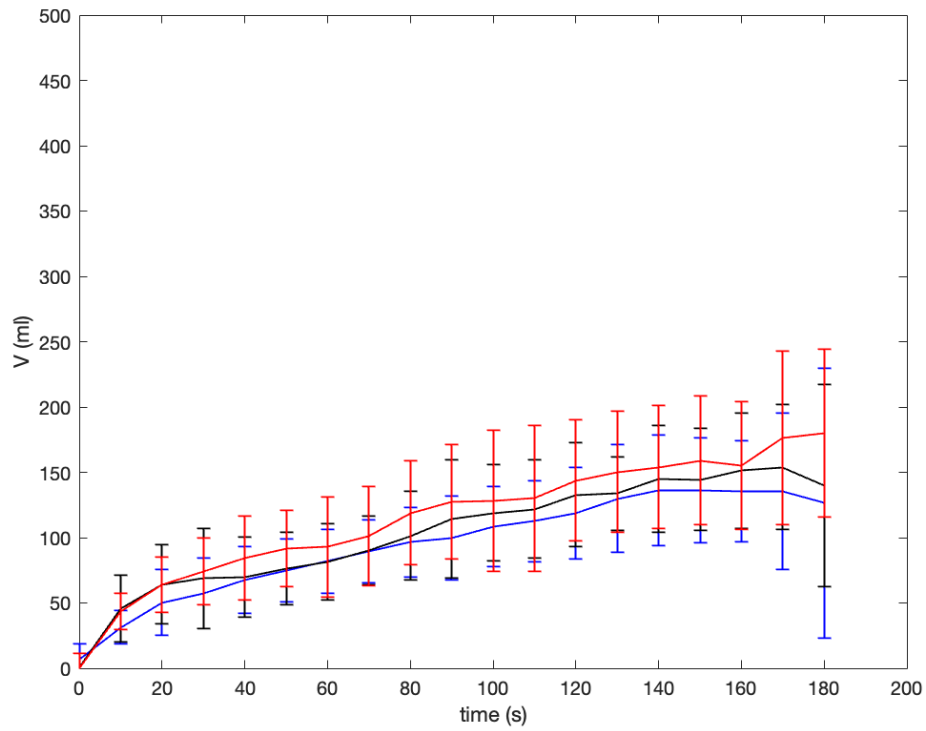
**Graf č. 5.12:** Minutová ventilace standardizovaná na hmotnost

Po standardizaci minutové ventilace na hmotnosti probandů došlo ke shodným hodnotám pro plně vysypaný perlit a kapsu přibližně po 20 s od začátku experimentu, významně se minutová ventilace začala zvyšovat po dalších 40 s a stoupala až do ukončení. Rostoucí trend byl výraznější u plně vysypaného perlitu, naopak minutová ventilace u kapsy s kompenzačním odporem byla výrazně nižší než u fáze A a F.

## 5.3 Objem CO<sub>2</sub> v dechu

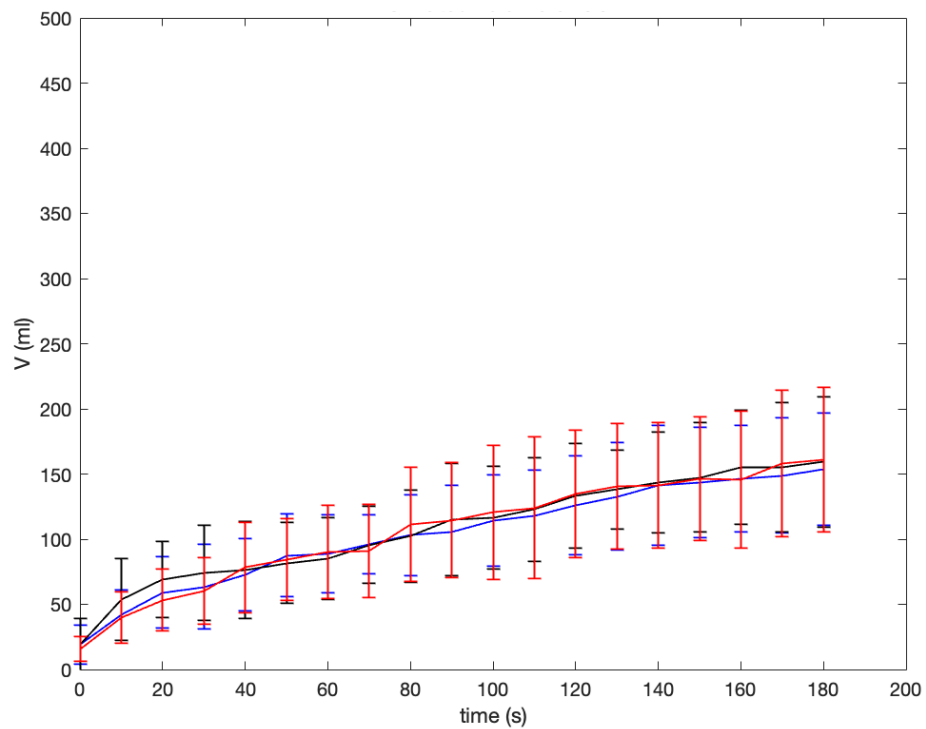
V této kapitole jsou uvedeny grafy, které zobrazují objem CO<sub>2</sub> v dechu v průběhu experimentu. Nejprve jsou uvedeny objemy pro nádechy a výdechy, poté minutová ventilace CO<sub>2</sub>.

### 5.3.1 Objem CO<sub>2</sub> v nádechu



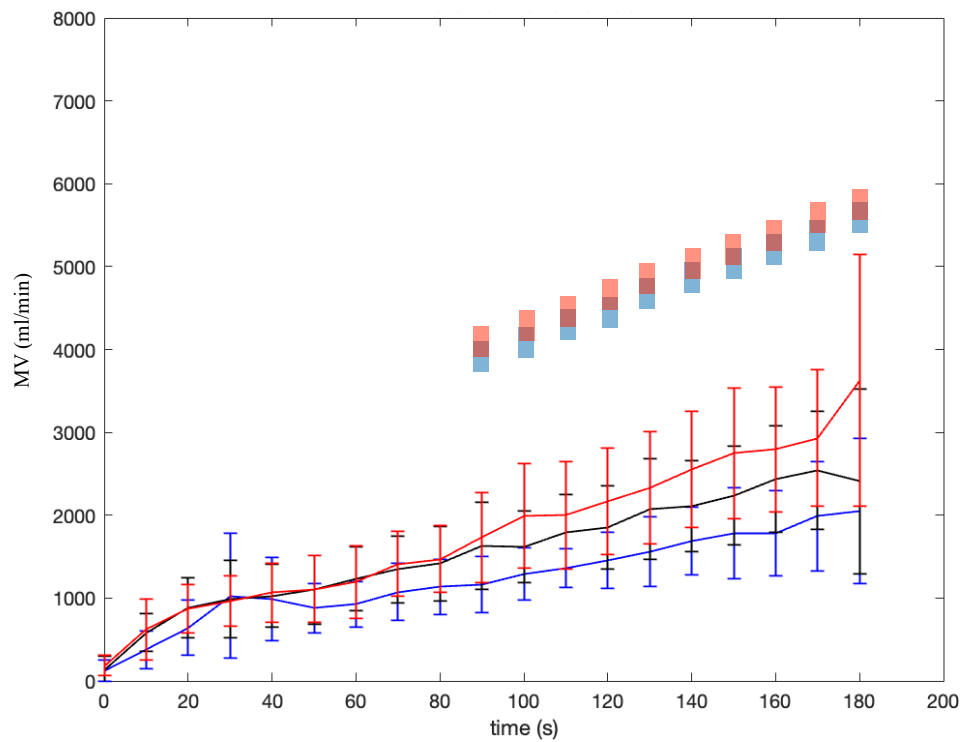
Graf č. 13: Inspirovaný objem CO<sub>2</sub>

### 5.3.2 Objem CO<sub>2</sub> ve výdechu



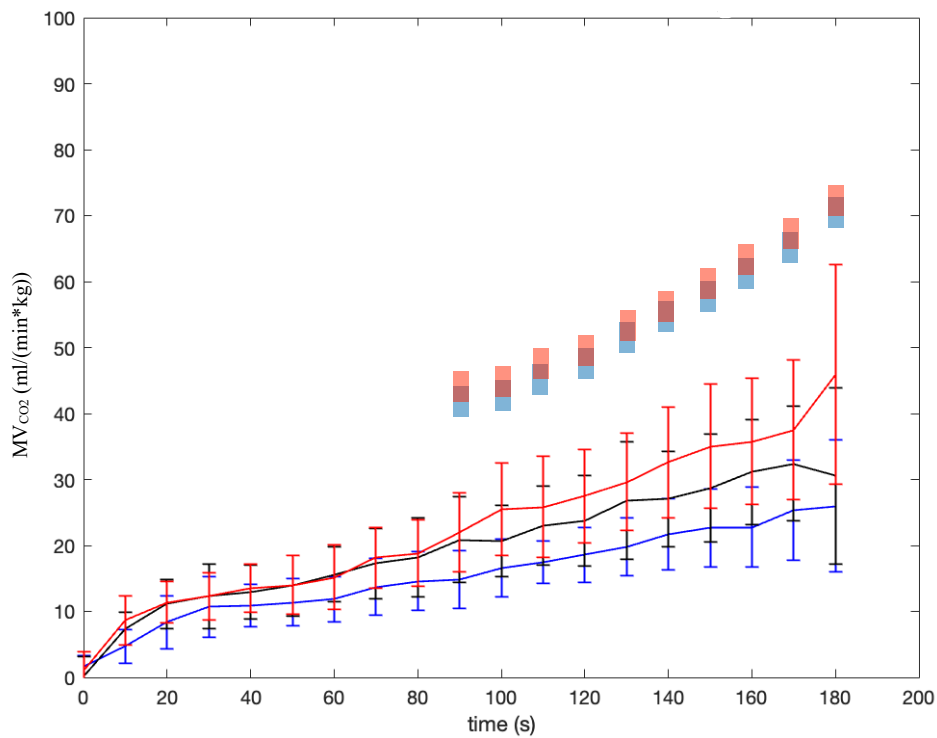
Graf č. 14: Expirovaný objem CO<sub>2</sub>

### 5.3.3 Minutová ventilace CO<sub>2</sub>



Graf č. 5.15: Minutová ventilace CO<sub>2</sub>

### 5.3.4 Minutová ventilace CO<sub>2</sub> standardizovaná na hmotnost



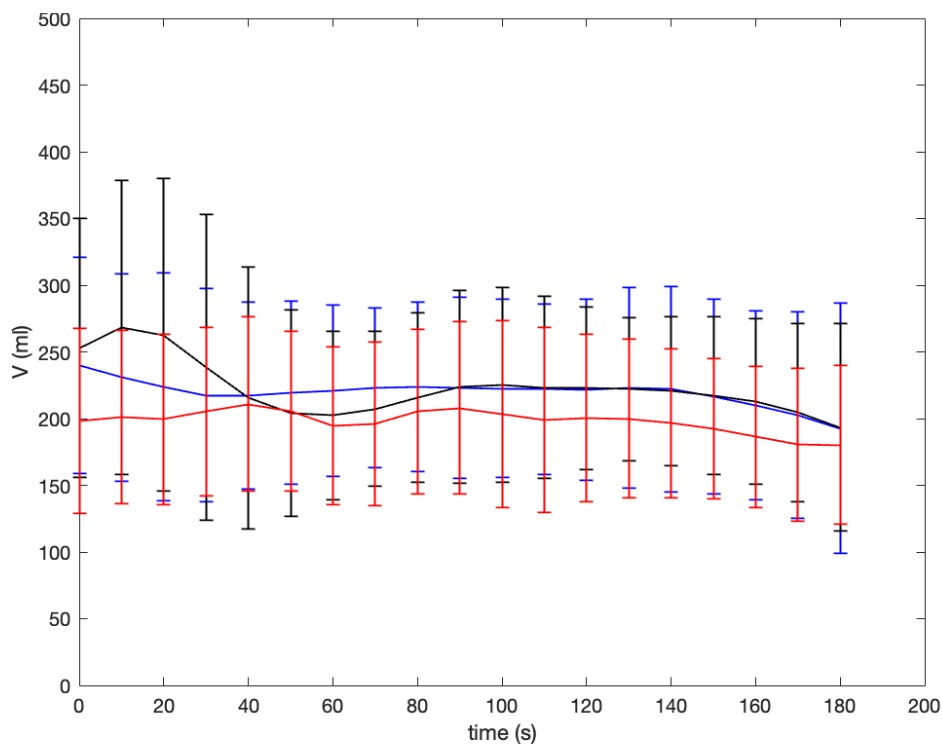
Graf č. 5.16: Minutová ventilace CO<sub>2</sub> standardizovaná na hmotnost

V předchozích grafech pro objemy  $\text{CO}_2$  v dechu je možné pozorovat zvýšené množství  $\text{CO}_2$  v nádechu u plně vysypaného perlitu. Množství  $\text{CO}_2$ , které probandi vydechnuli bylo přibližně stejné u všech fází. V průběhu experimentu se minutová ventilace  $\text{CO}_2$  postupně zvyšovala, nejrychleji však u fáze s plně vysypaným perlitem. Ke statisticky významnému rozdílu mezi plně vysypaným perlitem a kapsou s kompenzací došlo poprvé po 90 s od začátku experimentu.

## 5.4 Objem $\text{O}_2$ v dechu

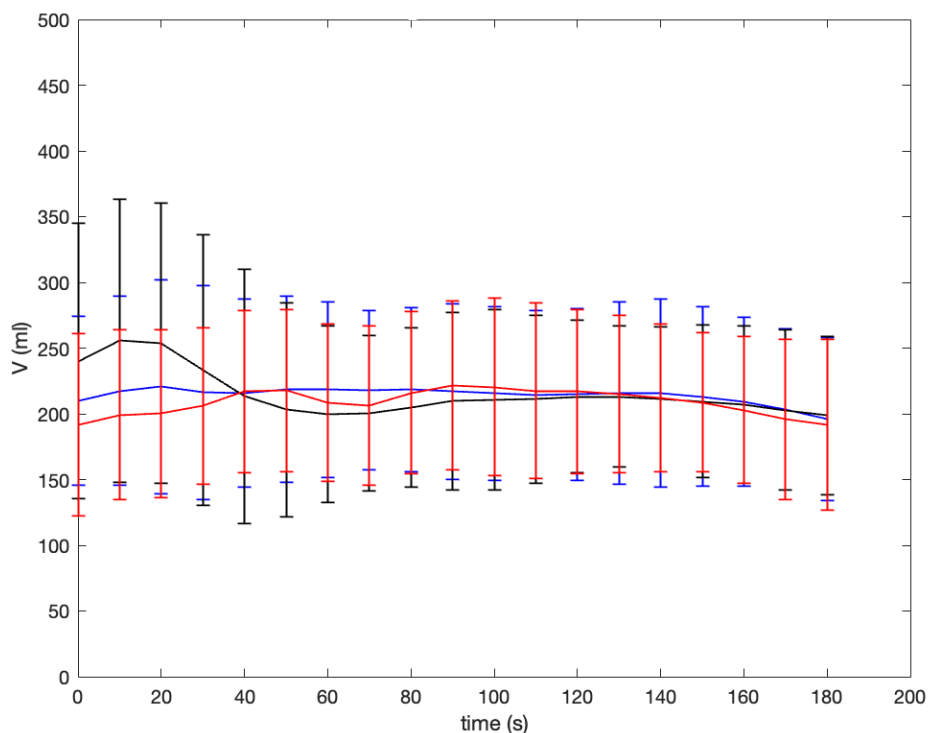
V této kapitole jsou uvedeny grafy, které zobrazují objem  $\text{O}_2$  v dechu v průběhu experimentu. Nejprve jsou uvedeny objemy v nádechu a výdechu, poté minutová ventilace  $\text{O}_2$ .

### 5.4.1 Objem $\text{O}_2$ v nádechu



Graf č. 5.17: Objem  $\text{O}_2$  v nádechu

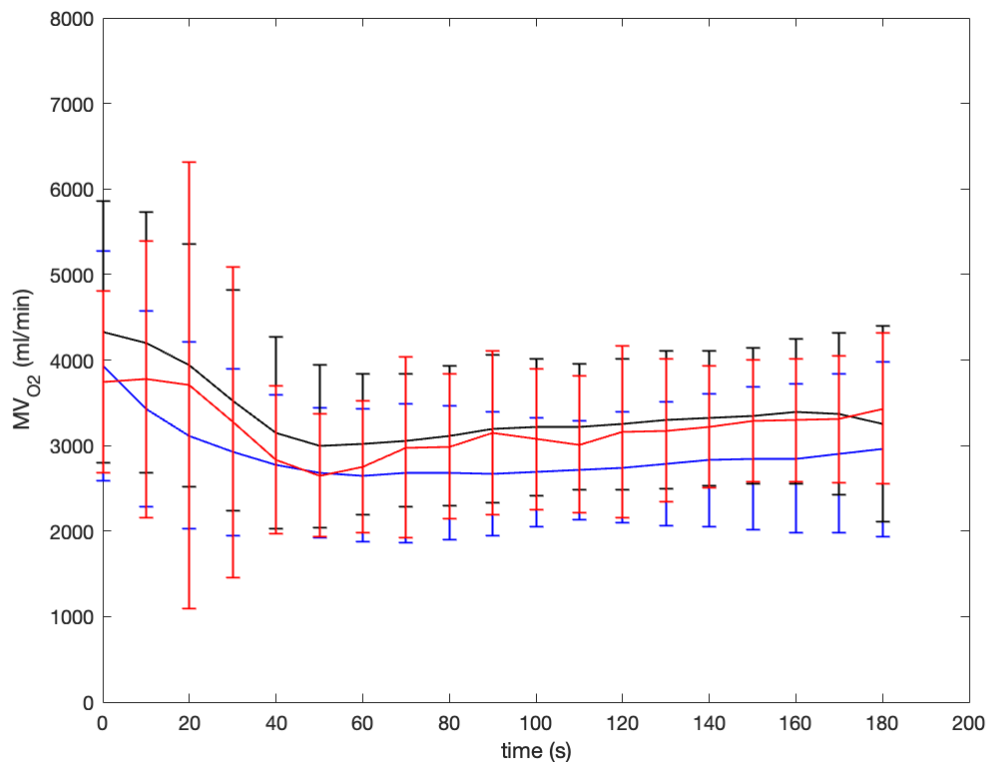
## 5.4.2 Objem O<sub>2</sub> ve výdechu



Graf č. 5.18: Objem O<sub>2</sub> ve výdechu

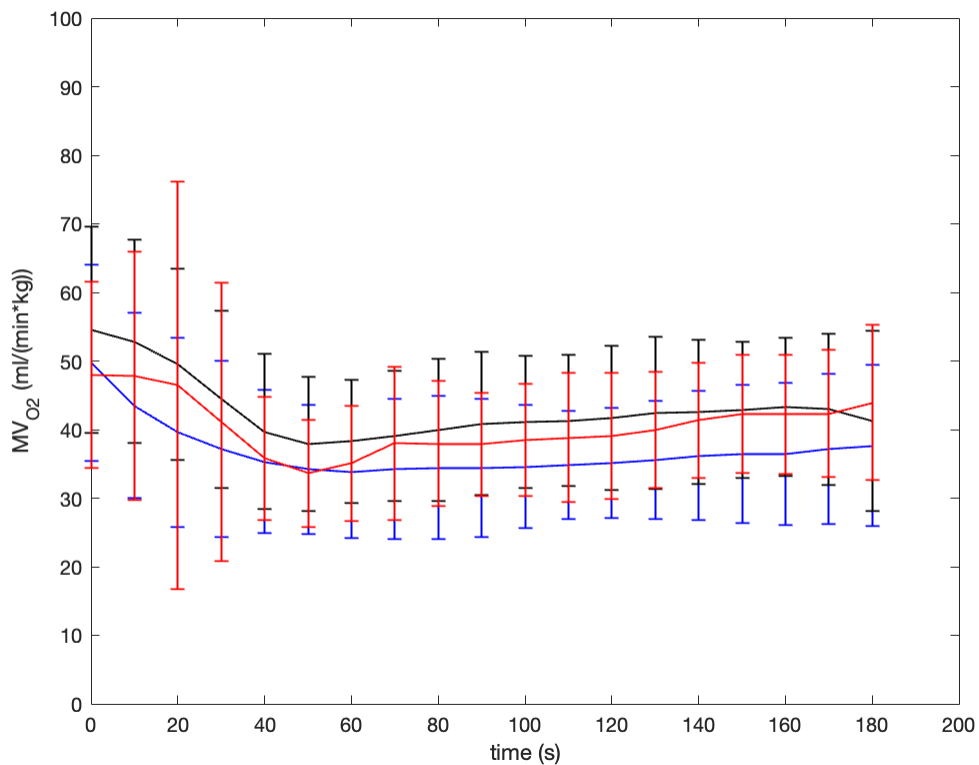
Na uvedených grafech je zřejmé, že inspirované množství O<sub>2</sub> ze začátku nádechu záviselo na objemu celého nádechu. Přibližně po 50 s se začal uplatňovat efekt vzduchové kapsy, kdy bylo množství nadechnutého O<sub>2</sub> větší než při nadechování z plně vysypaného perlitu. Vydechnuté množství O<sub>2</sub> bylo z počátku experimentu větší u kapsy. Přibližně po 50 s od počátku experimentu je trend pro všechny tři fáze podobný, probandi vydechovali přibližně stejné množství O<sub>2</sub> až do ukončení experimentu.

### 5.4.3 Minutová ventilace O<sub>2</sub>



Graf č. 5.19: Minutová ventilace O<sub>2</sub>

### 5.4.4 Minutová ventilace O<sub>2</sub> standardizovaná na hmotnost



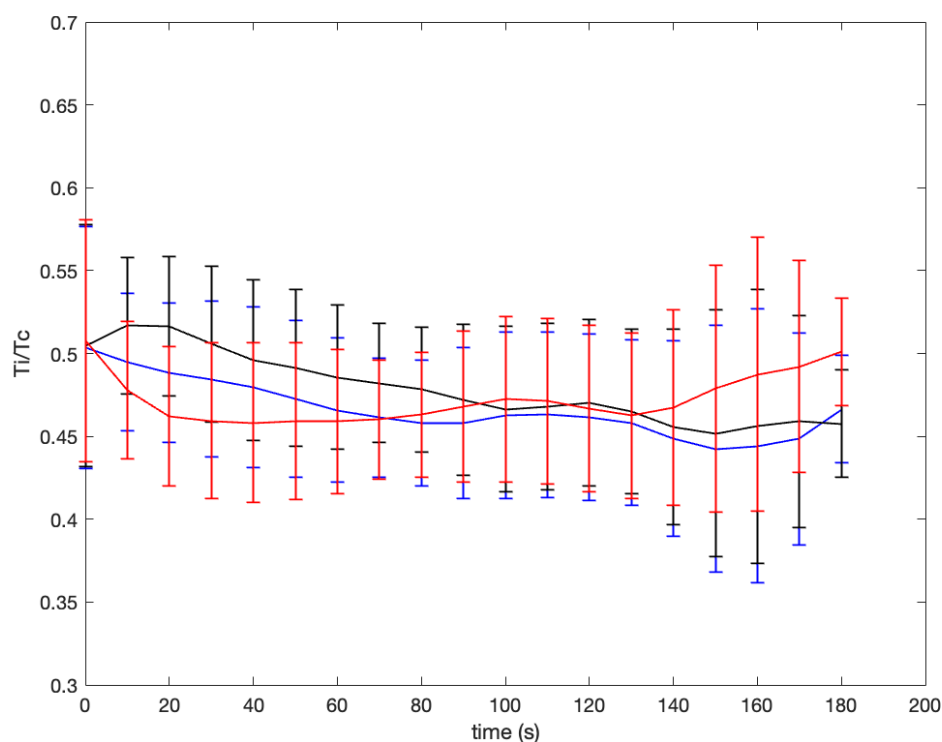
Graf č. 5.20: Minutová ventilace O<sub>2</sub> standardizovaná na hmotnost

Na minutové ventilaci  $O_2$  je možné pozorovat, že vlivem zvýšené frekvence dýchání se probandi dýchající do plně vysypaného perlitu dostali s minutovou ventilací  $O_2$  na podobnou úroveň jako při dýchání do kapsy, ačkoliv objem  $O_2$  v jednotlivých nádechích byl nižší. Zatímco u kapsy s kompenzačním odporem byl vlivem menších dechových objemů a dechové frekvence minutová ventilace  $O_2$  nižší. Trend pro jednotlivé fáze experimentu je z grafů zřejmý, nicméně rozdíly nejsou statisticky významné.

## 5.5 Časové charakteristiky dýchání

Dýchání je také možné charakterizovat pomocí dechové frekvence a poměru doby nádechu k celkové době dechu. Obě charakteristiky jsou zobrazeny na grafu č. 19 a grafu č. 20.

### 5.5.1 Poměr nádechu k celkové době dechu

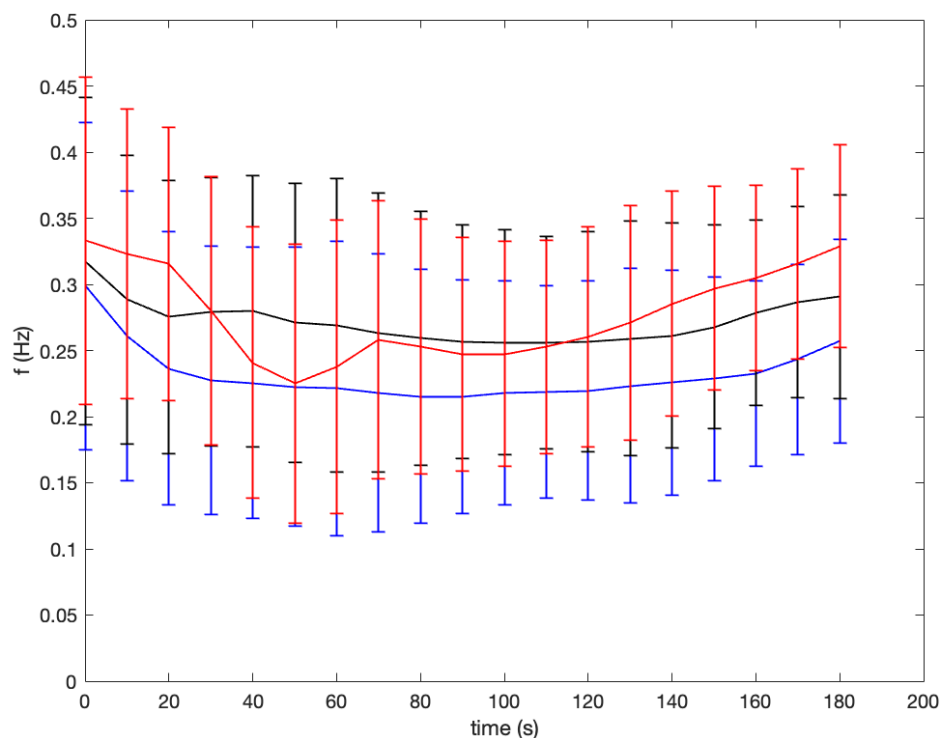


Graf č. 5.21:  $(T_i/T_c)$

Z grafu poměru doby nádechu k celkové době dechu je zřejmé, že v první polovině experimentu probandi měli delší dobu nádechu při nadechování z kapsy. Při nadechování z kapsy s kompenzačním odporem byla vlivem vyšší náročnosti doba nádechu nižší, nejkratší nádechy měli probandi nadechující se ze vzduchové kapsy. K otočení trendu došlo za polovinou doby experimentu, kdy probandi nadechující se z plně vysypaného perlitu začali dělat výrazně delší nádechy než probandi nadechující se z kapsy. Mezi fází A a C nebyl rozdíl od poloviny experimentu výrazný.



## 5.5.2 Dechová frekvence

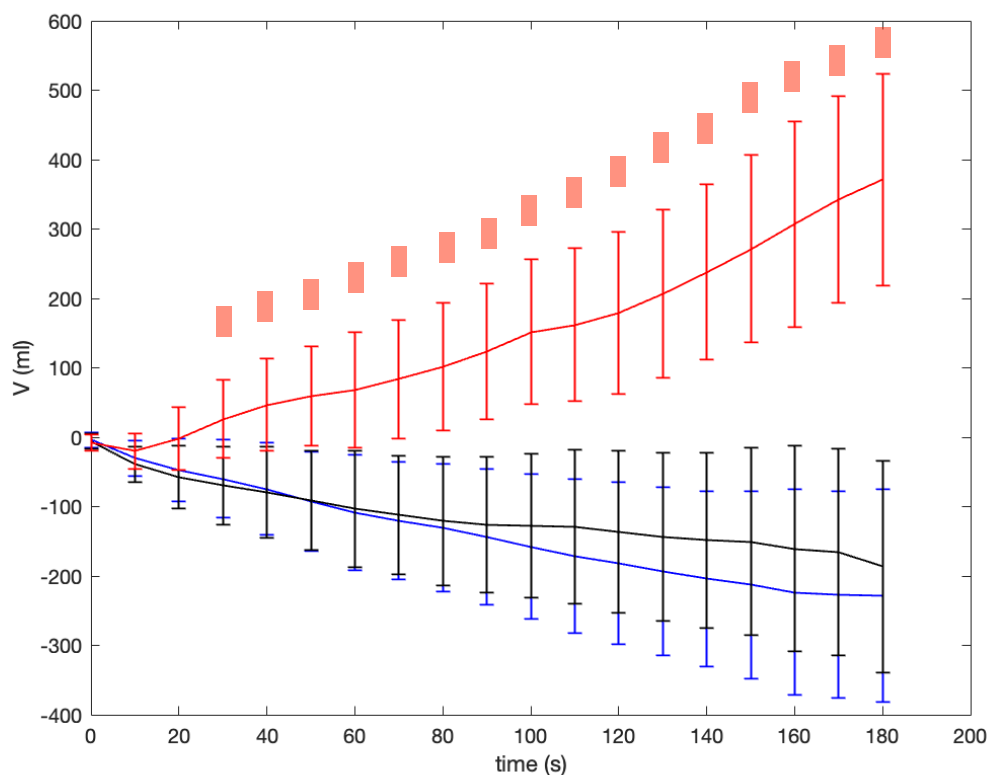


Graf č. 5.22: Dechová frekvence

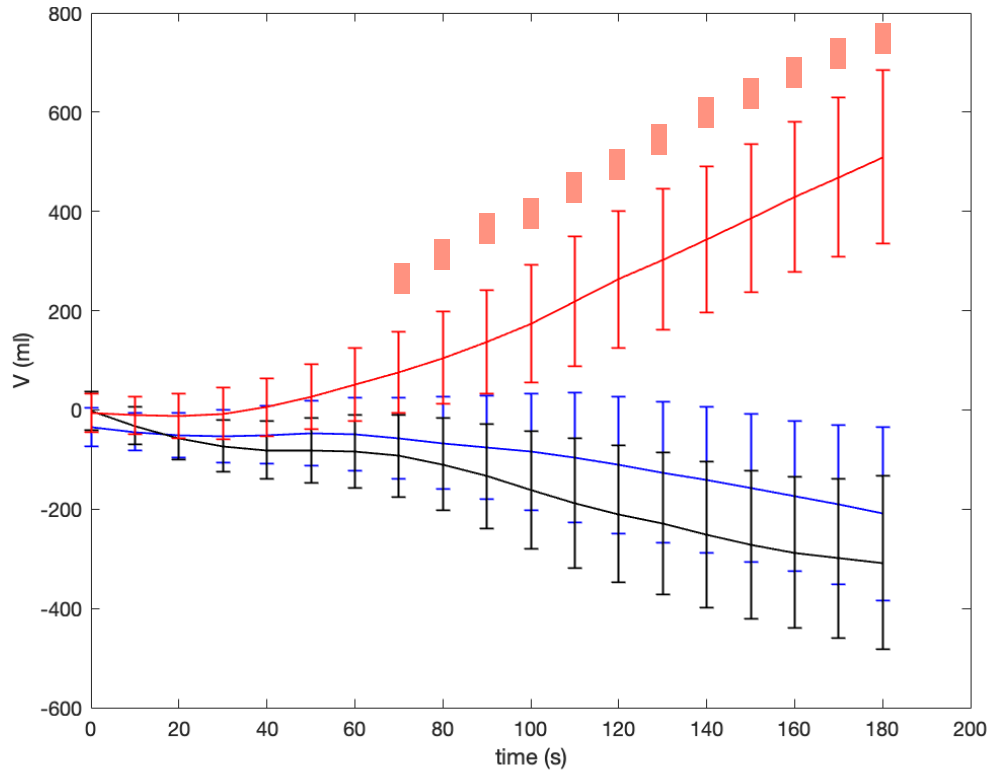
Dechová frekvence byla z počátku nejvyšší u plně vysypaného perlitu. Po dobu 60 s od začátku experimentu významně klesala, pak se trend otočil a začala růst až na úroveň fáze s kapsou, kde se po nějakou dobu držela. Znovu začala růst přibližně po 120 s od začátku experimentu a až do konce experimentu byla nejvyšší. Při dýchání do kapsy (fáze A a C) byl průběh dechové frekvence velmi podobný, ačkoliv při dýchání do kapsy s kompenzačním odporem byla průměrná frekvence výrazně nižší.

## 5.6 Akumulovaný objem CO<sub>2</sub> a O<sub>2</sub>

Pomocí kumulativní funkce bylo vypočítáno množství CO<sub>2</sub>, které proband průběžně vydechl a zůstalo uloženo v kapse a perlitu, zobrazeno na grafu č. 5.23. Množství O<sub>2</sub>, které proband během experimentu spotřeboval je ukázáno na grafu č. 5.24. Hodnoty objemu je nutné brát pouze jako relativní a sledovat pouze vývoj jednotlivých fází vůči sobě navzájem, z důvodu nedokonalé přesnosti záznamového přístroje.



Graf č. 5.23: Průběžné množství CO<sub>2</sub> uložené v perlitu a kapse



**Graf č. 5.24:** Průběžné množství spotřebovaného O<sub>2</sub>

Na obou uvedených grafech je možné sledovat pozitivní vliv vzduchové kapsy na složení plynů v nádechu. Z grafu č. 5.23 s celkovým vydechnutým množstvím CO<sub>2</sub> je patrné, že u plně vysypaného perlitu dochází k větší produkci CO<sub>2</sub> než u vzduchové kapsy. Při pohledu na graf s průběžným množstvím spotřebovaného O<sub>2</sub> je znovu patrný vliv kapsy na množství inspirovaného O<sub>2</sub>. Statisticky významný rozdíl mezi kapsou a plně vysypaným perlitem se začíná projevovat po 70 s od začátku experimentu.

## 6 Diskuse

V této části jsou diskutovány jednotlivé výsledky práce. Nejdříve je zaměřeno na vytvořený program k detekci začátku a konce nádechu, pomocí kterého je možné vypočítat dechové objemy jednotlivých plynů a zobrazit koncentrace plynů v grafech.

Následuje část, která je věnována profilu koncentrace plynů v průběhu dechu. Jsou rozebrány rozdíly v profilu koncentrace  $\text{CO}_2$  a  $\text{O}_2$  v průběhu nádechu i výdechu. A byly porovnány rozdíly mezi dýcháním do plně vysypaného perlitu a dýcháním do vzduchové kapsy.

V další části jsou interpretovány dechové objemy a časové charakteristiky dechu. Zejména množství kyslíku a oxidu uhličitého, které proband vdechnul a vydechnul. Také je možné sledovat změny ve frekvenci dýchání a minutové ventilaci. V poslední podkapitole jsou uvedeny limitace práce.

### 6.1 Program na detekci fáze dechu

Aby bylo možné vypočítat objemy pro jednotlivé nádechy a výdechy, tak bylo nutné vytvořit program, který dokáže identifikovat začátky a konce jednotlivých fází dechu. Program využívá k detekci signál tlaku v dýchacích cestách, protože aktivní nádech začíná až s vytvořením podtlaku v dýchacích cestách, jeví se tak jako spolehlivější než identifikace z průtoku vzduchu. Druhým důvodem bylo, že v signálu průtoku se nacházely artefakty zejména v místech přechodu z výdechu na nádech a měly by za následek chybné detekce začátku jednotlivých fází dechu. Při ztrátě dat průtoku nebo koncentrace bylo navrženo opatření, které detekovalo vadný dech a nahradilo ho přibližnou hodnotou vypočítanou na základě předchozích a následujících dechů. Tento problém se však objevoval zřídka. Při zpracování zaznamenaných dat postačuje do programu napsat jméno souboru s nahranými signály a čas začátku a konce sledované fáze experimentu. Začátek zpracovávaného signálu je lepší volit manuálně z důvodu možných artefaktů v signálu, které byly způsobeny připojováním probanda k měřicí soustavě. Pomocí proměnné je také možné specifikovat pro který z plynů se mají vypočítat objemy. Výsledný program dokáže spolehlivě identifikovat místa změny fáze dechu a vypočítat dechové objemy a časové charakteristiky dýchání. Taktéž je možné pomocí něho zobrazit průběh interpolovaných koncentrací plynů v průběhu nádechů i výdechů.

### 6.2 Profil koncentrace plynu v průběhu dechu

Z prezentovaných grafů č. 5.1 až 5.3 zobrazující inspirovanou frakci  $\text{CO}_2$  je možné vyvozovat, že pokud oběť dýchá do vzduchové kapsy o objemu 2 L, tak v kapse dochází k promíchávání plynů. V druhém případě, když oběť dýchá do plně vysypaného perlitu,

je zřejmé, že oběť vdechuje po celou dobu stejný již vydechutý alveolární plyn. K nasávání čerstvější směsi, tj. plynu o nižší koncentraci  $\text{CO}_2$  a vyšší koncentraci  $\text{O}_2$ , dochází až na konci nádechu, v ten moment se plyn už nedokáže dostat do plic a zůstane v mrtvém prostoru dechové dráhy a dýchacích cest. Oběť tak není schopna využít kvalitnější složení plynů, které nasává z prostředí perlitu.

Zvýšená dechová práce vytvořená pomocí kompenzačního odporu nemá prakticky žádný vliv na složení vdechovaných plynů. Dochází ke stejnému promíchání plynů ve vzduchové kapse jako v případě verze aparatury bez kompenzačního odporu. Ke konci experimentální fáze je koncentrace  $\text{CO}_2$  nižší než při dechové práci u samotné kapsy, ačkoliv byl předpoklad, že vlivem zvýšené práce svalstva dojde k vyšší metabolické přeměně  $\text{O}_2$  na  $\text{CO}_2$ , [12]. Pouze z těchto grafů by se dalo mylně předpokládat, že zvýšený odpor, a s tím související dechová práce nemá vliv na složení inspirovaných plynů. Z tohoto důvodu se přistoupilo ke sledování vdechovaných a vydechovaných objemů jednotlivých plynů. Taktéž byl prozkoumán vliv dechové frekvence a poměru doby nádechu k celkové době dechu.

### 6.3 Profil dýchání

Z výsledných grafů ukazující objem vzduchu, který proband nadechnul je vidět, že z počátku experimentu proband dělá větší nádechy s menší frekvencí v případě vzduchové kapsy. Pokud se do dechové dráhy zařadil odpor, proband dělal menší dechové objemy a s menší dechovou frekvencí. V tomto případě, a v případě s plně vysypaným perlitem, jsou z počátku dechové objemy přibližně stejné, naopak dechová frekvence je mírně vyšší u plně vysypaného perlitu. Tento rozdíl může být způsoben horším složením inspirované směsi hned od počátku experimentu. Ve všech případech dechová frekvence klesá až do doby přibližně 50 až 60 s od začátku experimentu. V tento moment se začal dechový profil měnit. Probandi v případě fáze F zvýšili dechové objemy, byly tak nyní větší než v případě dýchání do kapsy a postupně začali i zvyšovat dechovou frekvenci. Docházelo tak k navýšení minutové ventilace. Dechové objemy se nadále zvyšovaly, největších objemů dosahovali probandi při dýchání do plně vysypaného perlitu. Po dalších 20 s se začaly zvětšovat dechové objemy i u vzduchové kapsy. Pravděpodobně se tak začaly uplatňovat dva mechanismy. Probandi se snažili vyšší množství  $\text{CO}_2$  v inspirovaném dechu kompenzovat zvýšením dechových objemů ale i zvýšením dechové frekvence. Naopak v případě fáze se vzduchovou kapsou a kompenzačním odporem probandi vlivem vyšší náročnosti dýchání dělali menší dechové objemy o nižší frekvenci. Jednak se mohli snažit zmenšit dechovou práci, a zároveň nebyli nuceni vyšším množstvím  $\text{CO}_2$  jako u fáze F objemy i frekvenci měnit. Lze z toho tedy vyvodit, že zvýšením dechového odporu tělo šetřilo energii snížením minutové ventilace. Naopak při vysokých koncentracích  $\text{CO}_2$  v nádechu tělo upřednostňovalo zvýšení minutové ventilace a upozadřovalo reakci na zvýšený odpor v dýchacích cestách.

Vdechnuté množství  $\text{CO}_2$  bylo z počátku experimentu přibližně stejné u všech fází. Pouze u kapsy s kompenzací bylo množství menší z důvodu menších dechových objemů. Ke změně začalo docházet po 30 až 40 s od začátku experimentu, kdy se začal projevovat efekt kapsy, proband vlivem menších dechových objemů a lepším složením směsi vdechoval menší množství  $\text{CO}_2$ . Totéž platilo i u fáze C, kdy s menšími celkovými objemy nádechu vdechnul i menší objemy  $\text{CO}_2$ . Lze tedy znovu sledovat, že proband upřednostňoval snahou zvýšením minutové ventilace odventilovat  $\text{CO}_2$  z těla a u toho upozaďoval zvýšenou dechovou náročnost.

Množství  $\text{CO}_2$ , které probandi vydechovali bylo přibližně stejné (statisticky nevýznamné) u všech fází a po celou dobu experimentu. Naopak množství inspirovaného  $\text{CO}_2$  bylo větší u plně vysypaného perlitu oproti vzduchové kapse. Vydechnuté  $\text{CO}_2$  zůstávalo v těsné blízkosti dýchacích cest, nemohlo se nikde promíchat s kvalitnějším vzduchem. Docházelo tak tomu, že probandi vdechovali již větší množství  $\text{CO}_2$  které předtím vydechnuli. Do těla probandů se tak dostávalo větší množství  $\text{CO}_2$  a probandi se stávali více a více hyperkapničtí a s tím souvisí znatelný pokles  $SpO_2$  jak je vidět na grafu č. 2.1.

Z křivek vdechnutých objemů  $\text{O}_2$  je vidět efekt vzduchové kapsy ihned po začátku experimentu. Kdy kapsa jednak obsahovala větší množství kyslíku než plně vysypaný perlit. Zároveň díky menšímu dechovému odporu umožňovala nadechovat větší objemy vzduchu včetně kyslíku. Tyto větší vdechnuté objemy měli za následek, že ne všechen kyslík se využil, protože zůstával v mrtvém prostoru dýchacích cest. U  $\text{O}_2$  se objevil stejný efekt jako u  $\text{CO}_2$ , kdy přibližně po 50 s se začali snižovat dechové objemy kyslíku. Tento trend pokračoval v menší míře až do ukončení experimentu. Pokles množství  $\text{O}_2$  byl způsoben metabolickou přeměnou v těle. Probandi s každým dechem vydechovali i nadechovali menší a menší množství  $\text{O}_2$ . Při porovnání kapsy a plně vysypaného perlitu bylo vidět, že množství, které proband vydechnul bylo ve všech případech stejné, ale množství, které nadechne bylo větší u fáze s kapsou. Je tak možné sledovat pozitivní vliv kapsy na složení vdechované směsi plynů. Nedostatek kyslíku a přebytek  $\text{CO}_2$  se tělo snažilo kompenzovat zvýšením minutové ventilace. Dokázalo se tak přiblížit u plně vysypaného perlitu k podobné minutové ventilaci  $\text{O}_2$  jako u kapsy bez kompenzačního odporu.

Na grafech frekvence dýchání a poměru doby nádechu k celkové době dechu je vidět efekt většího množství  $\text{CO}_2$  v nádechu již krátce po začátku experimentu. Z toho je možné vyvodit, že efekt vzduchové kapsy se uplatňoval ihned po zavalení simulovanou lavinou. Převládala tak snaha odventilovat  $\text{CO}_2$  zvýšením dechové frekvence i objemů. Zvýšením ventilace se začalo produkovat větší množství  $\text{CO}_2$  které se v případě fáze F usadilo těsně před dýchacími cestami a bylo s dalším nádechem inspirováno. Ačkoliv vlivem velké směrodatné odchylky nebyly rozdíly mezi fázemi statisticky významné, trend změny je možné pozorovat.

Lze tedy vyvodit, že tělo upravovalo dechové objemy a frekvenci podle množství  $\text{CO}_2$ , které se nacházelo v těle a bylo nadechováno. Potvrzuje to předpoklad, že vliv na dechový profil při extrémních podmínkách mají  $\text{CO}_2$  receptory a vnitřní mechanismy organismu, které řídí dechovou frekvenci a dechové objemy.

Jak v klidu, tak při fyzické aktivitě, tělo volí frekvenci blízkou té, která vyžaduje minimální práci. Tendence zvýšené ventilace snižovat alveolární  $\text{CO}_2$  je kompenzována zvýšenou metabolickou produkcí  $\text{CO}_2$  dýchacími svaly [23]. V případě fáze F se probandi snažili od ventilovat vysoké množství vdechnutého  $\text{CO}_2$  zvýšením minutové ventilace, což mělo za následek ještě větší produkci  $\text{CO}_2$  a další zhoršování stavu probandů.

Patrný efekt vzduchové kapsy je možné pozorovat také na grafech s průběžným množstvím vydechnutého  $\text{CO}_2$  a spotřebovaného  $\text{O}_2$ . Vlivem zvýšené dechové práce způsobené zvýšenou minutovou ventilací a částečně práce k překonání odporu perlitu probandi produkovali větší množství  $\text{CO}_2$  než při dýchání do kapsy. Zároveň ze stejného důvodu spotřebovali větší množství  $\text{O}_2$ . Je taktéž je možné pozorovat zvýšenou spotřebu  $\text{O}_2$  u kapsy s kompenzačním odporem oproti samotné kapse. Pro vydechnuté množství  $\text{CO}_2$  je však efekt opačný. Což by mohlo být způsobené nižší minutovou ventilací, kdy dojde vlivem vyšší dechové práce k vyšší spotřebě  $\text{O}_2$ , ale tělo už nedokáže takové množství  $\text{CO}_2$  odventilovat. Jak již bylo zmíněno, tyto dva grafy je však nutné brát s rezervou z důvodu nedokonalé přesnosti měřící soustavy.

Ke statisticky významným rozdílům u vdechovaných a vydechovaných objemů plynů nedošlo pravděpodobně vlivem demografických parametrů probandů. Statisticky významný rozdíl se objevil až u minutové ventilace vzduchu a minutové ventilace  $\text{CO}_2$ . Kdy se rozdíl mezi plně vysypaným perlitem a kapsou s kompenzačním odporem začal projevovat přibližně po minutě od začátku experimentu.

V současné době se sleduje využití regionální mozkové oxygenace pomocí metody NIRS za účelem sledování stavu oxygenace v centrálním oběhu, na rozdíl od hodnoty  $SpO_2$ , která ukazuje oxygenaci periferních částí těla. Předpokládá se, že za extrémních podmínek dojde k úpravě cirkulace krve v krevním řečišti za účelem udržet životně důležité orgány co nejlépe oxygenované. Z parametru  $SpO_2$  tak nemusí být patrný celkový pohled na aktuální stav oběti zavalení. Při ventilační insuficienci nastává náhlý pokles okysličené krve v periférii, což ukazuje parametr  $SpO_2$ , ačkoliv data z regionální oxygenace ukazují, že je mozek stále dostatečně zásoben okysličenou krví a reaguje na náhlý přísun kyslíku daleko rychleji než parametr  $SpO_2$  [24].

V průběhu experimentu byl měřen i parametr regionální oxygenace, nebyl však zvolen k vyhodnocení z důvodu vysoké míry artefaktů a problémovému umístění na těle probandů.

## 6.4 Limitace práce

Limitace práce by mohly být v nemožnosti porovnávat absolutní hodnoty pro vdechnutý a vydechnutý objem plynů vůči sobě. Kdy ve všech případech byly objemy nádechů větší než objemy výdechů. Tato skutečnost pravděpodobně vychází z použití vysokoprůtokové clonky D-Lite, která nedokázala správně zaznamenat vysoké průtoky v průběhu výdechu. Hodnoty pro výdechy tak byly o něco nižší, než by měly být. Ačkoliv tento problém se neměl objevit, protože HF D-Lite clonka byla ověřována jednak v bakalářské práci [21], tak i v rámci této studie. Podílet by se na tom mohla skutečnost nedokonalé linearity korekčního koeficientu při všech velikostech průtoku. Tato nelinearita nemá z pohledu porovnávání jednotlivých fází vůči sobě vliv, protože k tomu docházelo pravděpodobně ve všech chvílích experimentu. Z toho důvodu grafy č. 5.23 a č. 5.24 ukazují pouze relativní srovnání fází a nelze brát hodnoty jako absolutní.

Vytvořený program k detekci jednotlivých fází dechu a výpočtu dechových objemů založený na sledování změny tlaku funguje spolehlivě pro různé vysoké tlaky i průtoky. V ojedinělých případech došlo k náhlému výpadku v záznamu průtoku a koncentrace v průběhu jedné z fází dechu. Z toho důvodu byl navrhnout kompenzační mechanismus, kdy program nahradil poškozené dechy průměrem z přechozího a následujícího. Pokud se však signál přerušil pouze o dobu kratší jak 1/3 celkové doby dechu, dech zůstal zachován a mohl způsobit mírné zvýšení hodnoty směrodatné odchylky v daném místě. Aby se této skutečnosti předešlo, byla součástí zpracování dat i vizuální kontrola nahraných dat a množství artefaktů. Z celkového pohledu na počty dechů nebylo množství artefaktů v záznamech nijak významné. Artefakt se zpravidla objevil maximálně pro dva dechy v jednom záznamu a ani ne u všech probandů. Pokud by byl některý ze záznamů významně zatížen, došlo by k jeho celkovému vyřazení ze studie. V případě dalších výzkumů souvisejících se simulovaným zavalením osob doporučuji zvolit výkonnější a spolehlivější přístroj k zaznamenávání dat.

Dalším faktorem, který by mohl ovlivňovat výsledky je měřicí segment dechové dráhy probanda. Vlivem zapojení jednotlivých dílů dráhy vzniknul mrtvý prostor navyšující pomyslnou vzduchovou kapsu. Jednalo se o objem okolo 120 ml, což odpovídalo 6 % objemu vzduchové kapsy.

Výsledky testové statistiky a velikost směrodatné odchylky při měření výrazně ovlivnilo demografické složení probandů. Studie se zúčastnilo široké spektrum osob s různou fyzickou zdatností a proporcemi. Lepších parametrů dosahovali jedinci, kteří v průběhu rozhovoru na konci experimentu uvedli, že aktivně plavou, hrají na dechový nástroj nebo sportují. Nabízí se tak otázka, zdali by nedošlo k dosažení konzistentnější a statisticky významnějších výsledků při výběru probandů s podobnými fyzickými predispozicemi. Pravděpodobně by tak bylo možné lépe sledovat rozdíly mezi jednotlivými fázemi.



Současně je možné konstatovat, že simulovaná zavalení lavinou pravděpodobně spolehlivě demonstrují fyziologické reakce, které se vyskytují během skutečného zasypání lavinou. Výsledná data jsou odvozena z řízeného experimentálního uspořádání, které v sobě nezahrnuje fyziologické účinky traumatu, boj se zavalením a vylučuje udušení z mechanického stlačení hrudníku. Taktéž nedokáže simulovat obstrukce dýchacích cest a nepohodlné umístění. I přes zjevná omezení výsledky umožňují extrapolaci našich zjištění jako nejbližší aproximaci, ze které lze vyvodit závěry pro reálná zavalení obětí lavinou.

## 7 Závěr

V rámci této práce byla vytvořena studie pro sledování dýchání oběti zavalené simulovanou lavinou a posuzován význam vzduchové kapsy na výměnu plynů. Studie se skládala z návrhu experimentu, jeho realizace a vyhodnocení výsledků. V rámci experimentu bylo provedeno pilotní měření na dobrovolnících. Experimentu se zúčastnilo celkem 13 probandů, kdy každý z nich podstoupil 3 měření. V jednom případě probandi dýchali do vzduchové kapsy o objemu 2 L vytvořené v simulované lavině vyrobené z perlitu. V druhém případě probandi dýchali také do vzduchové kapsy, ale do dýchací dráhy byl přidán kompenzační odpor. V posledním případě probandi dýchali do plně vysypaného perlitu bez přítomnosti vzduchové kapsy.

U probandů byly zaznamenávány signály tlaku a průtoku v dýchacích cestách. Taktéž byl monitorován tlak  $SpO_2$  a srdeční frekvence. Zaznamenané signály byly digitálně předzpracovány a poté zpracovány do výsledných grafů pro studium parametrů dýchání za rozdílných podmínek. Bylo tak možné zjistit rozdíly ve složení vdechované a vydechované směsi plynů, dechové objemy a časové charakteristiky pro tři rozdílné fáze. Došlo k prozkoumání významu vzduchové kapsy a vlivu zvýšené dechové práce na složení plynů.

Závěrem lze říct, že kapsa měla znatelný vliv na složení vdechnuté směsi plynů. Profil koncentrace  $CO_2$  a  $O_2$  byl u kapsy po celou dobu velmi podobný, naproti tomu při dýchání do plně vysypaného perlitu probandi nejdříve nadechovali již vydechnuté plyny a lepší složení se dostávalo až ke konci nádechu. Potvrzuje to tak předpoklad, že v kapse dochází k promíchávání plynů a dokáže poskytnou lepší složení. V případě, kdy není přítomná vzduchová kapsa, proband se snažil  $CO_2$  odventilovat zvýšením frekvence dýchání a zvětšením dechových objemů. Což mělo za následek ještě větší produkci  $CO_2$ . Zvýšením minutové ventilace se však probandům povedlo získat z plně vysypaného perlitu podobné množství  $O_2$  jako z kapsy, vedlo to však k výrazně větší spotřebě  $O_2$  než u kapsy. Umělým navýšením odporu v dýchacích cestách probandi dělali menší objemy nádechů s menší frekvencí než u samotné vzduchové kapsy, což mělo za následek snížení minutové ventilace obou plynů. Do těla bylo přiváděno menší množství  $O_2$  i  $CO_2$  a z těla bylo i menší množství odventilováno. Což by mohlo mít vliv na strmější pokles  $SpO_2$  než u samotné kapsy.

Během experimentu se u probandů objevily fyziologické mechanismy, které řídily dechový profil, zejména reagovaly na změnu množství vdechnutého  $CO_2$  a podle toho měnily minutovou ventilaci. Bližší prozkoumání těchto mechanismů by mohlo být námětem pro další výzkum na tomto poli.

## Seznam použité literatury

- [1] FALK, Markus, Hermann BRUGGER a Liselotte ADLER-KASTNER. *Avalanche survival chances*. Nature [online]. 1994, 368(6466), 21-21 [cit. 2021-6-25]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/368021a0
- [2] BOYD, Jeff , HAEGELI, Pascal, ABU-LABAN Riyad, SHUSTER, Michael, BUTT, John. *Patterns of death among avalanche fatalities: a 21-year review*. Canadian Medical Association Journal 2009; 180:5: 507–512. doi: 10.1503/cmaj.081327 PMID: 19213801
- [3] HOHLRIEDER, Matthias, BRUGGER, Hermann, SCHUBERT, Heinrich, PAVLIC, Marion, ELLERTON, John, MAIR, Peter. *Pattern and severity of injury in avalanche victims*. High Altitude Medicine & Biology 2007; 8:1: 56–61
- [4] PROCTER, Emily, et al. *Burial duration, depth and air pocket explain avalanche survival patterns in Austria and Switzerland*. Resuscitation, 2016, 105: 173-176.
- [5] GRISSOM, Colin K., et al. *Hypercapnia increases core temperature cooling rate during snow burial*. Journal of Applied Physiology, 2004, 96.4: 1365-1370.
- [6] BRUGGER H, SUMANN G, MEISTER R, ADLER-KASTNER L, MAIR P, GUNGA HC. *Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in the snow: implications for avalanche survival*. Resuscitation 2003; 58: 81–88
- [7] ZARINS, Christopher K.; SKINNER, David B. *Circulation in profound hypothermia*. Journal of Surgical Research, 1973, 14.2: 97-104.
- [8] WAGNER, James A .; MATSUSHITA, K .; HORVATH, Steven M. *Effects of carbon dioxide inhalation on physiological responses to cold*. Aviation, space, and environmental medicine, 1983, 54.12 Pt 1: 1074-1079.
- [9] GRISSOM, Colin K., et al. *Respiration during snow burial using an artificial air pocket*. Jama, 2000, 283.17: 2266-2271.
- [10] MILIC-EMILI, Joseph, et al. (ed.). *Basics of respiratory mechanics and artificial ventilation*. Springer Science & Business Media, 2012
- [11] RADWIN, Martin I .; KEYES, Lany; RADWIN, Donna L. *Avalanche air space physiology*. In: Proceedings International Snow Science Workshop. 1998. p. 296.
- [12] Roubík K, Sieger L, Sykora K (2015) *Work of Breathing into Snow in the Presence versus Absence of an Artificial Air Pocket Affects Hypoxia and Hypercapnia of a Victim Covered with Avalanche Snow: A Randomized Double Blind Crossover Study*. PLoS ONE 10(12): e0144332. doi:10.1371/journal.pone.0144332

- [13] RADWIN, Martin I., et al. *Normal oxygenation and ventilation during snow burial by the exclusion of exhaled carbon dioxide*. *Wilderness & Environmental Medicine*, 2001, 12.4: 256-262.
- [14] STRAPAZZON, Giacomo, et al. *Effects of snow properties on humans breathing into an artificial air pocket—an experimental field study*. *Scientific reports*, 2017, 7.1: 1-12
- [15] NĚMEC, Štěpán. *Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí*. [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-05-05], 62. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/98053>
- [16] MCCLUNG, D. & SCHAEERER, P. *The Avalanche Handbook 3rd ed.* (The Mountaineer books, 2006).
- [17] HORAKOVA, L., SYKORA, K., SIEGER, L. & ROUBIK, K. *Breathing Experiments into the Simulated Avalanche Snow: Medical and Technical Issues of the Outdoor Breathing Trials*. In *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2018: Volume 68/1* (ed. Lhotska, L., Sukupova, L., Lackovic, I. & Ibbott, G. S.), 711–717 (Springer Singapore, 2019).
- [18] BRUGGER, H. et al. *Terra Xcube: A new hi-tech training facility for EMS teams*. *Resuscitation* 130, e79 (2018).
- [19] Roubik, K., Walzel, S., Horakova, L., Refalo, A., Sykora, K., Ort, V., Sieger, L. *Materials suitable to simulate snow during breathing experiments for avalanche survival research*. *Clinician and Technology*, Vol. 50, No. 1 (2020), pp. 32-39. DOI: <https://doi.org/10.14311/CTJ.2020.1.05>
- [20] ROUBIK, Karel, Karel SYKORA, Ladislav SIEGER, Vaclav ORT, Lenka HORAKOVA a Simon WALZEL. *Perlite is a suitable model material for experiments investigating breathing in high density snow*. *Scientific Reports* [online]. 2022, 12(1) [cit. 2022-04-07]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: [doi:10.1038/s41598-022-06015-y](https://doi.org/10.1038/s41598-022-06015-y)
- [21] BÍŠ, Ladislav. *Design of a high-flow orifice for ventilation experiments*. 2020. Bachelor's Thesis. Czech Technical University in Prague. Computing and information center.
- [22] BIANCHI, Giovanni a Roberto SORRENTINO. *Electronic filter simulation & design*. New York: McGraw-Hill, 2007. ISBN 978-0-07-149467-0.
- [23] OTIS, Arthur. *The work of breathing*. *Physiol Rev.* 1954 Jul;34(3):449-58. doi: 10.1152/physrev.1954.34.3.449. PMID: 13185751.
- [24] STRAPAZZON, Giacomo, et al. *Hypoxia and hypercapnia effects on cerebral oxygen saturation in avalanche burial: A pilot human experimental study*. *Resuscitation*, 2021, 158: 175-182.

# Příloha A: Žádost pro etickou komisi



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
Fakulta biomedicínského inženýrství  
nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno

## Žádost o projednání výzkumného projektu v etické komisi FBMI ČVUT *Application for approval of a research project by FBMI CTU Institutional Ethical/Review Board*

Název projektu: Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí  
Name of the project: Work of Breathing under extreme hypercapnia induced by ventilation insufficiency

Hlavní řešitel projektu (Jméno, pracoviště, e-mail): Bc. Štěpán Němec, ČVUT FBMI, nemecst3@fbmi.cvut.cz


**Stručný popis projektu:** Cílem výzkumu je srovnání a vyhodnocení rychlosti stavu hyperkapnie probanda dýchajícího do modelu sněhu ve 3 rozdílných stavech, a to: při absenci vzduchové kapsy, se vzduchovou kapsou a se vzduchovou kapsou připojenou k průtočnému odporu. Cílem je prokázat, že stav hypoxie nastávající u zavalených osob je funkcí průtočného odporu dechové dráhy, a nikoliv objemu vzduchu v dechové dráze zavaleného. **Zajištění bezpečnosti:** Experiment bude realizován s pomocí patientského monitoru DATEX Ohmeda, dalších nezávislých měřičů EtCO<sub>2</sub>. S probandem bude probíhat komunikace. Měření bude ukončeno v okamžiku, pokud: a) proband se odpojí či požádá o ukončení, b) nebude reagovat správným způsobem na testovací podněty c) některé z měřených parametrů dosáhnou stanovených kritických hodnot, nebo d) na příkaz anesteziologa či zkoušejícího trvale sledujícího stav probanda. **K bezpečnostním opatřením patří:** přítomnost lékaře, měření parametru SpO<sub>2</sub>, EtCO<sub>2</sub>, EKG dýchání přes antimikrobiální filtr. Účast ve studii je dobrovolná. Výsledky ani osobní data nebudou zneužity, veškeré nakládání s osobními daty bude podléhat GDPR.

Charakter projektu: Diplomová práce

Seznam příkládaných dokumentů:

- sylabus projektu
- informovaný souhlas

V Kladně dne 20. 2. 2021

  
podpis hlavního řešitele

## Vyjádření souhlasu etické komise FBMI ČVUT *FBMI CTU Institutional Ethical/Review Board approval*

Projekt byl schválen etickou komisí FBMI ČVUT dne: 10. 2. 2021 platný do: 6/2021  
pod číslem: 04/2021

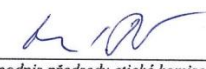
Etická komise FBMI ČVUT v Praze, ve složení Mgr. Martina Šliková (předsedkyně), RNDr. Táňa Jarošíková, CSc., MUDr. Radek Matlach, Ing. Lucie Škorňáková a Ing. Petr Kudrna, Ph.D., zhodnotila předložený projekt a neshledala žádné rozpory s platnými zásadami, předpisy a mezinárodními směrnicemi pro provádění biomedicínského výzkumu zahrnujícího lidské účastníky nebo laboratorní zvířata.

Řešitel projektu splnil podmínky nutné k získání souhlasu etické komise.

V Kladně dne

10. 2. 2021

ETICKÁ KOMISE  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta biomedicínského inženýrství  
razítko etické komise FBMI ČVUT  
272 01 Kladno

  
podpis předsedy etické komise

ČVUT v Praze  
Fakulta biomedicínského inženýrství  
nám. Sítná 3105  
272 01 Kladno

tel.: (+420) 224 358 419  
fax: (+420) 312 608 204  
www.fbmi.cvut.cz

IČ: 68407700  
DIČ: CZ68407700  
Bankovní spojení: KB Praha 6  
č.ú. 27-7380010287/0100

## Příloha B: Syllabus výzkumného projektu

A: Základní údaje o výzkumném projektu:	
<p>Název projektu: Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí</p> <p>Název anglicky: Work of Breathing under extreme hypercapnia induced by ventilation insufficiency</p>	
Typ studie:	<input checked="" type="checkbox"/> intervenční <input type="checkbox"/> observační
	<input checked="" type="checkbox"/> prospektivní <input type="checkbox"/> retrospektivní
Půjde o práci:	<input checked="" type="checkbox"/> s osobami <input type="checkbox"/> s laboratorními zvířaty
<p>Cíl projektu, testovaná hypotéza:</p> <p>Cílem výzkumu je srovnání a vyhodnocení rychlosti stavu hyperkapnie probanda dýchajícího do modelu sněhu ve 3 rozdílných stavech, a to: při absenci vzduchové kapsy, se vzduchovou kapsou a se vzduchovou kapsou připojenou k průtočnému odporu odpovídající stavu bez vzduchové kapsy. Testovanou hypotézou je prokázání vlivu parametru odporu dechové dráhy na rychlosti hyperkapnie při zavalení sněhem.</p> <p>Přínos projektu v technické, diagnostické, léčebné oblasti, pro lékařské poznání nebo individuální subjekt hodnocení:</p> <p>Přínosem diplomové práce bude prokázání, že stav hypoxie nastávající u zavalených osob je také funkcí průtočného odporu dechové dráhy, a nikoliv jen objemu vzduchu v dechové dráze zavaleného.</p>	
B: Charakteristika souboru subjektů (osob) klinického hodnocení:	
Počet: 11-16	Věková struktura: 19–30 let
Pohlaví: M–Ž	Charakteristika skupiny: dobrovolníci budou studenti FBMI ČVUT

Odměna za účast: 0	Jiné: žádné
Doba trvání celého projektu (datum od-do): 10. 1. 2021 – 20. 5. 2021	Doba trvání pro jeden subjekt hodnocení při jednom měření: max. 15 min čistého času pro přípravu a vlastní experiment (pro 3 sady měření tedy 45 min.)
<p>Popis nakládání se subjekty, popis intervence, odebírání vzorků apod.:</p> <p>Po předložení negativního antigenního testu (maximálně 3 dny starý) budou probandi poučeni o bezpečnosti při měření, poté seznámeni s problematikou přežití pod lavinou včetně rizika hyperkapnie a hypoxemie, které u zavalených nastávají. Probandi budou také seznámeni s měřicí aparaturou a průběhem měření. Následovat bude podepsání informovaného souhlasu a vstupní spirometrické vyšetření lékařem.</p> <p>Po poučení a přípravě aparatury bude každý proband dýchat před hlavním měřením skrz odporovou řadu průtočných odporů (od zúžení 12 mm až do zúžení na 3 mm, doba záznamu bude 30 s) pro získání dat pro případnou úpravu odporů hlavním měřicí aparatury. Následovat bude dýchání do mokrého perlitu o definovaném objemu 54 l po dobu 240 sekund. Po prvním měření dojde k provzdušnění perlitu opětovným přesypáním z důvodu eliminace zadržného oxidu uhličitého a distanční pauze o délce minimálně 20 hodin. Při druhém měření bude opět proband dýchat do mokrého perlitu, ale tentokrát se vzduchovou kapsou o objemu 2 l a průtočným odporem. Po druhém měření bude opět následovat provzdušnění perlitu a pauza. Při třetím měření bude proband dýchat pouze do mokrého perlitu se vzduchovou kapsou bez kompenzace průtočným odporem. Proband nebude informován, zda dýchá jen do perlitu nebo perlitu se vzduchovou kapsou. V rámci experimentu nebude proband nijak zasypán. Proband bude připojen ke konstrukci obsahující model sněhu – mokrý perlit. V ústech bude mít antimikrobiální náustek s filtrem, který bude připojen ke zbytku měřicí aparatury obsahující clonu D-Lite pro sběr dat napojenou na monitor vitálních funkcí Datex-Ohmeda S/5 Patient Monitor, průtočný odpor (případně bezodporový člen) a kužel vyplněný mokrým perlitem (s případnou vzduchovou kapsou). Parametr EtCO<sub>2</sub> bude navíc měřen několika dalšími sidestream kapnometry díky kolaboraci s prací MUDr. Lenky Horákové. S rostoucím časem bude dýchání pro probanda stále obtížnější z důvodu nárůstu exspirovaného CO<sub>2</sub> v modelu sněhu.</p> <p>Vylučovacím kritériem pro probanda je absence negativního antigenního testu na SARS-CoV-2, jakákoliv anamnéza závažného chronického onemocnění oběhové nebo respirační soustavy, akutní onemocnění dýchací soustavy, těhotenství nebo Tiffeneauův index menší než 0,7 při vstupním vyšetření.</p>	

Liší se projekt od standardního postupu v denní praxi:  ANO  NE

V případě, že ano, popište rozdíly:

Jedná se o uměle připravenou experimentální situaci detailně popsanou výše.

Možná rizika, nesnáze a obtíže pro subjekt hodnocení (včetně etických):

Vlivem sestavené měřicí aparatury v rámci hlavního měření bude proband nucen zvýšit své dechové úsilí, což povede ke změně hladiny krevních plynů mimo běžné fyziologické rozsahy. Pro minimalizaci těchto rizik a zamezení dosažení nebezpečných hodnot krevních plynů jsou zavedena opatření popsaná v následujícím odstavci. Při měření dýchání skrz odporovou řadu se za 30 sekund dýchání nenavodí stav ventilační tísně.

Jak je zajištěna bezpečnost testovaného subjektu:

Měřicí aparatura je na vstupu vybavena jednorázovým antimikrobiálním filtrem pro odstranění nečistot z inspirovaného i exspirovaného vzduchu. Probandovi bude neustále měřen parciální tlak oxidu uhličitého ve vydechovaném vzduchu, saturace periferní krve kyslíkem, EKG, tepová frekvence. Monitor vitálních funkcí i kapnometry budou napájeny z galvanicky odděleného zdroje elektrické energie (rozvody ZIS). Veškeré přístrojové vybavení bude mít platnou bezpečnostně technickou kontrolu. Dle požadavků lékaře bude připraveno vybavení pro resuscitaci a první pomoc. Z důvodu pandemie SARS-CoV-2 bude povinnost všech zúčastněných nosit ochranu horních cest dýchacích (respirátor FFP2/KN95), pro probandy je povinností předložit negativní antigenní test provedený v posledních 3 dnech, veškerá aparatura bude mezi jednotlivými měřeními dezinfikována. Soukromí probandů při experimentu a ochrana jejich osobních údajů bude řádně zajištěna v souladu s legislativou a běžnou klinickou praxí.

Experiment bude probíhat pod dozorem (za trvalé přítomnosti) anesteziologa (MUDr. L. Horáková, FBMI ČVUT). Anesteziolog bude trvale vyhodnocovat okamžitý stav probanda včetně stavu vědomí a vyhodnocovat možná zdravotní rizika.

S probandem bude probíhat neustálá komunikace (musí aktivně reagovat zvednutím ruky, odpověď na jednoduché matematické otázky).



Měření bude ukončeno v okamžiku, pokud: a) proband vzdá experiment, odpojí se, požádá o ukončení či jinak od studie odstoupí, b) proband nebude reagovat správným způsobem na pokyny c) kontrolní parametr dosáhne kritických hodnot, d) na příkaz anesteziologa sledujícího stav probanda.

Jako kritická hodnota byl stanoven parciální tlak  $\text{CO}_2$  ve vydechovaném plynu ( $\text{EtCO}_2$ ) = 60 mmHg. Jako sekundární parametr byla zvolena hodnota saturace periferní krve kyslíkem ( $\text{SpO}_2$ ) = 75 %.

Kdo ponese náklady na odškodnění v případě poškození subjektu hodnocení:

FBMI ČVUT, ale nepředpokládá se žádná újma na zdraví

**C: Doplnující informace k výzkumnému projektu:**

Cílem výzkumu je ověření hypotézy stanovené v zadání diplomové práce, která představuje možné výstupy pro publikační činnost.

# Příloha C: Informovaný souhlas

## Informovaný souhlas

Vážená paní, vážený pane,

nabízíme Vám účast ve výzkumné studii, prováděné v rámci výzkumného projektu s názvem „Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí“.

**Cíl:** Cílem je dokázat, že stav nedostatku kyslíku nastávající u zavalených osob sněhem je také funkcí odporu dechové dráhy, a nikoliv jen objemu přítomného vzduchu v dechové dráze zavaleného.

**Příprava:** V přednášce budete seznámen/a s problematikou přežití pod lavinou a s významem prováděného měření.

**Průběh testování:** Experiment bude prováděn na dobrovolnících z řad studentů FBMI. Před hlavním měřením budete dýchat skrz řadu deseti odporů (každý cca 30 sekund) pro případné upravení hlavního kompenzačního odporu v následném hlavním měření. Při hlavním měření budete připojen/a přes antibakteriální filtr k měřicí aparatuře sestavené z měřicí clony D-Lite, průtočného odporu (případně bezodporového členu) a modelu sněhu, kterým je v případě této studie mokrá perlit. Jako proband podstoupíte 3 sady měření odpovídající absenci vzduchové kapsy, přítomnosti vzduchové kapsy a přítomnosti vzduchové kapsy s kompenzačním odporem. Před každým měřením proběhne fáze ustálení na nezapojené aparatuře o délce 2 minut pro navyknutí si na změnu běžného dýchání. V průběhu experimentu Vám nebude sděleno aktuální sestavení aparatury z důvodu ovlivňování výsledků experimentu. Po každém měření (240 s) dojde k odpojení od soustavy, 3 minuty dodýchání na fyziologické parametry a bude následovat pauza (min. 20 h) pro ustálení před dalším měřením. V řečené pauze taktéž dojde k provzdušnění perlitu pro odstranění navázaného oxidu uhličitého.

**Zajištění bezpečnosti:** Před vstupem do studie je nutno předložit negativní antigenní test na SARS-CoV-2 provedený v posledních 3 dnech. Všichni zúčastnění budou mít po dobu studie ochranu horních cest dýchacích respirátorem FFP2/KN95 a veškerá aparatura bude mezi měřeními dezinfikována. Experiment byl konzultován s lékařem. V rámci dýchání skrz odporovou řadu nebudou navozeny stavy dechové tísně. Z principu sestavené aparatury hlavního měření Vám budou uměle navozeny stavy hypoxie (nedostatek kyslíku v tkáních) a hyperkapnie (vysoká koncentrace oxidu uhličitého v tkáních). Pro kontrolu hladiny kyslíku v těle Vám bude měřena hodnota SpO<sub>2</sub> reflektující množství okysličené krve v cévní periférii. Dále se bude Váš stav monitorovat odpovědí na jednoduché dotazy, kdy bude očekávána motorická reakce (ukázat na prstech výsledek příkladu apod.). Měření bude ukončeno v okamžiku, kdy se odpojíte od aparatury, nebo o to sami požádáte, pokud budete reagovat nesprávně na dotazy, nebo na

základě zjištěné kritické hodnoty parametrů životních funkcí z přístroje. K bezpečnostním opatřením patří trvalá přítomnost atestovaného lékaře.

**Z měření můžete kdykoliv na vlastní žádost odstoupit.**

Řešitel: Bc. Štěpán Němec, ČVUT v Praze, FBMI

Podepsáním tohoto písemného informovaného souhlasu souhlasíte s tím, že hlavní řešitelé a etická komise budou mít umožněn přímý přístup k původní klinické dokumentaci za účelem ověření průběhu studie anebo údajů, aniž dojde k porušení důvěrnosti informací o Vaší osobě, v míře povolené právními předpisy GDPR.

**Souhlasím s účastí.**

Jméno a datum narození vyšetřované osoby:

Proband číslo:

Datum:

Podpis:

# Příloha D: Protokol probanda

## Protokol měření

ID:

<i>Datum 1. měření</i>	<i>Čas začátku příprav</i>	<i>Orient. čas měření</i>	<i>Zkoušející</i>
<b>Výška</b>	<b>Váha</b>	<b>Kuřák (četnost)</b>	<b>Respirační onemocnění</b>
<b>FVC</b>	<b>FEV 1</b>	<b>Tiffeneaův index (thld 0,7)</b>	<b>Onemocnění oběhové soustavy</b>

Personální zajištění:

<i>Funkce</i>	<i>Popis zodpovědností</i>	<i>Jméno a příjmení</i>	<i>Aktivní</i>
Zkoušející	Řídí měření, zapisuje tento protokol, komunikuje s probandem	Štěpán Němec	<input type="checkbox"/>
„Perlit operátor“	Přesypává perlit, zapojuje a čistí ventilační prvky	Ladislav Bís	<input type="checkbox"/>
„Logger“	Provádí záznam dat na počítači	Šimon Walzel	<input type="checkbox"/>
Doktor	Provádí spirometrické vyšetření, hlídá stav probanda	MUDr. Lenka Horáková	<input type="checkbox"/>

- Informovat personál o zásadách:
  - dodržovat naprostý klid při experimentu i při iniciální fázi ustalování
  - neinformovat probanda o změně jeho fyziologických parametrů (ani z legrace)
  - neinformovat probanda, za jakých podmínek dýchá do perlitu (zaslepení)
  - informovat o limitech fyziologických parametrů, při jejichž překročení musí být experiment ukončen
- Stav pomůcek: kužel, perlit 2x, aparatura, filtry, Datex, senzory, počítač, první pomoc, kyslík, spirometr.
- Personální sestava je kompletní, informovaná o činnostech a funguje.
- Provést kontrolu údajů z informovaného souhlasu.
- Provést spirometrické vyšetření a výsledky zapsat do protokolu.
- Zaznamenat hustotu užívaného perlitu .....
- Vložit do kuželu síto .....
- Přesypat perlit do kužele.
- Sestavit aparaturu .....
- Změřit odpor soustavy

Průtok Q (l/min)	20	40	60	80	100
P difference					

- Připojit k aparatuře kapnometry.
- Přivést probanda a umístit ho k náustku filtru.
- Připojit k monitoru a nasadit probandovi senzor SpO<sub>2</sub>.
- Připojit k monitoru D-lite.
- Zkontrolovat, že monitor a kapnometry měří všechna data.
- Zapnout záznam dat z monitoru. Správně pojmenovat ukládané soubory.
- Zkontrolovat, že monitor zapisuje data na disk (zvětšuje se velikost souboru).
  - Dát probandovi kolíček na nos.
  - Nechat probanda dýchat 2 minuty skrz nezapojenou aparaturu pro ustálení.

- Zapnout videozáznam prostředí.
- Do videozáznamu namluvit identifikátor probanda, datum, přesný čas a dát povel k dýchání.**

Připojení proběhlo v ..... hodin.

- Trvale kontrolovat, že
  - videokamera zaznamenává obraz
  - vědomí probanda pomocí dotazů
  - na přístrojích se neobjevuje kritická hodnota EtCO<sub>2</sub> nebo SpO<sub>2</sub>

Během měření nastaly tyto události:

<i>Čas</i>	<i>Událost – popis</i>	<i>Nesignifikantní</i>	<i>Signifikantní</i>

- Na pokyn anesteziologa, zkoušejícího nebo na žádost probanda bude ukončeno odpojením od aparatury a ohlášením tohoto okamžiku na kamery.

Odpojení proběhlo v ..... hodin.

**Důvod odpojení:** .....

- Nechat probanda dodýchat 3 minuty do fyziologických hodnot.
- Ukončit záznam dat do notebooku.
- Vypnout videokameru.
- Změřit odpor soustavy

Průtok Q (l/min)	20	40	60	80	100
P difference					

- Provést zálohu dat z monitoru na SD kartu (v nejhorším na USB flashdisk).
- Zkontrolovat, že byla data z SD karty (USB flashdisku).
- Přesypat perlit do nádob pro odstranění oxidu uhličitého.
- Následuje min. 20 h pauza před druhým měřením.

<b><i>Datum 2. měření</i></b>	<b><i>Čas začátku příprav</i></b>

- Zaznamenat hustotu užívaného perlitu .....
- Vložit do kuželu síto .....

- Přesypat perlit do kužele.
- Sestavit aparaturu .....
- Změřit odpor soustavy

Průtok Q (l/min)	20	40	60	80	100
P difference					

- Připojit k aparatuře kapnometry.
- Přivést probanda a umístit ho k náustku filtru.
- Připojit k monitoru D-lite.
- Připojit k monitoru a nasadit probandovi senzor SpO<sub>2</sub>.
- Zkontrolovat, že monitor měří všechna data.
- Zapnout záznam dat z monitoru. Správně pojmenovat ukládané soubory.
- Zkontrolovat, že monitor zapisuje data na disk (zvětšuje se velikost souboru).
  - Dát probandovi kolíček na nos.
  - Nechat probanda dýchat 2 minuty skrz nezapojenou aparaturu bez odporu pro ustálení.
- Zapnout videozáznam prostředí.
- Do videozáznamu namluvit identifikátor probanda, datum, přesný čas a dát povel k dýchání.**

Připojení proběhlo v ..... hodin.

- Trvale kontrolovat, že
  - videokamera zaznamenává obraz
  - vědomí probanda pomocí dotazů



- na přístrojích se neobjevuje kritická hodnota EtCO<sub>2</sub> nebo SpO<sub>2</sub>

Během měření nastaly tyto události:

Čas	Událost – popis	Nesignifikantní	Signifikantní

- Na pokyn anesteziologa, zkoušejícího nebo na žádost probanda bude ukončeno odpojením od aparatury a ohlášením tohoto okamžiku na kamery.

Odpojení proběhlo v ..... hodin.

**Důvod odpojení:** .....

- Nechat probanda dodýchat 3 minuty do fyziologických hodnot.
- Změřit odpor soustavy

Průtok Q (l/min)	20	40	60	80	100
P difference					

- Ukončit záznam dat do notebooku.
- Vypnout videokameru.
- Provést zálohu dat z monitoru na SD kartu (v nejhorším na USB flashdisk).
- Zkontrolovat, že byla data z SD karty (USB flashdisku).
- Přesypat perlit do nádob pro odstranění oxidu uhličitého.
- Následuje min. 20 h pauza před třetím měřením.

<b>Datum 3. měření</b>	<b>Čas příprav</b> <b>začátku</b>

- Zaznamenat hustotu užívaného perlitu .....
- Vložit do kuželu síto .....
- Přesypat perlit do kužele.
- Sestavit aparaturu .....
- Změřit odpor soustavy

Průtok Q (l/min)	20	40	60	80	100
P difference					

- Připojit k aparatuře kapnometry.
- Přivést probanda a umístit ho k náustku filtru.
- Připojit k monitoru D-lite.
- Připojit k monitoru a nasadit probandovi senzor SpO<sub>2</sub>.
- Zkontrolovat, že monitor měří všechna data.
- Zapnout záznam dat z monitoru. Správně pojmenovat ukládané soubory.
- Zkontrolovat, že monitor zapisuje data na disk (zvětšuje se velikost souboru).
  - Dát probandovi kolíček na nos.
  - Nechat probanda dýchat 2 minuty skrz nezapojenou aparaturu pro ustálení.
- Zapnout videozáznam prostředí.
- Do videozáznamu namluvit identifikátor probanda, datum, přesný čas a dát povel k dýchání.**

Připojení proběhlo v ..... hodin.

- Trvale kontrolovat, že
  - videokamera zaznamenává obraz
  - vědomí probanda pomocí dotazů
  - na přístrojích se neobjevuje kritická hodnota EtCO<sub>2</sub> nebo SpO<sub>2</sub>

Během měření nastaly tyto události:

<i>Čas</i>	<i>Událost – popis</i>	<i>Nesignifikantní</i>	<i>Signifikantní</i>

- Na pokyn anesteziologa, zkoušejícího nebo na žádost probanda bude ukončeno odpojením od aparatury a ohlášením tohoto okamžiku na kamery.

Odpojení proběhlo v ..... hodin.

**Důvod odpojení:** .....

- Nechat probanda dodýchat 3 minuty do fyziologických hodnot.
- Změřit odpor soustavy

Průtok Q (l/min)	20	40	60	80	100
P difference					

- Ukončit záznam dat do notebooku.

- Vypnout videokameru.
- Provést zálohu dat z monitoru na SD kartu (v nejhorším na USB flashdisk).
- Zkontrolovat, že byla data z SD karty (USB flashdisku).

<i><b>Měření probíhalo</b></i>	<i><b>ID probanda</b></i>	<i><b>Vytvořil</b></i>

## **Příloha E: Obsah přiloženého **CD/DVD****

1. Zadání\_diplomové\_práce.pdf
2. Abstrakt.pdf
3. Abstract.pdf
4. F7PMBDP\_465500\_Lukáš\_Povišer.zip
5. F7PMBDP\_465500\_Lukáš\_Povišer.pdf