



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**Katedra biomedicínské techniky**

**Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené  
ventilační insuficiencí**

**Work of Breathing under extreme hypercapnia induced by  
ventilation insufficiency**

**Diplomová práce**

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika  
Studijní obor: Biomedicínský inženýr

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

**Bc. Štěpán Němec**

---

**Kladno 2021**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Němec** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **465417**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**  
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**  
Studijní obor: **Biomedicínský inženýr**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí**

Název diplomové práce anglicky:

**Work of Breathing under extreme hypercapnia induced by ventilation insufficiency**

Pokyny pro vypracování:

Na laboratorním modelu plic člověka dýchajícího v lavinovém sněhu prostudujte vlastnosti parametrů používaných k hodnocení dechové práce. Navrhněte experiment a zrealizujte pilotní měření s dobrovolníky pro kvantifikaci příspěvku zvýšeného dechového odporu ke změnám koncentrací dýchacích plynů u subjektů dýchajících do simulovaného lavinového sněhu.

Seznam doporučené literatury:

- [1] 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.
- [2] 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.

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

**MUDr. Lenka Horáková, Ing. Ladislav Sieger, CSc.**

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **18.09.2022**

Doc. Ing. Martin Rožánek, Ph.D.  
Digitálně podepsal Doc.  
Ing. Martin Rožánek, Ph.D.  
Datum: 2021.03.03  
17073319336

doc. Ing. Martin Rožánek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) katedry

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA  
Digitálně podepsal prof.  
MUDr. Jozef Rosina, Ph.D.,  
MBA  
Datum: 2021.03.03 11:06:47  
+01'00'

prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

12.3.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí“ 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 11.8. 2021

.....

Bc. Štěpán Němec

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval mému vedoucímu práce panu prof. Ing. Karlu Roubíkovi, Ph.D., za cenné rady, usměrnění a konzultace při psaní této diplomové práce. Velký dík také patří paní MUDr. Lence Horákové, za asistenci při měření na probandech a konzultacím věnující se průběhu měření. Nakonec bych rád poděkoval Ing. Š. Walzelovi a Bc. L. Bísovi za výpomoc při měření a materiálním zajištění experimentu.

## **ABSTRAKT**

### **Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí**

Ze soudobých poznatků je patrné, že výskyt vzduchové kapsy je pozitivním faktorem pro přežití při zavalení lavinou, není však znám přesný důvod zvýhodnění. Cílem této diplomové práce je vyhodnocení vlivu parametru odporu dechové dráhy v závislosti na rychlosti navození stavu hyperkapnie ventilační insuficiencí způsobenou zvýšenou dechovou prací. Pro popis dechové práce jsou v úvodní části práce studovány limitace běžně užívaných parametrů *WoB* a *PTP*. Z laboratorní studie vyplývá, že se při vysokém průtočném odporu parametr *WoB* stává nesměrodatným. Dále byla vytvořena aparatura pro experimentální měření na probandech testující vliv odporu dechové dráhy na délce přežití při zavalení. Studie měla tři fáze, kdy probandi dýchali do modelu sněhu se vzduchovou kapsou, do modelu sněhu bez vzduchové kapsy a do modelu sněhu se vzduchovou kapsou a kompenzačním odporem uměle navyšujícím dechovou práci. Po provedení experimentu a vyhodnocení naměřených dat od 11 probandů nebyl shledán vliv odporu dechové dráhy jako klíčový parametr pro prodloužení doby přežití při dýchání do vzduchové kapsy.

### **Klíčová slova**

Work of Breathing, Pressure-Time Product, hyperkapnie, respirace, průtočný odpor

## **ABSTRACT**

### **Work of Breathing under extreme hypercapnia induced by ventilation insufficiency**

Actual findings say that presence of an air pocket while being buried beneath an avalanche is beneficial for duration of survival, although the exact principle is not known. The aim of this Masters thesis is evaluation of how significant is resistance of breathing pathway in contrast of hypercapnia buildup induced by increased work of breathing caused by ventilation insufficiency. First part of the study evaluates limitations of *WoB* and *PTP* which are commonly used parameters to describe work of breathing. Results from laboratory study points out the unreliability of *WoB* in high flow resistant systems. Second part of the thesis consists of development and creation of flow resistor which forces higher work of breathing to maintain ventilation. As main part of the thesis a study was conducted with three phases. Phases were: breathing into artificial snow with no air pocket, with 2 L air pocket and into 2 L air pocket with compensation resistor that forced probands to higher work of breathing. After data analysis from 11 probands the significance of flow resistance as a key parameter describing beneficial value of an air pocket was not proved.

### **Keywords**

Work of Breathing, Pressure-Time Product, hypercapnia, respiration, flow resistance

## **Použité značení a jednotky**

V této diplomové práci je užito pojmu dechové práce, která je myšlena jako fyziologické úsilí, které je nutno vynaložit pro dýchání pomocí dýchacích svalů. Toto úsilí lze popsat fyzikálními parametry Work of Breathing a Pressure-Time Product. Parametr Pressure-Time Product nemá v českém jazyce ekvivalent, tudíž jsou pro tyto parametry ponechány anglické termíny.

Pro uvedení hodnoty tlaku je v práci užita jednotka  $\text{cmH}_2\text{O}$  (centimetr vodního sloupce), což není jednotka soustavy SI, nicméně je v praxi užívanou.

Pro označení jednotky objemu litr je v práci užito označení „L“ používané v zahraniční literatuře v oblasti respirační péče z důvodu možné záměny běžně užívaného symbolu „l“ (malé písmeno L) se symbolem „1“ (číslice jedna).

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	8
<b>1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Přehled současného stavu.....</b>	<b>11</b>
<b>3 Cíle práce .....</b>	<b>15</b>
<b>4 Metody .....</b>	<b>16</b>
4.1 Laboratorní studium parametrů popisující dechovou práci.....	16
4.2 Aparatura pro experimentální měření na probandech .....	18
4.3 Realizace experimentu .....	21
4.4 Zpracování dat.....	25
<b>5 Výsledky.....</b>	<b>26</b>
5.1 Studium parametrů <i>iWoB</i> a <i>iPTP</i> na simulátorech plic.....	26
5.2 Vytvořený kompenzační odpor .....	27
5.3 Dechová práce .....	29
5.3.1 Inspirační <i>iPTP</i> a <i>iWoB</i> .....	29
5.3.2 Exspirační <i>iPTP</i> a <i>iWoB</i> .....	34
5.4 Respirační plyny.....	38
5.5 Saturace periferní krve kyslíkem.....	39
<b>6 Diskuse .....</b>	<b>40</b>
6.1 Volba parametrů pro popis dechové práce .....	40
6.2 Vytvořený kompenzační odpor .....	41
6.3 Vývoj parametrů <i>iWoB</i> a <i>iPTP</i> při experimentu na probandech .....	41
6.4 Vývoj respiračních plynů při experimentu na probandech .....	42
6.5 Vývoj parametru <i>SpO<sub>2</sub></i> při experimentu na probandech.....	42
6.6 Limitace práce .....	43
<b>7 Závěr .....</b>	<b>45</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>46</b>
<b>Příloha A: Žádost pro etickou komisi .....</b>	<b>48</b>
<b>Příloha B: Syllabus výzkumného projektu.....</b>	<b>49</b>
<b>Příloha C: Informovaný souhlas .....</b>	<b>52</b>
<b>Příloha D: Protokol probanda .....</b>	<b>54</b>



# Seznam symbolů a zkratk

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$V_T$	L	Dechový objem
$RR$	$\text{min}^{-1}$	Frekvence dýchání
$W_{oB}$	J	Dechové úsilí vyjádřené parametrem Work of Breathing
$PTP$	$\text{cmH}_2\text{O}\cdot\text{s}$	Dechové úsilí vyjádřené parametrem Pressure-Time Product
$t$	s	čas
$p_{aw}$	$\text{cmH}_2\text{O}$	Tlak v dýchacích cestách
$q_{aw}$	L/min	Objemový průtok v dýchacích cestách
$iW_{oB}$	J	imposed Work of Breathing
$iPTP$	$\text{cmH}_2\text{O}\cdot\text{s}$	imposed Pressure-Time Product
$EtCO_2$	%	Objemové procento oxidu uhličitého na konci výdechu
$EtO_2$	%	Objemové procento kyslíku na konci výdechu
$SpO_2$	%	Saturace periferní krve kyslíkem
$\Delta p$	hPa	Tlaková diference
$q$	L/min	Objemový průtok
$a$	-	Koeficient mocninné funkce
$n$	-	Exponent mocninné funkce
$iW_{oB}_V$	J/L	imposed Work of Breathing vztažený na objem dechu
$iW_{oB}_t$	J/min	imposed Work of Breathing vztažený na dobu dechu
$iW_{oB}_{MV}$	J·min/L	imposed Work of Breathing vztažený na minutovou ventilaci
$iPTP_V$	$\text{cmH}_2\text{O}\cdot\text{s}/\text{L}$	imposed Pressure-Time Product vztažený na objem dechu
$iPTP_t$	$\text{cmH}_2\text{O}\cdot\text{s}/\text{min}$	imposed Pressure-Time Product vztažený na dobu dechu
$iPTP_{MV}$	$\text{cmH}_2\text{O}\cdot\text{s}\cdot\text{min}/\text{L}$	imposed Pressure-Time Product vztažený na minutovou ventilaci

## Seznam zkratek

Zkratka	Význam
Exsp	Expirium
Insp	Inspirium
HF	High flow
F	(Full) Bez vzduchové kapsy
C	(Compensated) Kompenzovaná vzduchová kapsa
A	(Air) Vzduchová kapsa

# 1 Úvod

Zavalení lavinou patří mezi nejnebezpečnější rizika při pobytu na horách, byť jen při rekreačních, sportovních nebo turistických aktivitách. Ročně přijde globálně o život okolo 150 osob [1]. Ve většině případech se však jedná o lyžaře nebo snowboardisty, kteří svým počínáním lavinu sami spustí.

Pokud je člověk zachycen lavinou, je v první fázi ohrožen traumaty vzniklými od kusů ledu, kamenů, kmenů stromů nebo ostrých hran skal. Nejčastějšími zraněními jsou zlomeniny končetin, abraze končetin nebo hlavy, zlomená žebra, zlomená pánev či hematomy hlavy. Tato zranění jsou však podmíněná profilem dané oblasti a jsou tudíž velmi variabilní. McIntosh et al. [2] uvádí, že počet zemřelých osob zavalených lavinou jen na traumatologické zranění bylo méně než 10 %. Smrtelné zranění ve většině případech bylo trauma hlavy způsobené tupým předmětem, což mělo za následek asfyxii. Největší riziko pro následné přežití představují poranění hrudníku, bránice a zejména nedostatečný prostor pro expanzi hrudníku pro dostatečnou ventilaci.

Po zastavení laviny nastává nejkritičtější fáze pro přežití. Z poznatků studie Proctera et al. [3] je patrné, že šance na přežití výrazně klesá s časem. Prvních 15 minut je klíčových pro zajištění záchrany, případně aby si zavalený vytvořil prostředí pro snazší překonání následující respirační tísně. Z fyziologického hlediska nastává v čase syndrom tří H – hyperkapnie, hypoxemie, hypotermie. S rostoucím časem dochází v nejhorším případě až na asfyxii, která je v 85 % hlavní příčinou úmrtí člověka zasypaného lavinou [4]. Nicméně není známo, jakou část tvoří asfyxie zapříčiněná hypoxií nebo kompresí hrudníku znemožňující nadechnutí.

Vědecké týmy zabývající se problematikou přežití pod lavinou zkoumají zejména stavy po zavalení. Testované hypotézy se věnují vývoji syndromu tří H a parametrům zavalení, které mají vliv na celkovou dobu vytrvání v simulovaném lavinovém závalu. Mezi sledované parametry patří například přítomnost či absence různě velkých vzduchových kapes, vlastnosti sněhu nebo dynamika dýchání. Dále existují i studie zabývající se testováním podpůrných prostředků pro umělé zvýšení doby přežití. Takovými prostředky jsou například AvaLung nebo airbagové vesty [5].

## 2 Přehled současného stavu

Při sledování syndromu tří H je nejdříve potřeba se seznámit se závažností jednotlivých stavů. Hypotermie je dle několika studií méně závažným parametrem ovlivňujícím dobu přežití pod lavinou. Díky moderním technologiím jsou lyžaři často vybaveni dobře izolujícím oblečením, které výrazně snižuje ztrátu tělesné teploty v případě zavalení. Dle Grissoma [6] však probandi, kteří byli zatíženi hyperkapnií, ztráceli o stupeň Celsia za hodinu více oproti normokapnické skupině. Problém ale nastává při poklesu tělesné teploty pod 28 stupňů Celsia, kdy začíná docházet k životu ohrožujícím arytmiím. I při zvýšené tepelné tělesné ztrátě však tento stav nastane až po 2,5 a více hodinách. Ve valné většině případů však zavalená osoba do té doby umírá na asfyxii před nástupem arytmií, hypotermie tudíž není vedena jako primární příčina úmrtí, jelikož se nemůže plně projevit [7].

Při zavalení lavinou nastává u obětí výrazná ventilační insuficience oproti normálnímu stavu. Problémem pro dostatečnou ventilaci je zejména málo fyzického prostoru na dostatečný nádech a reventilace exspirovaných plynů. V každém případě u zavaleného nastává s narůstajícím časem zavalení akutní respirační acidóza. Na tomto stavu se podílí dva velmi silné faktory snižující šanci na přežití. Prvním faktorem je snižující se zásoba kyslíku, který má zavalený k dispozici. Druhým faktorem zvyšující se množství exspirovaného oxidu uhličitého, který nemá kudy odcházet ze závalu [8-9]. V prvopočátku má zával určitou kapacitu, která umožňuje navázání exspirovaného oxidu uhličitého, nicméně se zavalený časem dostává do stavu, kdy inspiruje vlastní expirační směs. Nastávající respirační acidóza má za následek fyziologickou odpověď organismu ve snaze kompenzace. Při poklesu parciálního tlaku kyslíku v cévním řečišti dochází k aktivaci periferních chemoreceptorů a aferentním vedením je informace vyhodnocena v prodloužené míše, ve které se nachází centrum dýchání. Prodloužená mícha na odpověď z chemoreceptorů vysílá signály k aktivaci kompenzačních mechanismů pro zachování homeostázy. Jako hlavní kompenzační mechanismu funguje zvýšení minutové ventilace [10]. Minutovou ventilaci může organismus zvýšit dvěma způsoby. První způsob je zvýšení dechového objemu ( $V_T$ ), což se projeví hlubokými nádechy a výdechy. Druhým způsobem je zvýšení frekvence dýchání ( $RR$ ).

Problém nastává při přetrvávajícím stavu hyperkapnie a hypoxie, kdy dochází k patofyziologickým procesům, které výrazně ohrožují zavaleného na životě. Při lehkém až středním stavu dochází k závratím, bolestem hlavy, zmatenosti až letargii [11]. Z fyziologického hlediska nastává u zavalených tachypnea, která má snahu odventilovat přebytečný oxidu uhličitého z plic, a tachykardie, která vzniká jako odpověď na přetrvávající snížení parciálního tlaku kyslíku v cévním řečišti [12]. Při těžkých stavech se veškeré patofyziologické stavy výrazně zhoršují. Organismus je zatížen sníženou neuronovou aktivitou a rozvratem elektrolytů, což má za následek extrasystoly nebo

arytmie. V konečném stádiu mají stavy hypoxie a hyperkapnie nezvratné změny tkání mozku a srdce. Zejména hypoxie má v nejhorším případě za následek ischemii [13].

Na rychlosti nástupu hyperkapnie a hypoxie má vliv samotná činnost dýchání. K inspiriu je zapotřebí aktivní expanze hrudní dutiny, což zajišťují mezižeberní svaly a bránice. Při svalové kontrakci je využíván kyslík a míra spotřeby je závislá na velikosti práce vykonané pro expanzi hrudního koše. Velikost této práce se různí podle aktuálního stavu dýchací soustavy. Běžně se na dýchání spotřebuje přibližně 5 % přijatého kyslíku. Plíce jsou za fyziologického stavu velmi poddajné, nicméně jsou elastickými silami a povrchovým napětím nuceny se smršťovat. Samovolnému smrštění však brání záporná tlaková diference v intrapleurální dutině. Vynaložená dechová práce tedy musí překonat elastické síly stahující se plíce a vlastní průtočný odpor respirační soustavy [14]. Pro kvantifikaci dechové práce se užívá parametrů Work of Breathing (*WoB*) a Pressure-Time Product (*PTP*). Parametr *WoB* lze spočítat z naměřeného tlaku a průtoku ve ventilačním okruhu dle vztahu [15]:

$$WoB = \int_0^T p_{aw} \cdot q_{aw} dt \quad (1.)$$

kde  $p_{aw}$  (Pa) je tlak v dýchacích cestách,  $q_{aw}$  (m<sup>3</sup>/s) je průtok v dýchacích cestách,  $T$  (s) je doba dechu,  $t$  (s) je čas.

Pro různé pohledy na energickou náročnost jednotlivých nádechů a výdechů lze dále parametr normovat na jednotku času nebo minutovou ventilaci. Problém však nastává u vysokých odporů nebo izometrické svalové kontrakce. Práce Cabella a Manceba [16] uvádí, že při neefektivním dýchání plynoucí z izometrické kontrakce nelze objektivně určit dechovou práci, jelikož nedochází k dynamice plynů, ale svaly konají práci a jsou metabolicky aktivní.

Druhým pohledem na metabolickou aktivitu svalů je využití parametru *PTP*, který vychází z hodnoty měřeného tlaku v dýchacích cestách během dechového cyklu, což lze vyjádřit vztahem [17]:

$$PTP = \int_0^T p_{aw} dt \quad (2.)$$

kde  $p_{aw}$  (cmH<sub>2</sub>O) je tlak v dýchacích cestách,  $T$  (s) je doba dechu a  $t$  (s) je čas.

Míra dechové práce je zde vztažena ke zvyšujícímu se tlaku v respiračním systému, který je potřeba vyvinout dýchacími svaly pro zajištění dostatečné ventilace.

Pokud je však před ústy překážka znemožňující spontánní dýchání, tak musí člověk vynaložit vyšší dechové úsilí než jen základní, které vynakládá na fyziologické dýchání. Jde o další aditivní složku, která je uměle vytvořena. Dle předchozích prací zabývajících se problematikou dechové práce [18, 19] lze navýšené úsilí popsat pomocí varianty *imposed*, která je přidána k výše uvedeným. Vznikají tedy parametry *iWoB* a *iPTP*. Odlišuje se fakt, že takto popsany parametr je uměle navýšený externími vlivy mimo respirační systém, což je ve většině případů způsobeno navýšením průtočného odporu

profilu dechové dráhy. Navýšení může nastat v laboratorních podmínkách přidáním odporového členu se známou charakteristikou, zatímco mimo laboratoř je navýšení dáno závalem, či obecně materiálem před ústy nebo obstrukčními poruchami dýchacích cest, které jsou způsobené například cizími předměty.

V kontextu lavinových závalů je navýšená dechová práce způsobena sněhem, který znemožňuje normální výměnu plynů. V lepším případě může nastat, že bude mít zavalený před sebou vytvořenou vzduchovou dutinu, která pozitivně ovlivní velikost vynaložené dechové práce. Pilotním modelem pro testování hypotézy o významnosti vzduchové kapsy byl animální model s prasaty věnující se dýchání do vzduchových kapes o objemu 1 L, 2 L nebo volně do prostoru [20]. Tato pilotní studie sledovala kombinovaný efekt syndromu tří H. Ze studie vyplynula závislost velikosti vzduchové kapsy, rychlosti ztráty tělesné teploty a hustoty sněhu na době přežití při zavalení. Následně byl výzkum proveden na 12 probandech ve studii [21]. Výstupem práce bylo zjištění udávající signifikanci velikosti vzduchové kapsy na době přežití pod lavinou. Probandi se průměrně u kapsy s objemem 1 L dostávali po 4 minutách na hodnotu  $SpO_2$  84 %, zatímco u dutiny o objemu 2 L se probandi dostali na hodnotu  $SpO_2$  90 %. Studie prohlašuje, že prodloužení doby přežití je závislé na přítomnosti jakékoliv vzduchové kapsy. Práce Roubíka et al. [19] sledovala, závislost doby přežití ve stavech absence a výskytu vzduchové kapsy o objemu 1 L. Ze záznamů 10 probandů bylo zjištěno, že statisticky významný pokles parametru  $SpO_2$  nastal po minutě a půl experimentu. Studie také uvedla vývoj dechové práce *iPTP*, kdy došlo ihned ke statistické signifikanci mezi stavem bez vzduchové kapsy a 1L kapsou. Samotný parametr *iPTP* u plně zasypaného probanda byl výrazně vyšší. Studie také uvádí velikosti průtočného odporu měřené soustavy před a po experimentu, což koresponduje s velikostí vykonané dechové práce vyjádřené parametrem *iPTP*. Studie dokazuje, že je možné dýchat i při plném zasypání probanda bez vzduchové kapsy, ale výrazným limitujícím faktorem je velká dechová práce nutná k dostatečné ventilaci, což ale akceleruje metabolismus, který výrazně více spotřebovává inspirovaný kyslík. Neřeší se však, jaký z parametrů vzduchové kapsy přispívá k prodloužení doby přežití. Velkou rolí může hrát změna odporu dechové dráhy nebo případně i profil vývoje ventilačních plynů v kapse, nicméně nelze opomenout ani vlastnosti okolního sněhu.

Struktura sněhu obsahuje významný podíl vzduchu, který může být využit ke správné ventilaci a prodloužení doby přežití při zavalení. Při ventilaci mohou plyny difundovat skrz sníh a porézní charakter sněhu dovoluje i lepší difúzi kyslíku do případné vzduchové kapsy, zatímco exhalovaný oxid uhličitý difunduje opačným směrem do sněhu a je zde zadržován [22]. Práce Radwina [23] uvádí, že kontinuálním odvodu oxidu uhličitého ze sněhu se výrazně prodlužuje doba přežití pod lavinovým sněhem i bez přítomnosti vzduchové kapsy. Problém s difúzí plynů také nastane v případě, kdy vlhkost ve vydechovaném vzduchu vytvoří krystaly ledu, které zamezují difúzi a rapidně snižují dobu přežití zavaleného. Samotná kapacita sněhu je tedy časově proměnná a při

dlouhotrvajícím závalu klesá. Studie uvádí hustotu okolo  $430 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , který odpovídá situaci lavinového závalu v Alpách. Tato studie však pracovala s animálním modelem a autoři sami uvádějí studii, ve které byli jako probandi lidé a zde byla hustota sněhu přibližně  $275 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Pro ventilaci platí, že při stoupající hustotě sněhu se rychleji vydýchá zásoba kyslíku a dříve se sníh zaplní oxidem uhličitým. Nicméně probandi dýchající do sněhu s nižší hustotou ukončovali měření z důvodu vysoké koncentrace oxidu uhličitého způsobující malátnost, bolesti hlavy a ztížené dýchání, ačkoliv neklesla saturace pod hranici 75 %. Samotná hustota sněhu však nejde brát za směrodatnou pro difúzi plynů, ale musí se vzít v úvahu i porozita. Substituce sněhu za vhodný model je složitou záležitostí z důvodu nehomogenity materiálu, který je tvořen zaoblenými částicemi sněhu a ledu, vzduchem, aerosolem a ledovými krystalky, což vede k neustále metamorfóze modelu, především při utváření lavinového závalu. V laboratorní podmínkách je však složité provádět měření na sněhu, tudíž je potřeba sníh suplovat vhodným modelovým materiálem. Práce Roubíka et al. [24] se zabývala vhodnými materiály pro substituci sněhu při ventilačním experimentech. Sledovaným materiálem zde byl perlit, hobliny a polystyren. Každý materiál byl měřen suchý a zvlhčený. Mezi jednotlivými materiály však nebyl stanoven statisticky významný rozdíl. Patrné rozdíly však vznikaly mezi jednotlivými variantami materiálů. Vlhčení mělo u dřevěných hoblin a polystyrenu menší efekt než u perlitu. Perlit se tedy jeví jako vhodný k úpravě parametrů pro směs odpovídající lavinovému sněhu, zejména hustoty sněhu.

Ze současných studií je patrné, že vytvořená vzduchová kapsa pozitivně prodlužuje dobu přežití při zavalení lavinou. Velikost dané dutiny je tomu náležitě úměrná. Zavalení může také dýchat i při úplném zavalení, ale je limitována vysokou dechovou prací, kterou musí vykonat pro dostatečnou ventilaci. Není však známo, jaký parametr charakterizující vzduchovou kapsu se podílí na zvýšené době přežití se vzduchovou kapsou. Zejména není známo, jaký je příspěvek jednotlivých parametrů. Práce Roubíka et al. [19] uvádí rozdíly dechové práce mezi stavy s kapsou a bez kapsy. Práce Strapazzona et al. [25] uvádí, že význam odporu dechové dráhy se nezdá být tak významný, avšak tato studie pracovala se vzduchovou kapsou velikosti 4 L.

Lze předpokládat, že vzduchová kapsa ovlivňuje dobu přežití třemi možnými způsoby. Prvním způsobem je snížení odporu dechové dráhy, skrz kterou proband dýchá. V případě úplného závalu je proband nucen vynaložit vyšší dechovou práci, což zvýší metabolickou činnost a tím zvětší spotřebu kyslíku a produkci oxidu uhličitého. Druhým způsobem je zlepšení profilu výměny plynů, kdy při úplném závalu dochází ihned k inspiraci expirační směsí, která opustila dýchací cesty jako poslední. Tato směs obsahuje alveolární plyn, který má nejnižší koncentraci kyslíku a nejvyšší koncentraci oxidu uhličitého. Kapsa tedy dovoluje promíchání ventilační směsí před zpětnou inspirací. Třetím způsobem je zvětšení objemu kyslíku, který má zavalení k dispozici, což ale u malých kapes není výrazné množství.

### 3 Cíle práce

Tato diplomová práce zkoumá vliv odporu dechové dráhy na rychlosti hypoxie nastávající při ventilační insuficienci vlivem dýchání do simulovaného lavinového sněhu. Zvýšený odpor dechové dráhy způsobuje vyšší dechovou práci nutnou pro dostatečnou ventilaci. Zkoumanými parametry vyjadřujícími dechovou práci jsou zvoleny Work of Breathing (*WoB*) a Pressure-Time Product (*PTP*) včetně jejich normovaných variant. Cílem práce je zjistit vliv zvýšené dechové práce při dýchání do modelu sněhu se vzduchovou kapsou vůči dýchání do modelu sněhu bez vzduchové kapsy. Z pilotních dat naměřených na simulátorech plic prostudovat vývoj parametrů reflektující dechovou práci a popsat jejich limitace. Následně vytvořit a realizovat experiment na probandech. Z naměřených experimentálních dat statisticky vyhodnotit vliv parametru odporu dechové dráhy na rychlost ztráty saturace krve kyslíkem při zvýšené dechové práci.



## 4 Metody

Tato kapitola popisuje jednotlivé kroky vedené při realizaci diplomové práce. První část se věnuje měření na simulátorech respirační soustavy pro studium vývoje parametrů hodnotící dechovou práci. Druhá část popisuje zvolenou aparaturu pro měření na probandech a její modifikování. Třetí část popisuje průběh a metodiku studie na probandech. Poslední část se věnuje postupům zpracování dat pro zjištění vlivu parametru odporu dechové dráhy.

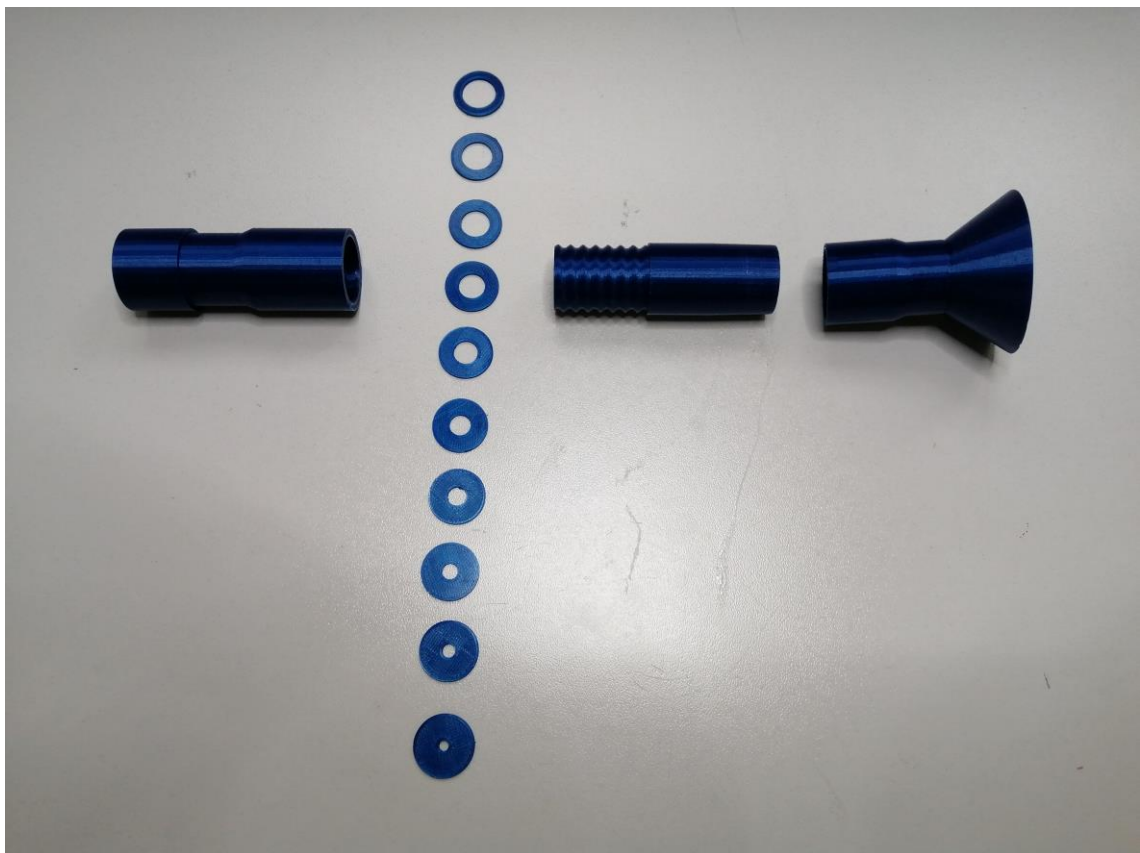
### 4.1 Laboratorní studium parametrů popisující dechovou práci

Pro prostudování parametrů *iPTP* a *iWoB*, které se užívají pro hodnocení dechové práce byly použity dva modely plic. Prvním byl simulátor Hans Rudolph Breathing simulator series 1101 (Hans Rudolph, inc., USA), jako druhý byl použit simulátor ASL 5000 Breathing simulator (IngMar Medical, USA). Jednotlivé parametry na modelech plic byly nastaveny tak, aby simulovaly osobu zavalenou pod lavinou bez známek traumat ovlivňující respirační soustavu, avšak ve stresovém stavu, který charakterizuje výrazná tachypnoe a velké dechové objemy. Parametry zohledněné při stresovém stavu zavalení lavinou byla zejména dechová frekvence 35 dechů za minutu a dechový objem 2,5 litru [26].

Ke sledování vývoje zvyšující se dechové práce byla vytvořena odporová řada centrických kruhových clonek s vnitřním průměrem od 12 do 3 mm. Každá clonka měla šířku jednoho milimetru a byla vsazena mezi dvě součásti, které se do sebe zašroubovaly. Každá z částí byla opatřena standardní kuželovitou spojkou dle normy ČSN EN ISO 5356-1 o kuželových zástrčkách a zásuvkách. Pro sběr dat z průtokové clony byl použit monitor vitálních funkcí Datex-Ohmeda S/5<sup>TM</sup> (GE Healthcare, USA) se softwarem Datex-Ohmeda S/5 Collect (GE Healthcare, USA) se vzorkovací frekvencí 25 Hz. Celková sestava pro měření zvyšující se dechové práce se skládala ze simulátoru plic, měřicí clonky D Lite (GE Healthcare, USA), proměnného odporového členu a difuzéru, což je patrné z obrázků 4.1 a 4.2.



Obrázek 4.1: Simulátory plic



Obrázek 4.2: Odporová řada tištěných clonek.

Pro výrobu clonek a veškerých dalších vlastních průchodek bylo využito metody 3D tisku, kdy je vybraný materiál extrudován po vodorovných vrstvách na tiskovou podložku a po vychladnutí tvoří robustní model. Jako materiál byl použit PLA (Polylactic acid), který je vyráběn z polysacharidů. Pro samotný tisk byla použita 3D tiskárna i3 MK3 (Prusa Research, Česká republika) s tryskou extruderu o průměru 0,25 mm.

## 4.2 Aparatura pro experimentální měření na probandech

Pro provedení studie věnující se významu odporu dechové dráhy bylo nutno vybrat vhodný model sněhu, prvky pro vytvoření dechové dráhy a zejména kompenzační odpor, který bude simulovat dechovou práci při úplném zasypání dechové dráhy probanda, ačkoliv bude dýchat do vzduchové kapsy.

Jako model sněhu pro tento experiment byl zvolen vlhký perlit s hustotou  $250 \text{ kg/m}^3$ . Podobná hustota byl užita i v práci Roubíka et al. [24] Pro výrobu byl užit suchý perlit s velikostí zrn 1 až 3 mm (“Expandovaný perlit EP AGRO”; Perlit ltd., Česká republika). Perlit byl připraven s předstihem ve dvou barelech, které rotovaly mezi jednotlivými měřeními. Barel o objemu 50 litrů byl naplněn perlitem, zvážen, odečtena váha barelu samotného, a poté doplněn vodou na požadovanou hustotu. Barely byly nechány čtyři dny v klidu s občasným promícháním pro homogenizaci navázané vody.

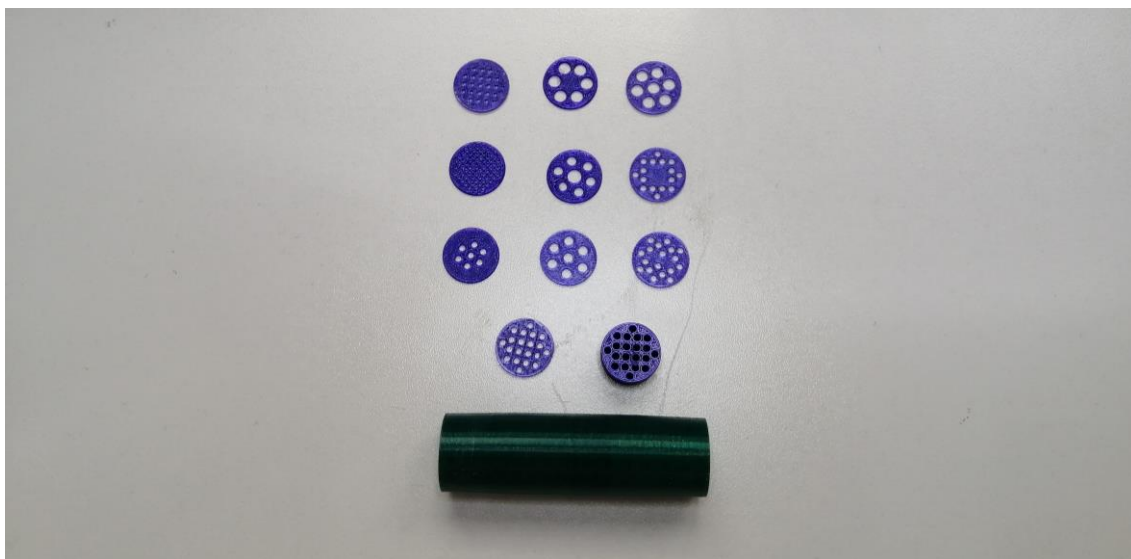
Pro volbu kompenzačního odporu byla znovu využita odporová řada zužujících se kruhových clon s průměrem od 12 do 6 mm. Pro měření byl zvolen plechový kužel s izolační polypropylenovou fólií a uložen v kovovém stojanu využívající se při lavinových experimentech, který byl vyplněn modelem sněhu a pomocí síta byla vytvořena vzduchová kapsa o objemu 2 litrů, případně byl kužel vysypán celý. Špička kužele je opatřena standardizovaným medicínálním konektorem dle normy o kuželových zástrčkách a zásuvkách. Dle této normy byly vytvořeny veškeré další součásti aparatury pro zajištění kompatibility. K vyústění kužele byla připojena propojka pro horizontální vedení dechové dráhy. Dále byl připojen bezodporový člen nebo člen z odporové řady dle aktuální měřené sestavy. Následovala spojka s odběrným místem pro měření tlakové difference tlakoměrem Testo 521 (Testo SE & Co. KGaA, Německo). Koncový člen byl tvořen generátorem průtoku OMEGA FMA5542 (OMEGA Engineering, Inc., USA), který byl napojen na rozvody stlačeného vzduchu. Regulace průtoku byla řízena pomocí softwaru LabVIEW 2019 SP1 (National Instruments Corporation, USA) v rozsahu 0 až 100 L/min s krokem 5 L/min. Z naměřených dat byly v softwaru Matlab 2019b (The MathWorks, Inc., USA) vytvořeny tlakově-průtokové charakteristiky, ze které se nejbližší odporové charakteristice plného kuželu blížil odpor tvořený centrickou kruhovou clonou

o průměru 8 mm. Dalším krokem byla aproximace vybraných průtokových charakteristik obecnou mocninnou funkcí, kde bylo snahou se geometrickou úpravou profilu kompenzačního odporu přiblížit exponentu mocninné funkce odporové charakteristiky samotného perlitu, který vykazuje přechod mezi lineárním a parabolickým odporem. Předpis obecné mocninné funkce má tvar:

$$\Delta p(a, q, n) = a \cdot q^n \quad (3.)$$

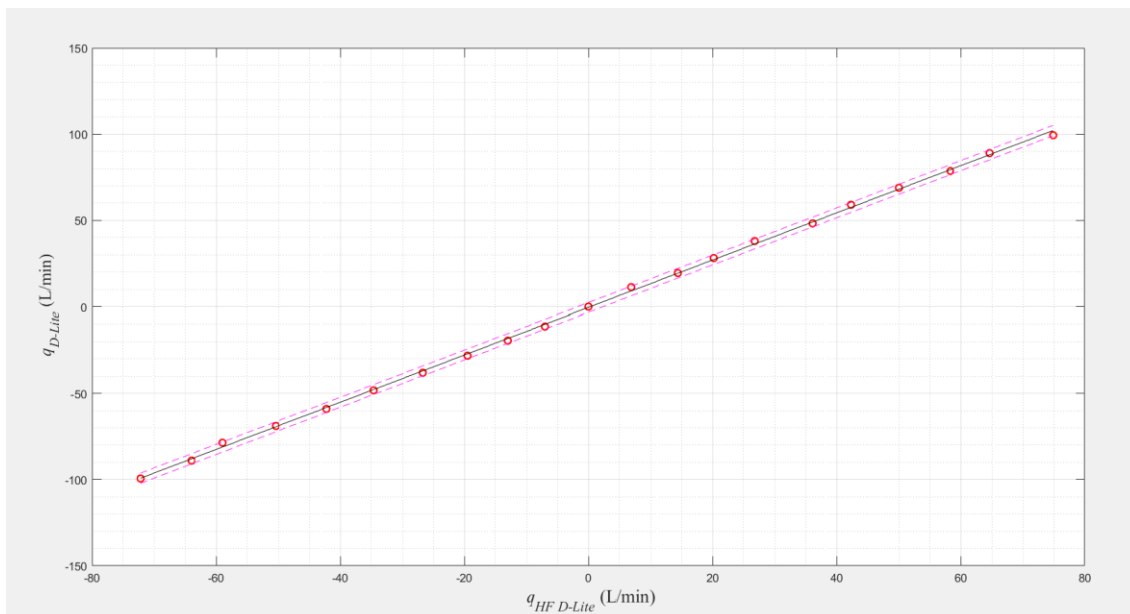
kde  $\Delta p$  (hPa) je tlaková diference,  $q$  (L/min) je objemový průtok,  $a$  (-) je koeficient mocninné funkce a  $n$  (-) je exponent mocninné funkce.

Pro vytvoření linearizovaného odporu byl ponechána stejná průtočná plocha jako u centrické clonky o průměru 8 mm. Úprava byla provedena nahrazením centrického kruhového otvoru na co největší počet malých kruhových otvorů a prodloužením jejich délky na 1 cm. Na obrázku 4.3 je vyobrazen konstrukční vývoj linearizovaného odporu. Pro každou fázi experimentu byla vytvořená aparatura 7x proměřena pro ověření stability měřených průtokových charakteristik, které se vlivem přesypávání zrn perlitu částečně mění. Model sněhu byl opět umístěn v plechovém kuželu a byla použita stejná konfigurace jako při hledání prvotního kompenzačního odporu.



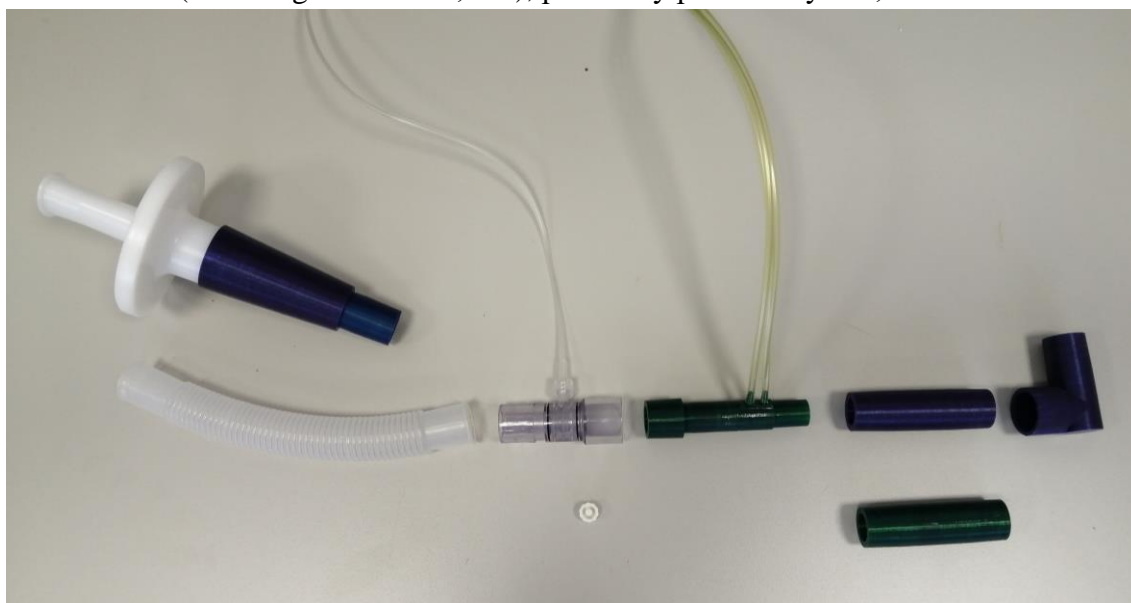
**Obrázek 4.3:** Kompenzační odpory.

Pro snímání dat průtoku a tlaku byla zvolena clona D-Lite upravená pro vysoké průtoky vytvořená v rámci bakalářské práce Bc. Ladislava Bíse [27]. Tisťenou clonu bylo nutné podrobit kalibraci na kalibrační dráze s průtokoměrem CITREX H4 (IMT Medical, USA) pro výpočet korekčního koeficientu clony, kterým bylo nutno veškerá měřená data přepočítat pro získání skutečných hodnot tlaku a průtoku. V grafu 4.1 je zobrazena převodní charakteristika pro měřená data. Charakteristika je proložena lineární přímkou, která má rovnici  $y = 1,37 \cdot x - 0,47$  a koeficient determinace 0,9995.



**Graf 4.1:** Převodní charakteristika D-Lite/HF D-Lite.

Finální připravená aparatura experimentu pro měření s probandy se skládala z plechového kužele s polypropylenovou folií, do kterého byl umístěn materiál simulující lavinový sníh. Pro vytvoření vzduchové kapsy o objemu dvou litrů sloužilo hrubé síto překryté jemnou síťovinou pro eliminaci propadu malých částic. Pro absenci vzduchové kapsy bylo vytvořeno síto s jemnou síťovinou uložené ve špičce kužele. Na trychtýř bylo připojeno koleno, která přesměřovalo dechovou dráhu do horizontální roviny. Na kolenovou spojku dále navazovala průchodka nebo kompenzační odpor, dle aktuálního zvolení sledovaného stavu. Dále byly připojeny prvky pro akvizici dat. Pro měření vývoje tlaku a průtoku byla využita clona D-Lite pro vysoké průtoky. Za vysokoprůtokovou clonou byla propojka s odběrným místem pro analýzu plynů. Poslední část dechové dráhy tvořil segment vrapové hadice a redukce pro připojení antibakteriálního a virového filtru Pulmosafe II (MR Diagnostic s.r.o., ČR), přes který proband dýchal, viz obrázek 4.4.

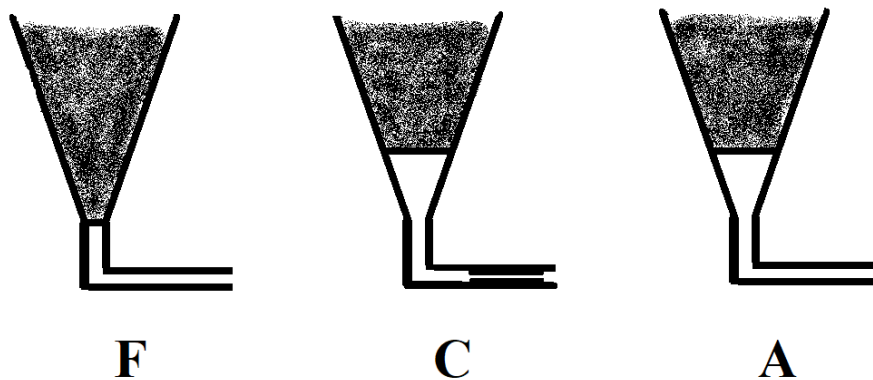


**Obrázek 4.4:** Měřicí aparatura.

Pro sběr dat na analýzu plynů a z průtokové clony byl použit monitor vitálních funkcí Datex-Ohmeda S/5™ (GE Healthcare, USA). K monitoru vitálních funkcí byl dále připojen senzor pro měření saturace periferní krve kyslíkem, EKG svody a kompresní manžeta pro měření krevního tlaku. Data z monitoru byla nahrávána softwarem Datex-Ohmeda S/5 Collect (GE Healthcare, USA) se vzorkovací frekvencí 25 Hz.

### 4.3 Realizace experimentu

Dalším krokem práce bylo provedení zaslepené prospektivní intervenční studie se zdravými dobrovolníky (dále probandi). Studie se skládala ze tří sledovaných fází. První fází bylo dýchání do modelu sněhu bez vzduchové kapsy (značené F). Druhou fází bylo dýchání do modelu sněhu se vzduchovou kapsou o objemu dvou litrů (značené A). Třetí fází bylo dýchání do modelu sněhu se vzduchovou kapsou o objemu dvou litrů a kompenzačním odporem (značené C), který nutí probanda vykonat dechovou práci odpovídající stavu F, viz obrázek 4.5.



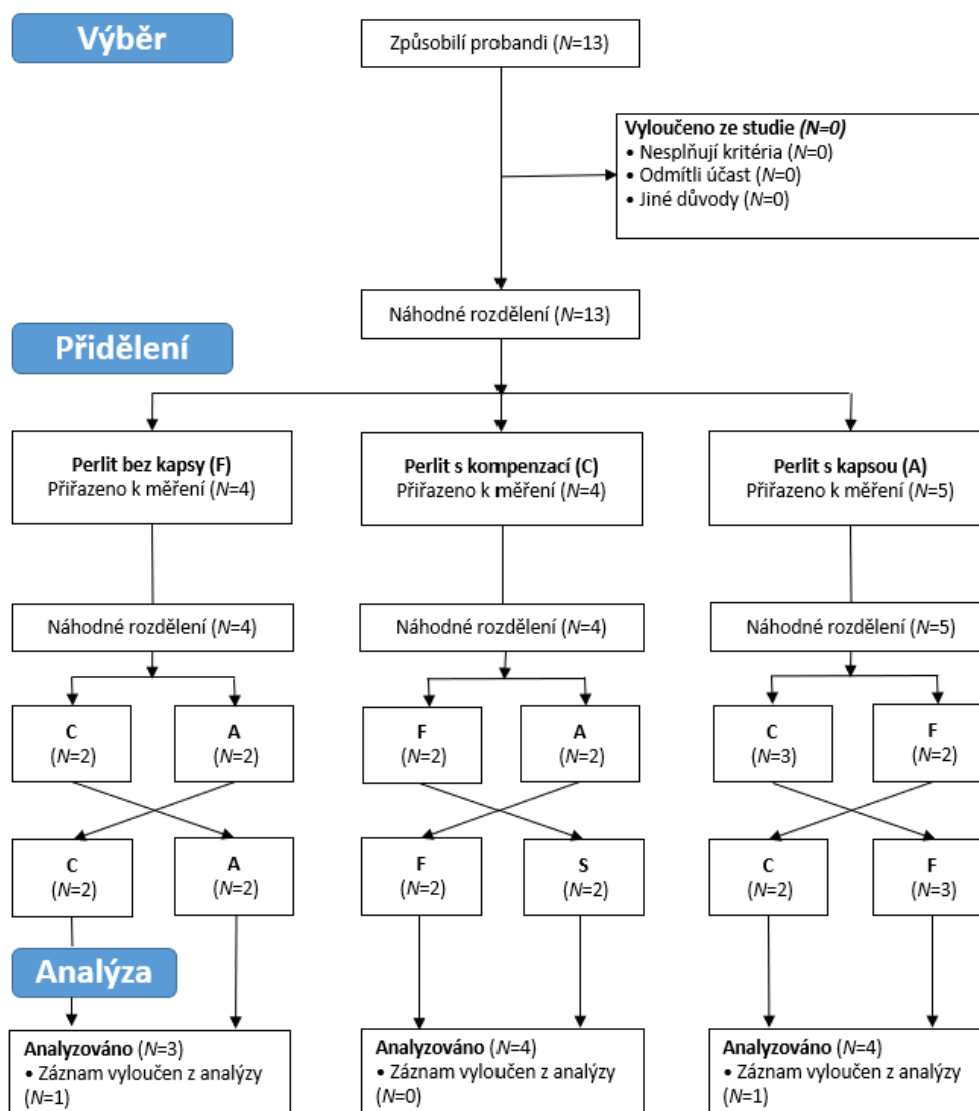
**Obrázek 4.5:** Zjednodušené schéma aparatury experimentu

Studie byla schválena etickou komisí FBMI ČVUT (příloha A-B). Každý proband musel před vstupem do studie podepsat informovaný souhlas (příloha C) a v průběhu experimentu byl hlavním řešitelem vyplňován protokol experimentu (příloha D). Studie proběhla na půdě Fakulty biomedicínského inženýrství v Kladně v laboratoři lavinových experimentů. Studie se zúčastnilo 13 probandů. Demografické parametry výběru jsou uvedeny v tabulce 4.1. Data jsou prezentována jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka.

**Tabulka 4.1:** Demografické parametry probandů studie ( $\bar{x} \pm sd$ )

Parametr	Probandi
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 vytvořeno schéma pro náhodné přiřazení pořadí měření probandům, dle doporučení CONSORT flow diagram pro transparentnost studie.



**Obrázek 4.6:** Schéma náhodného přiřazení probandů do experimentu.

Po seznámení se s průběhem experimentu a podepsání informovaného souhlasu bylo vždy probandovi provedeno spirometrické vyšetření, byly připojeny EKG elektrody a byla nasazena manžeta pro neinvazivní měření krevního tlaku. Po připravení aktuálně sledované sestavy byl proband připojen k EKG, NIBP a SpO<sub>2</sub> modulům na patientském monitoru. Pro zamezení přídechů byla k dýchacím cestám probanda přivedena hadička, ze které proudil oxid dusný. Pokud by proband přidechl, tak by byla ihned patrná měřená koncentrace oxidu dusného monitorem vitálních funkcí. V případě detekce do dvou minut byl experiment zastaven a znovu od začátku realizován. Příprava probanda na měření byla ukončena nasazením nosního kolíčku. Následovala ustalovací fáze trvající dvě minuty, poté vlastní měření trvající čtyři minuty a po odpojení byla opět dvouminutová fáze ustálení na fyziologické hodnoty. Před začátkem a po odpojení probanda byla vždy změřena odporová charakteristika zapojené soustavy v rozsahu 0-100 L/min. Po ukončení měření byl také perlit před přesypáním zpět do barelu propláchnut čistým vzduchem s krokem 20 L/min až do hodnoty 100 L/min. Zázemí laboratoře je uvedeno na obrázku 4.7 a 4.8.



**Obrázek 4.7:** Uspořádání při experimentu.





**Obrázek 4.8:** Proband v průběhu experimentu. (Zveřejněno se souhlasem probanda)

Pro bezpečí probandů byl na místě neustále přítomen lékař se specializací v anesteziologii, který měl pro případ zhoršení stavu probanda k dispozici i tlakovou láhev s kyslíkem napojenou na samorozpínací vak s dýchací maskou, viz obrázek 4.9.



**Obrázek 4.9:** Prostředí pro lékaře v případě nutnosti první pomoci.

## 4.4 Zpracování dat

V průběhu experimentu byly měřeny následující signály: tlak v dýchacích cestách ( $p_{aw}$ ), průtok v dýchacích cestách ( $q_{aw}$ ), saturace periferní krve kyslíkem ( $SpO_2$ ), frakce kyslíku, oxidu uhličitého a oxidu dusného v dýchací směsi. Pro zpracování naměřených dat byl použit software Matlab 2019b (The MathWorks, Inc., USA), ve kterém byla surová naměřená data sestřihána do záznamů odpovídajícím experimentálním fázím. Ze zpracování bylo nutno z důvodu závažných artefaktů a krátkého času experimentu vyřadit celé záznamy některých fází u probandů 2 a 4. Z důvodu ztráty párových dat byli zmínění probandi vyřazeni z celkového zpracování, ačkoliv jiné fáze nebyly zatíženy artefakty. Z důvodů rozdílných časů ukončení měření mezi probandy byla zvolena časová hranice pro zpracování veškerých naměřených signálů na 180 s od připojení k měřicí soustavě.

Pro výpočet parametrů dechové práce byly zpracovány signály  $p_{aw}$  a  $q_{aw}$ . Signály byly nejprve filtrovány mediánovým filtrem o šířce okna 10 vzorků. Signál  $q_{aw}$  byl vynásoben korekčním koeficientem pro přepočítání z vysokoprůtokové clony HF D-Lite na běžnou clonu D-Lite. Dalším krokem byla detekce jednotlivých respiračních cyklů, které ohraničují intervaly k výpočtu dechové práce. Pro následné zpracování byly uloženy i časové údaje jednotlivých hranic cyklů. Z jednotlivých expiríí/inspiríí byly v dalším kroku pomocí lichoběžníkové metody integrovány dechové cykly a vypočteny parametry  $iWoB$  a  $iPTP$ , které byly rovnou i normovány dle objemů dechů, časové délky dechů a minutové ventilace, která by byla vykonána, pokud by proband daným dechem konstantě dýchal.

Sledovanými parametry u respiračních plynů byly jednotlivé frakce plynů na konci výdechu, tedy frakce oxidu uhličitého na konci výdechu ( $EtCO_2$ ) a frakce kyslíku na konci výdechu ( $EtO_2$ ). Z naměřených záznamů metodou minim a maxim vykresleny jednotlivé hodnoty na konci výdechů, které odpovídají obálkám měřených signálů.

Ze zpracovaných signálů byly poté pomocí vektoru s plovoucími hodnotami a časovým krokem 10 s interpolována data, která by odpovídala hodnotě signálu ve vybrané časové značce 10 s, což by u jednotlivých záznamů nešlo, jelikož se mohl proband pohybovat aktuálně v expirační části či naopak.

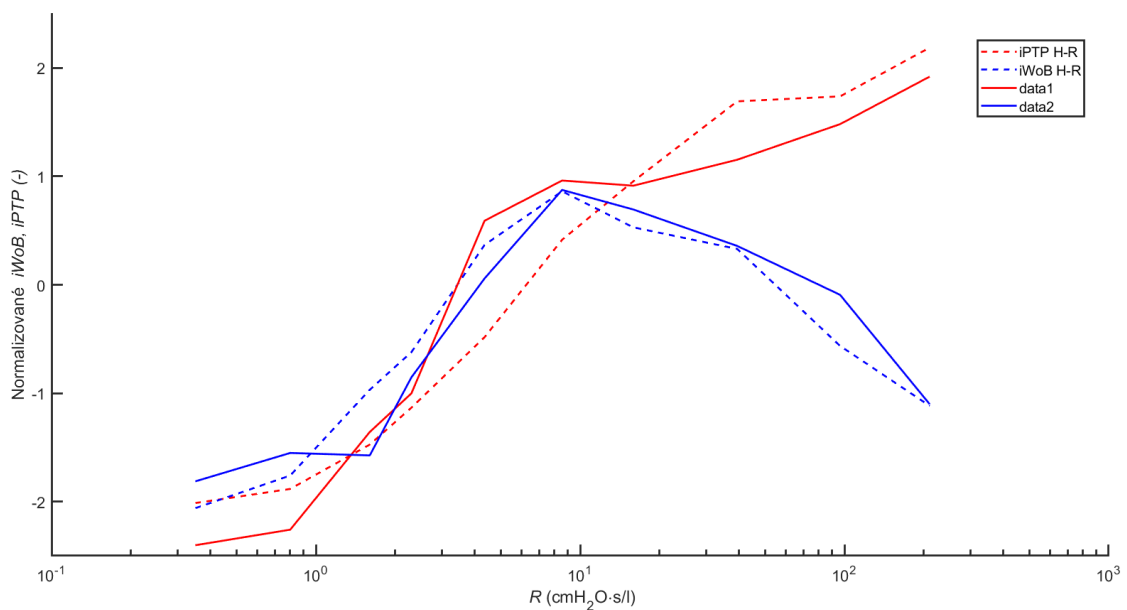
U takto vytvořených záznamů dat byla vypočtena testová statistika sledující signifikanci podobnosti jednotlivých fází experimentu. Ve výsledných grafech je v každé časové značce vykreslena střední hodnota a směrodatná odchylka dané fáze s případným symbolickým značením, pokud došlo k statisticky významné odchylce některé z fází na hladině významnosti 5 %. Jednotlivé soubory byly otestovány na normalitu dat pomocí Chí-kvadrát testu dobré shody. Pro testování podobnosti jednotlivých fází byla užita analýza rozptylu s Bonferroniho ad hoc analýzou pro opakovaná měření. Při vyhodnocení parametru  $SpO_2$  byly vyhodnoceny navíc fáze kompenzace a vzduchové kapsy vůči sobě s delším časovým krokem pomocí párového t-testu na hladině významnosti 5 %.

## 5 Výsledky

V této kapitole jsou uvedeny výsledky laboratorní studie pro výběr vhodného parametru charakterizující dechovou práci. Dále je uvedena charakteristika vyvinutého kompenzačního odporu. V poslední části jsou uvedena zpracovaná data od 11 probandů, kteří prošli experimentem bez výrazných artefaktů limitující zpracování. Prezentované grafy jsou ve formě střední hodnoty a směrodatné odchylky. Statistická významnost je vyobrazena patřičným barevným symbolem u každého záznamu. V celé práci jsou jednoznačně barevně odlišeny jednotlivé fáze experimentu dle následujícího schématu. Plně zasypaný trychtýř bez vzduchové kapsy (fáze F) je vyobrazen červeně. Trychtýř se vzduchovou kapsou a kompenzačním odporem (fáze C) je vyobrazen zeleně. Trychtýř se vzduchovou kapsou (fáze A) je vyobrazen černě.

### 5.1 Studium parametrů *iWoB* a *iPTP* na simulátorech plic

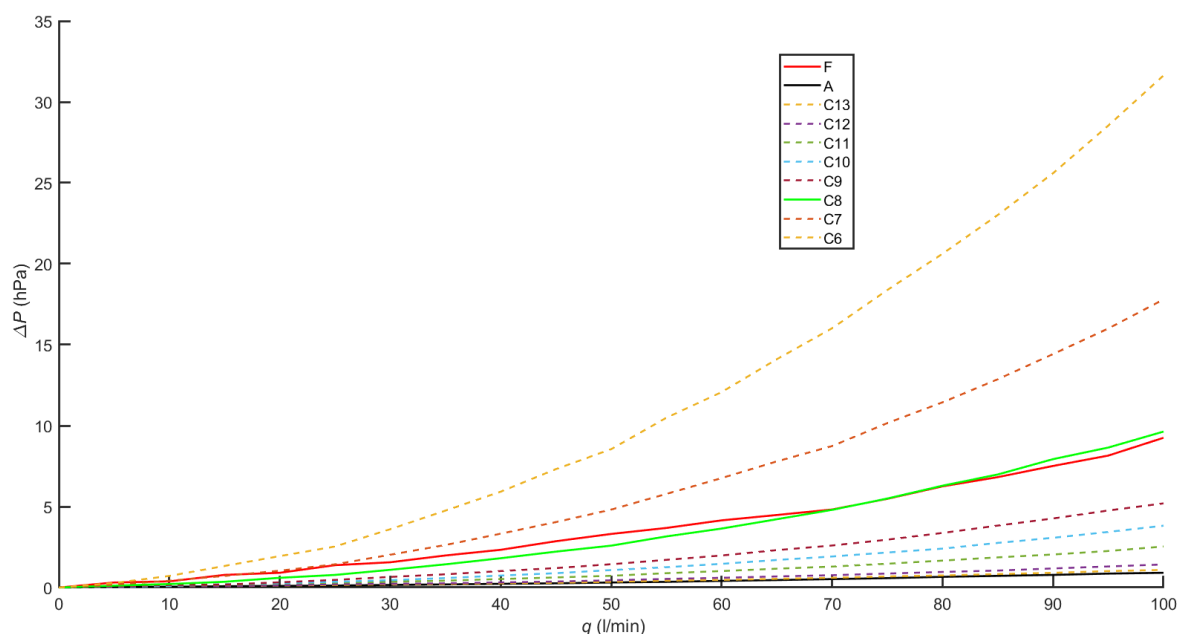
Z první části práce byla naměřená data se simulátoru plic normalizována a vykreslena v jednom grafu pro demonstraci rozdílu vývoje parametrů *iPTP* a *iWoB* při stoupajícím průtočném odporu, viz obrázek 5.1.



Obrázek 5.1: Normalizované parametry *iPTP* (červená) a *iWoB* (modrá).

## 5.2 Vytvořený kompenzační odpor

Pro jednu z fází experimentu byl navržen a vyroben kompenzační průtočný odpor uměle zvyšující dechovou práci probanda. Pro výběr byla proměřena odporová řada centrických kruhových clon a z ní vybrán průtočný odpor s průměrem 8 milimetrů korespondující s odporem plně zasypaného trychtýře, jak je vyobrazeno na obrázku 5.2.

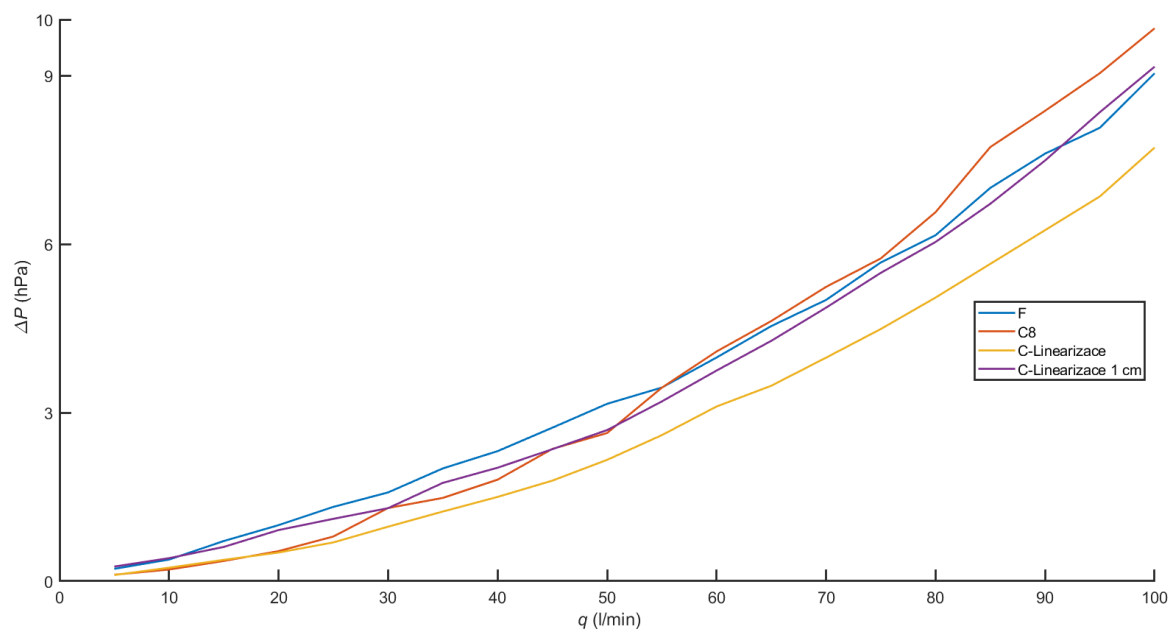


**Obrázek 5.2:** Průtokově-tlakové charakteristiky odporové řady.

Vybraný odpor má však jinou geometrii a zakřivení charakteristiky než model sněhu, tudíž byl změněn profil odporu dle možností tiskárny a proměřena jeho charakteristika. Dle vztahu (3) byl vypočten exponent mocninné funkce dané charakteristiky. Linearizovaná odporová charakteristika kompenzačního odporu je uvedena na obrázku 5.3 a v tabulce 5.1 jsou uvedeny exponenty proložené mocninné funkce plně vasypaného trychtýře, centrické kruhové clonky a linearizované clonky.

**Tabulka 5.1:** Exponenty proložených mocninných funkcí průtokově-tlakových charakteristik užitých odporů.

Užitý odpor	Exponent proložené mocninné funkce (-)
Model sněhu	1,47
Centrická kruhová clona	1,80
Linearizovaná clona	1,66



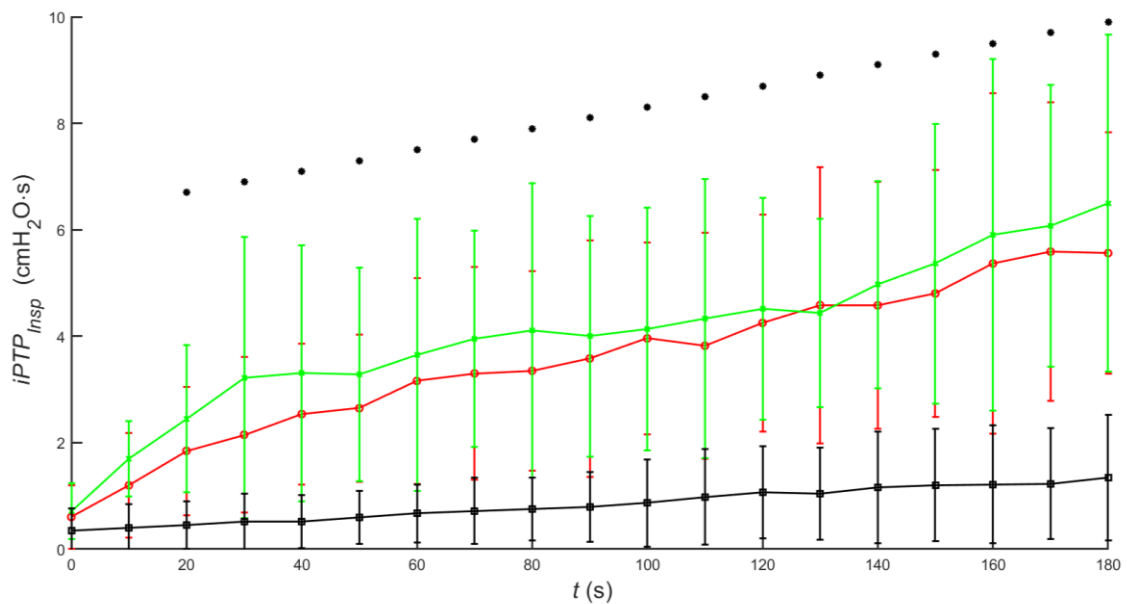
**Obrázek 5.3:** Průtokově-tlakové charakteristiky kompenzačních odporů.

### 5.3 Dechová práce

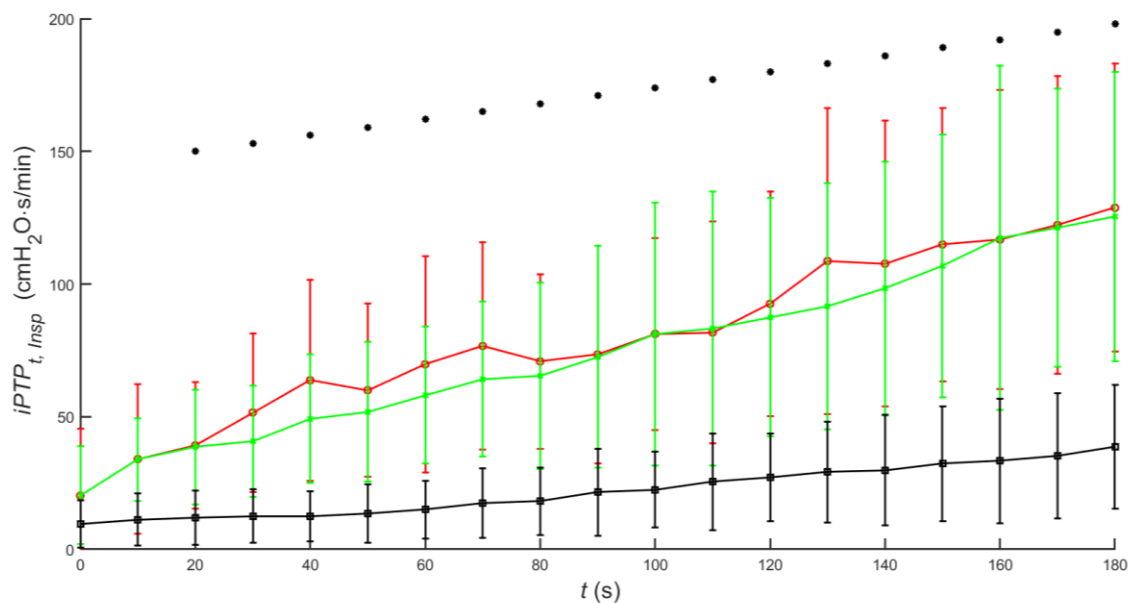
V rámci experimentu byla vyhodnocena navýšená dechová práce probandů a sledována statistická významnost jednotlivých fází experimentu. Z každého sledovaného parametru (*iWoB* a *iPTP*) byly vytvořeny grafy pro inspirační a expirační část včetně normalizování na objem, čas a minutovou ventilaci.

#### 5.3.1 Inspirační *iPTP* a *iWoB*

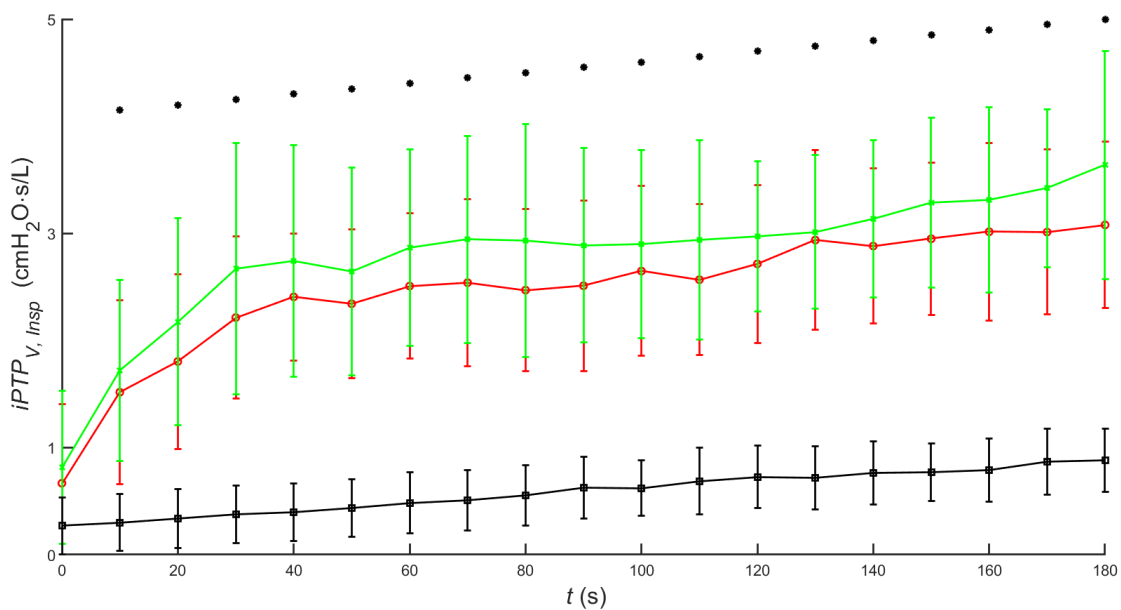
Na obrázcích 5.4 až 5.7 jsou vyobrazeny vývoje inspirační dechové práce popsané parametrem *iPTP*, kterou probandi vynakládali v průběhu experimentu. Statisticky významný rozdíl na hladině významnosti 5 % je zvýrazněn na značkou a barevně odlišen. Barva značky udává fázi odlišnou od zbylých dvou.



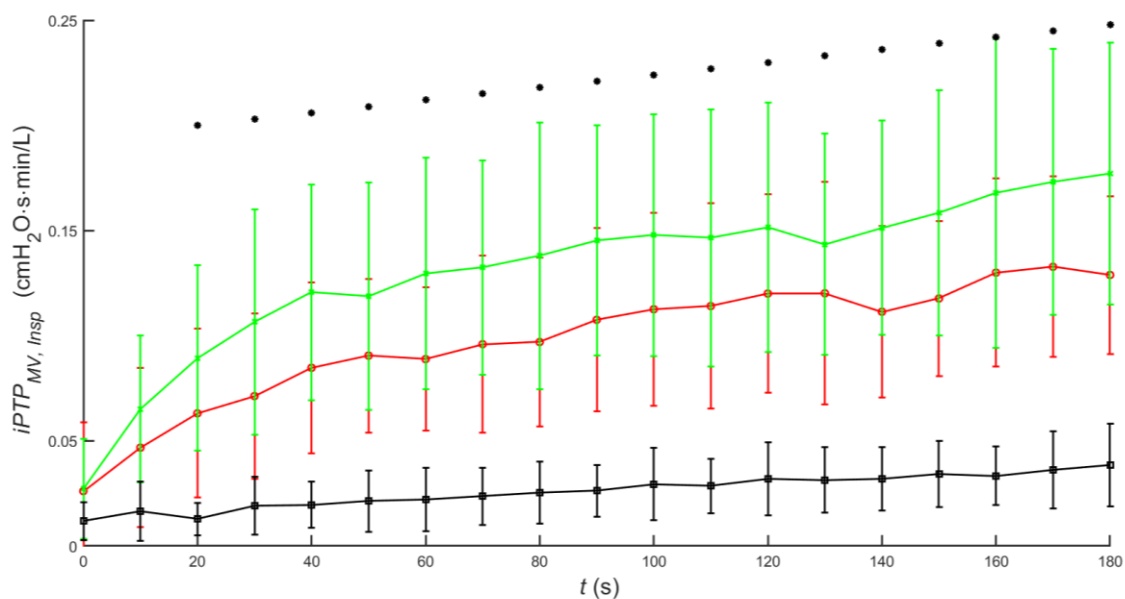
Obrázek 5.4: Časový vývoj parametru *iPTP*.



**Obrázek 5.5:** Časový vývoj parametru  $iPTP$  normalizovaného na dobu dechu.

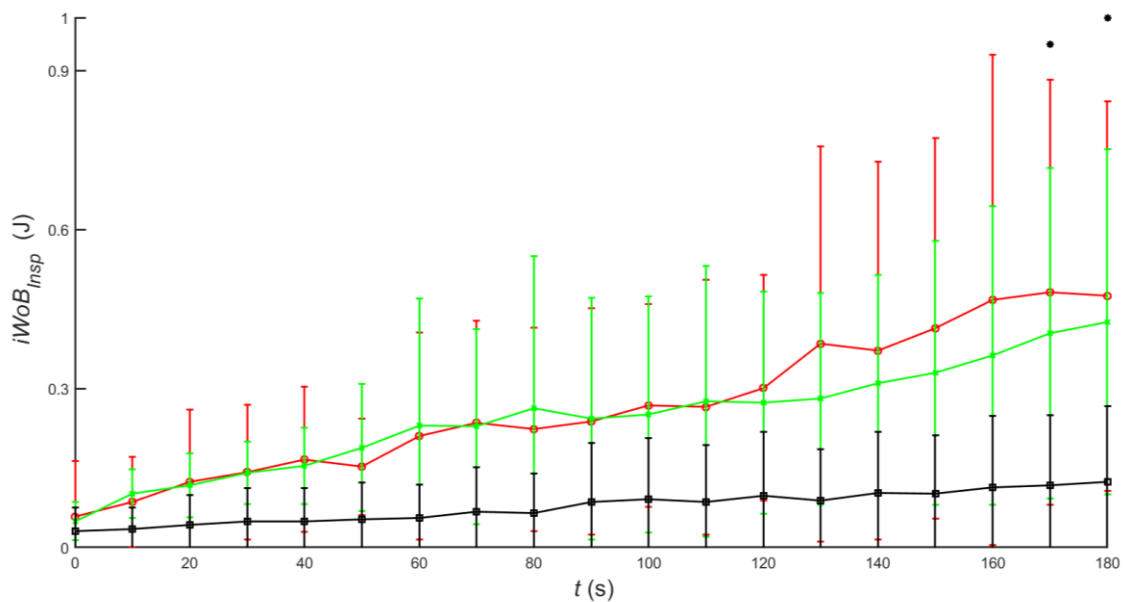


**Obrázek 5.6:** Časový vývoj parametru  $iPTP$  normalizovaného na objem dechu.



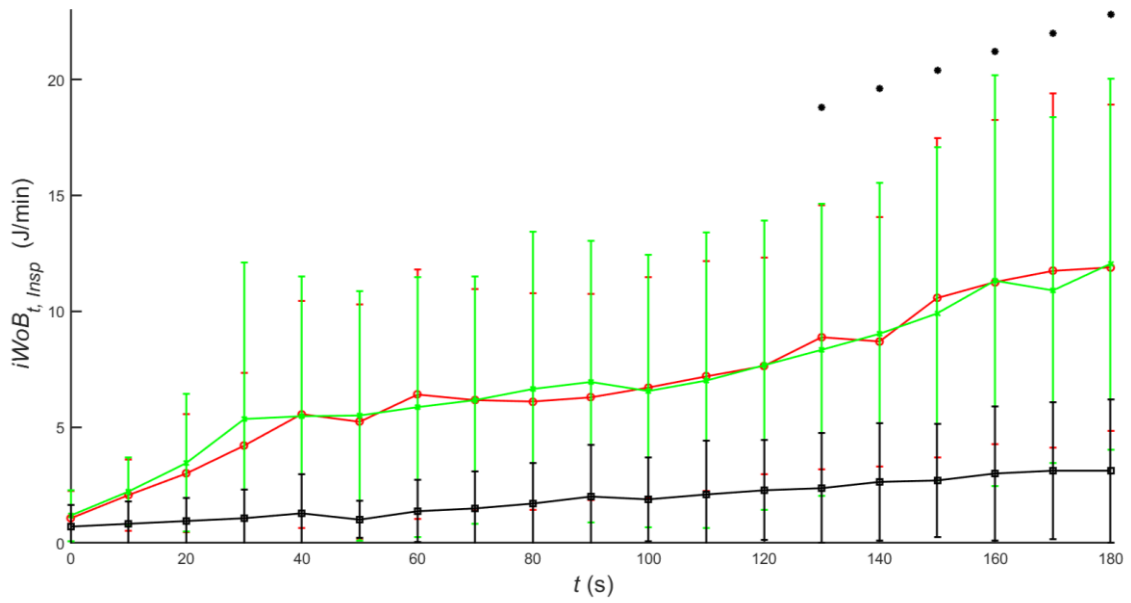
**Obrázek 5.7:** Časový vývoj parametru  $iPTP$  normalizovaného na minutovou ventilaci.

Na obrázcích 5.8 až 5.11 jsou vyobrazeny vývoje inspirační dechové práce popsanou parametrem  $iWoB$ , kterou probandí vynakládali v průběhu experimentu. Statistická rozdílnost fáze A od ostatních je vyjádřena značkou nad záznamem.

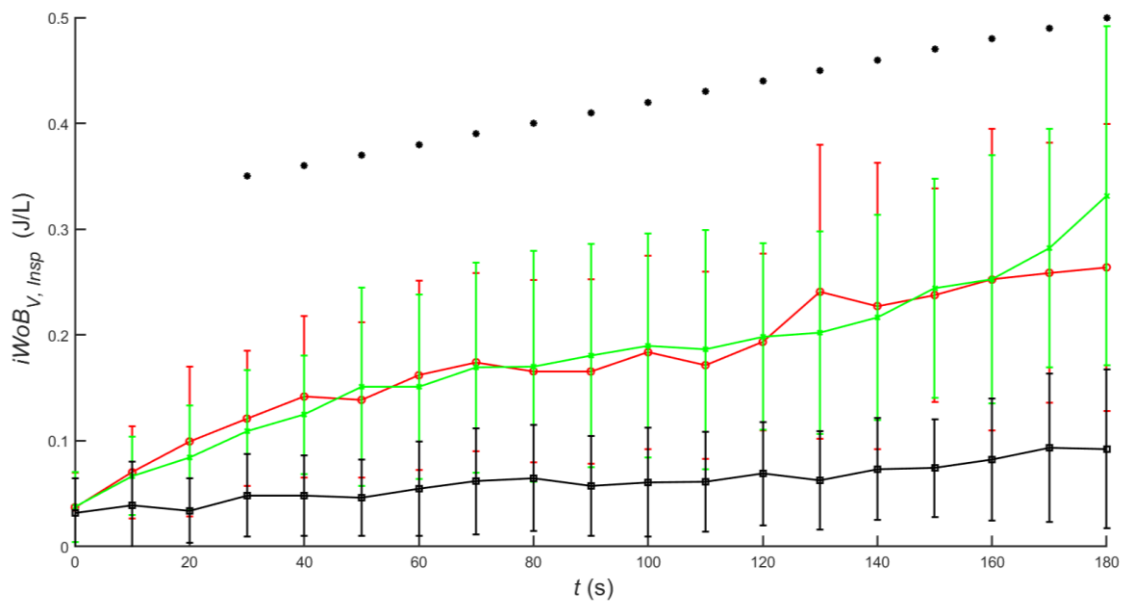


**Obrázek 5.8:** Časový vývoj parametru  $iWoB$ .

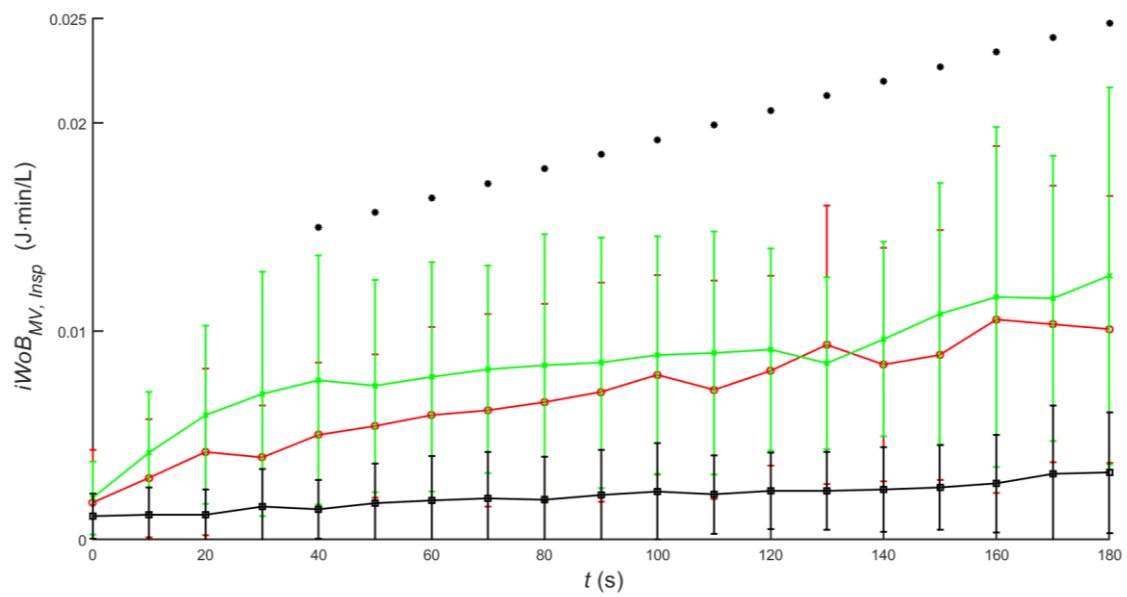




**Obrázek 5.9:** Časový vývoj parametru  $iWoB$  normalizovaného na dobu dechu.



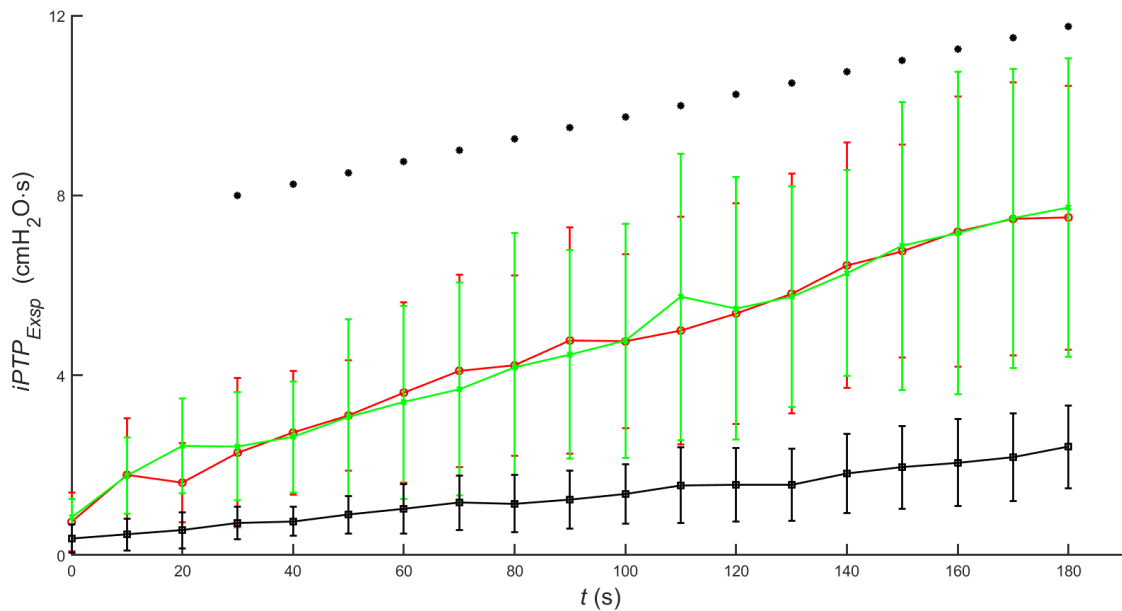
**Obrázek 5.10:** Časový vývoj parametru  $iWoB$  normalizovaného na objem dechu.



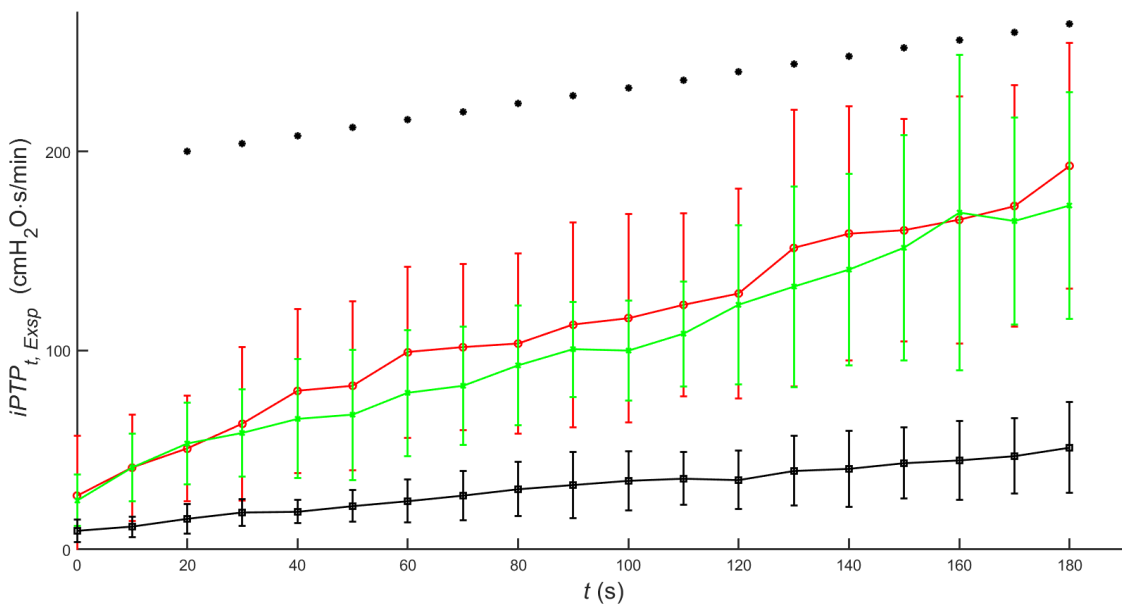
**Obrázek 5.11:** Časový vývoj parametru  $iWoB$  normalizovaného na minutovou ventilaci.

### 5.3.2 Expirační *iPTP* a *iWoB*

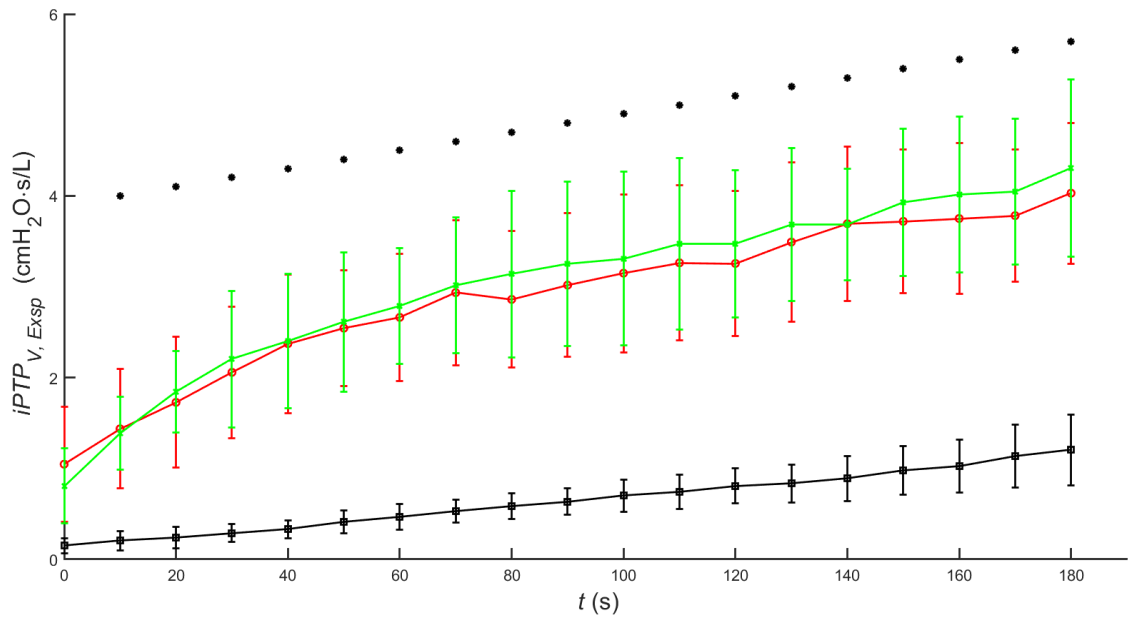
Na následujících obrázcích 5.12 až 5.15 jsou analogicky vyobrazeny vývoje expirační dechové práce popsanou parametrem *iPTP*, kterou probandi vynakládali v průběhu experimentu. Statistický rozdíl fáze A vůči zbylým je označen nad časovým záznamem.



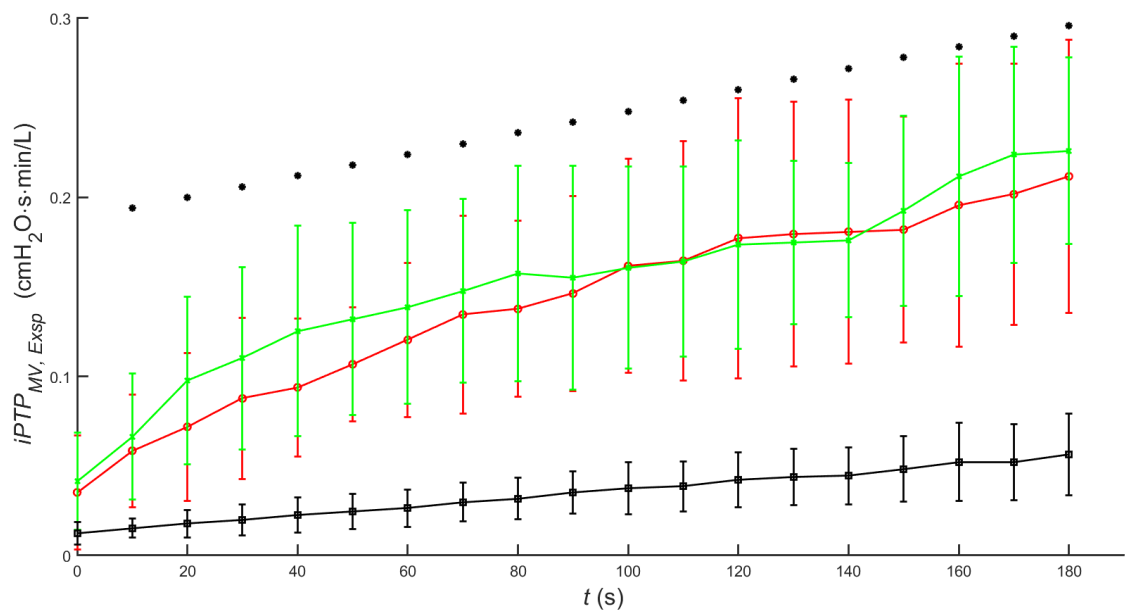
Obrázek 5.12: Časový vývoj parametru *iPTP*.



Obrázek 5.13: Časový vývoj parametru *iPTP* normalizovaného na dobu dechu.

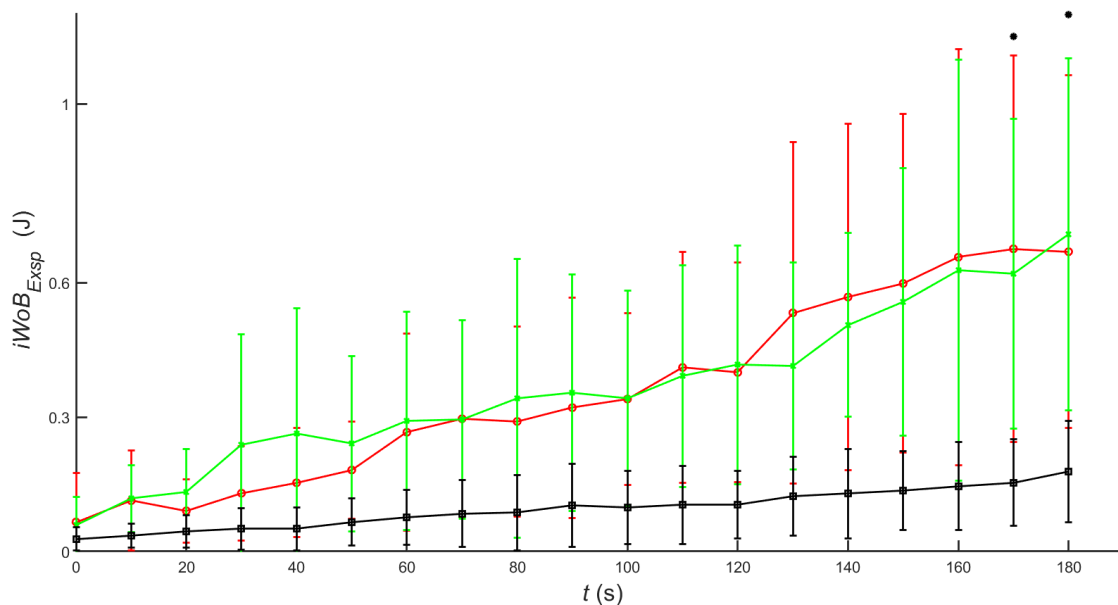


**Obrázek 5.14:** Časový vývoj parametru  $iPTP$  normalizovaného na objem dechu.

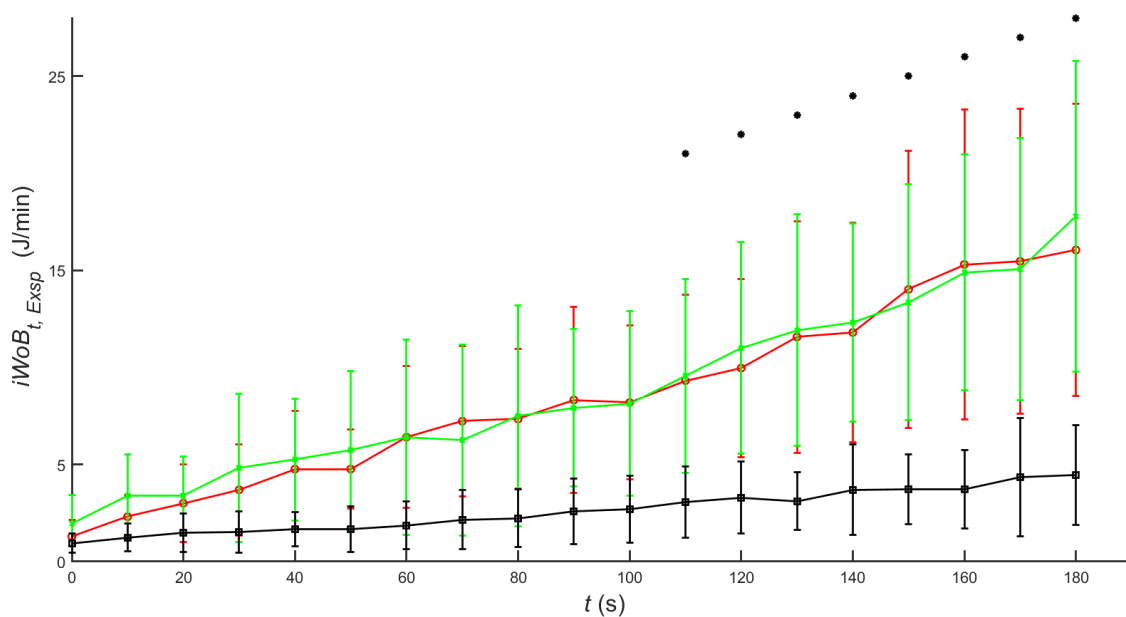


**Obrázek 5.15:** Časový vývoj parametru  $iPTP$  normalizovaného na minutovou ventilaci.

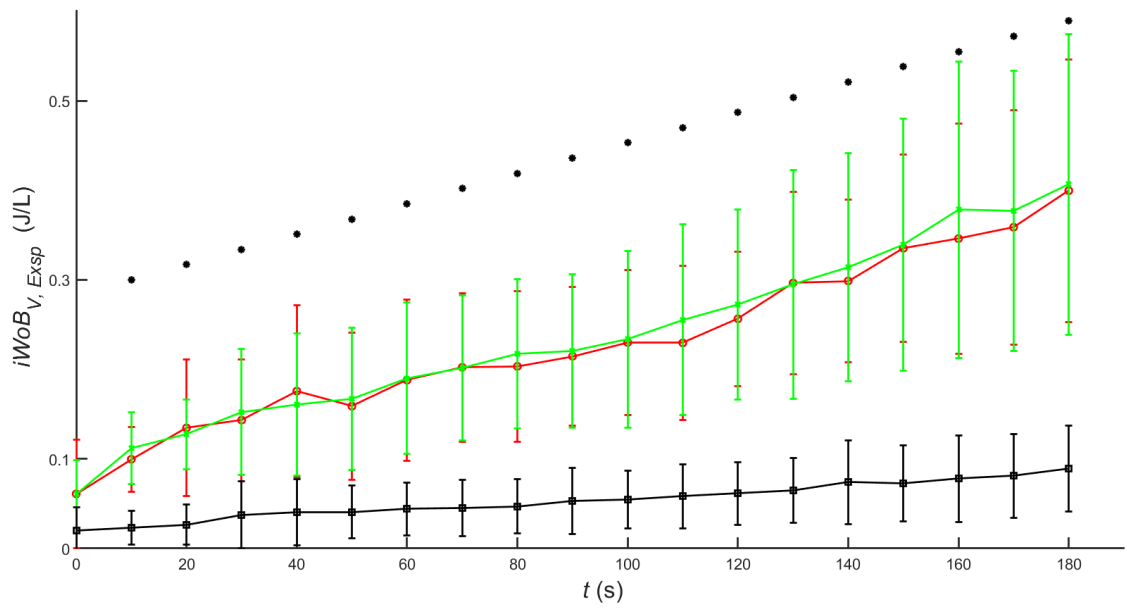
Na obrázcích 5.16 až 5.19 jsou vyobrazeny vývoje expirační dechové práce popsanou parametrem  $iWoB$ , kterou probandi vynakládali v průběhu experimentu. V místech statistického rozdílu fáze A vůči ostatním je označena značkou nad záznamem.



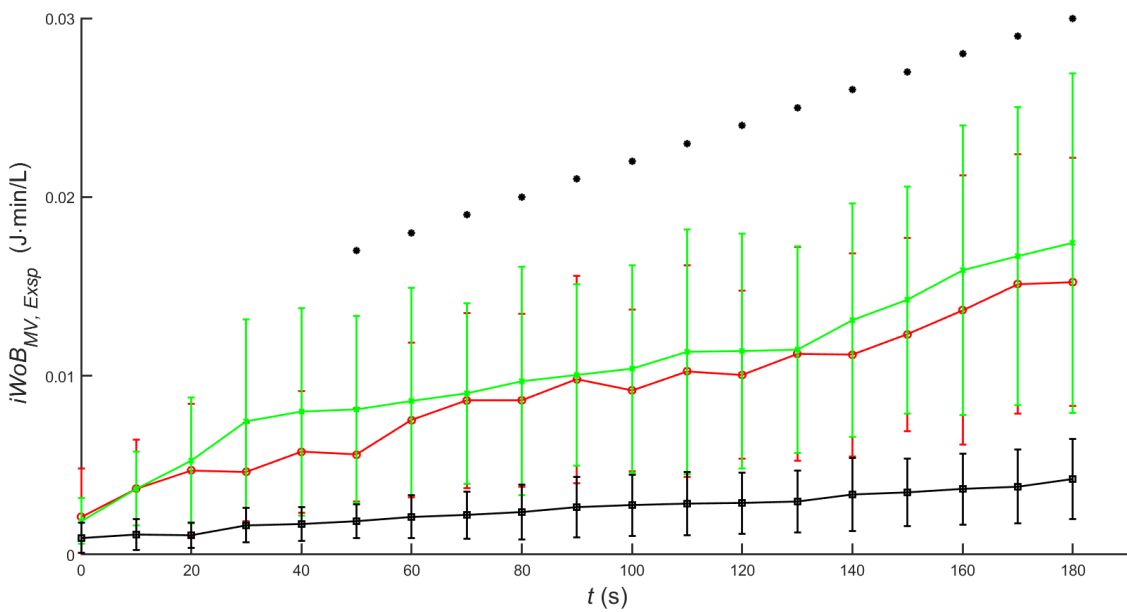
**Obrázek 5.16:** Časový vývoj parametru  $iWoB$ .



**Obrázek 5.17:** Časový vývoj parametru  $iWoB$  normalizovaného na dobu dechu.



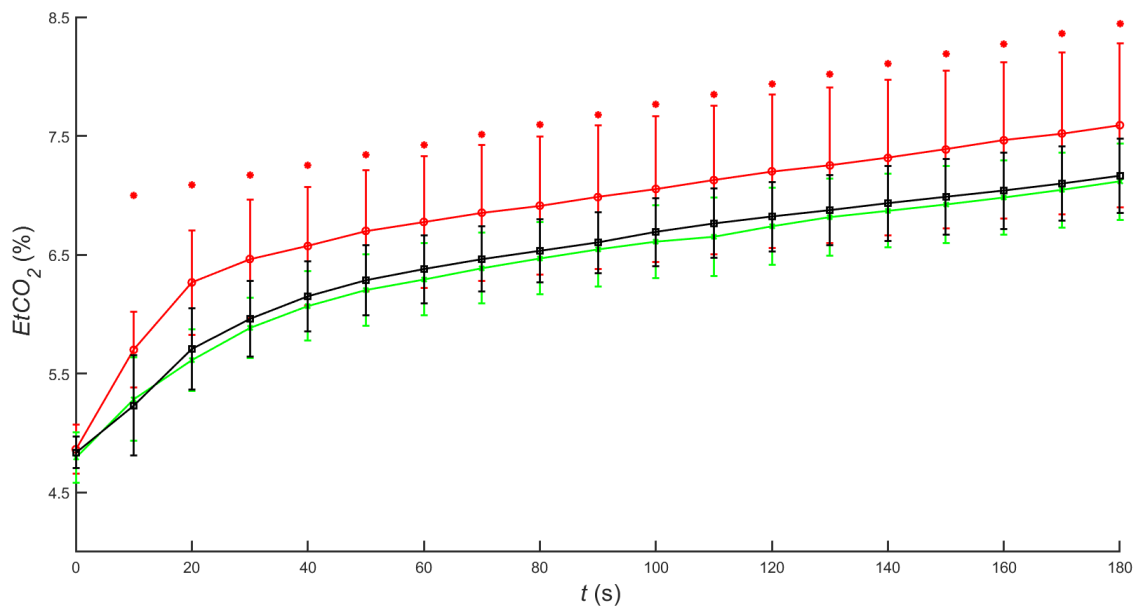
**Obrázek 5.18:** Časový vývoj parametru  $iWoB$  normalizovaného na objem dechu.



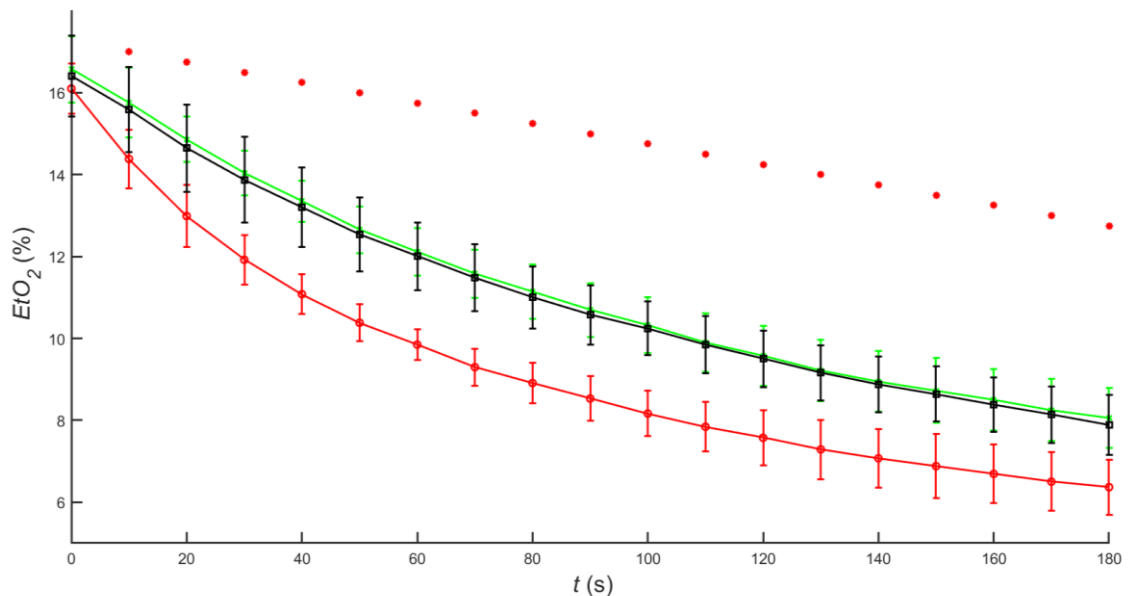
**Obrázek 5.19:** Časový vývoj parametru  $iWoB$  normalizovaného na minutovou ventilaci.

## 5.4 Respirační plyny

Dalším vyhodnocenými parametry jednotlivých fází byly  $EtCO_2$  a  $EtO_2$ , které reflektují vývoj plynů v respirační směsi. Naproti parametru dechové práce je zde vidět opačný vývoj kompenzované fáze, která se podobá samotné vzduchové kapse, což je vidět na obrázcích 5.20 a 5.21. Statisticky významný rozdíl fáze F od fází A a C je označen červenou barevnou značkou.



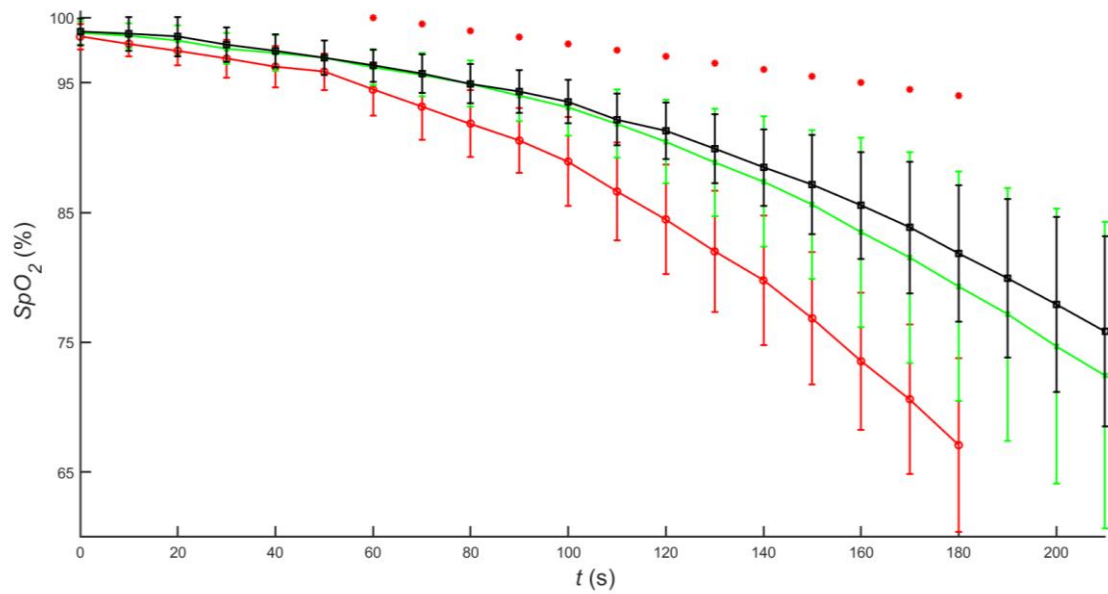
Obrázek 5.20: Vývoj parametru  $EtCO_2$  v čase.



Obrázek 5.21: Vývoj parametru  $EtO_2$  v čase.

## 5.5 Saturace periferní krve kyslíkem

Posledním vyhodnoceným parametrem byl vývoj saturace periferní krve kyslíkem, která reflektuje metabolickou zátěž organismu v jednotlivých fázích experimentu. Jde však o komplexní parametr, který není v přímé návaznosti na respirační soustavu. Parametr  $SpO_2$  v čase je zobrazen na obrázku 5.22.



Obrázek 5.22: Vývoj parametru  $SpO_2$  v čase.



## 6 Diskuse

V této části diplomové práce je uvedena interpretace jednotlivých výsledků práce. První část se věnuje vyhodnocení parametrů vyjadřující dechovou práci, kdy je z měření na simulátorech plic patrný rozdíl mezi *iWoB* a *iPTP*. V následující části je popsán rozdíl mezi průtočnou charakteristikou vybraného modelu sněhu a vytvořeného kompenzačního odporu. Třetí část je věnována hodnocení jednotlivých měřených parametrů při studii na probandech. Nejdříve je popsán vývoj dechové práce pomocí zvolených parametrů *iWoB* a *iPTP* včetně jejich standardizací na dechový objem, dobu dechu a minutovou ventilaci. Jiným úhlem pohledu na průběh studie poté ukazuje vývoj respiračních plynů v jednotlivých fázích, kdy je patrné míchání směsi v přítomné vzduchové kapse. Rozdílná dechová práce a možnost míchat vzduch se poté projevuje v poslední části, kdy má ale každý parametr jinou váhu při ovlivnění vývoje desaturace periferie organismu. V poslední fázi diskuse jsou rozebrány chronologicky veškeré limitace studie.

### 6.1 Volba parametrů pro popis dechové práce

V první části práce byla naměřena pilotní data na simulátorech plic ASL 5000 a HansRudolph. Z normalizovaných parametrů *iPTP* a *iWoB*, které byly dány do jednoho obrázku (obrázek 5.1) je patrný vývojový trend obou parametrů při narůstajícím průtočném odporu dechové dráhy. Dle očekávání dané metodikou výpočtu parametrů však nastává u vysokých hodnot průtočného odporu k omezení průtoku soustavou a parametr je zatížen nepřesností, kdy začínají klesat vypočtené hodnoty *iWoB* na rozdíl od stále rostoucích hodnot *iPTP*, které tedy věrohodněji vypovídají o vynaložené dechové práci. Je tedy patrné, že parametr *iWoB* neuvažuje možnost izometrické kontrakce dýchacích svalů, kdy zdánlivě neproudí žádný vzduch, ale probíhají procesy spotřebovávající kyslík pro udržení svalového tonu. Tyto výsledky jsou ve shodě s diplomovou prací Ing. Poláka [18]. Z hlediska popisu dechové práce je tedy vhodnější užití parametru *iPTP* a při interpretaci parametru *iWoB* je nutné brát v úvahu možnou limitaci danou sníženým průtokem měřicí soustavou, popřípadě využít standardizaci parametru *iWoB* na objem dechu. Standardizace eliminuje problém s nedostatečným průtokem, který je limitovaný průtočným odporem soustavy, a ukazuje potřebné úsilí pro ventilování jednoho litru plynu.

## 6.2 Vytvořený kompenzační odpor

V druhé části byl modelován a vyroben kompenzační odpor pro umělé navýšení dechové práce pro C fázi experimentu, který má exponent proložené mocninné funkce odporové charakteristiky 1,66. Běžné centrické clony se blíží s exponentem proložené mocninné funkce k hodnotě 2. Protože ale nejde vytvořit nekonečně tenkou clonu, tak se šířka clony projeví na snížení hodnoty exponentu. Původně vybraný kompenzační odpor měl před linearizací odporové charakteristiky hodnotu 1,88, jak je patrné z tabulky 5.1. Změnou geometrie průtočného profilu a zvětšením šířky clony na jeden centimetr došlo k částečné linearizaci charakteristiky a snížení exponentu proložené mocninné funkce na hodnotu 1,66. Charakteristika průtočného odporu nicméně nemá plně shodný exponent mocninné funkce jako samotný model sněhu, který má hodnotu 1,47 a vyjadřuje přechod mezi kvadratickou a lineární odporovou charakteristikou. Rozdílnost exponentů jednotlivých charakteristik se na měřeném rozsahu příliš neprojevuje, avšak při vyšších hodnotách průtoku se tento rozdíl může výrazně zvýšit. Nepředpokládá se však, že by byli probandi schopni vyvinout tak vysoké průtoky, kdy by se projevila rozdílnost koeficientů jednotlivých odporových charakteristik.

## 6.3 Vývoj parametrů *iWoB* a *iPTP* při experimentu na probandech

Z hlediska parametru *iPTP* došlo od 30 sekund po připojení k statisticky významným rozdílům dechové práce u fáze F a C oproti fázi A, a to v expirační i inspirační části dechového cyklu. Dle očekávání se během připojení dostávali probandi dostávali do stavu hyperventilace, kdy navyšovali dechovým úsilím tlak v dechové dráze. Z hlediska absolutních hodnot je patrné, že je při expirační fázi docházelo ke zvýšenému úsilí, což odpovídá subjektivním hodnocením probandů po experimentu. Shodli se, že bylo obtížné dostatečně exspirovat z důvodu odporu soustavy, ve které byl zvýšený tlak. Podobně jako ve studii Roubíka et al. [19] došlo u parametru *iPTP* ke statisticky významnému rozdílu po 15 sekundách od připojení k soustavě. Tato skutečnost je dána okamžitým zvýšením tlaku v dechové dráze, což je způsobeno dechovým úsilím, které musí proband vynaložit pro zajištění dostatečné ventilace.

Druhým pohledem na dechovou práci je parametr *iWoB*, u kterého však na rozdíl od předchozího parametru nedocházelo k okamžitým statistickým významným rozdílům. Významný rozdíl začínal až ke konci záznamu, ačkoliv mají křivky narůstající trend odpovídající zvyšující se dechové práci. Probandi tedy vykonávali stále se zvyšující dechovou práci, ale bez zohlednění velikosti jednotlivých dechů nedošlo ze statistického hlediska k rozdílu fází. Rozdíl je patrný u jednotlivých normalizací, zejména tedy normalizaci na objem, kdy je statisticky významný rozdíl fází F a C vůči A patrný od 30 sekund po připojení u expirační i inspirační části dechového cyklu. Podobný výsledek ukazuje i vývoj dechové práce při normování na minutovou ventilaci. Vykonané

dechové úsilí popsané parametrem  $iWoB$  není mezi fázemi významné, pokud však vezmeme v potaz velikost jednotlivých dechových objemů, tak probandi vynaložili významně rozdílné úsilí vztažené na jednotku objemu, popřípadě minutovou ventilaci ve fázích F a C vůči fázi A.

Při porovnání parametrů je tedy patrné, že parametr  $iWoB$  není zcela vhodný pro popis dechové práce, nicméně jeho standardizace na jednotku objemu, případně minutovou ventilaci řeší rozdílnost dýchání u jednotlivých probandů, která způsobuje minimální statistickou rozdílnost jednotlivých měřených fází. Při obstrukční ventilační insuficienci probandi lehce navýší tlak v systému, což zvyšuje jejich metabolickou zátěž, ale samotný průtok může být rozdílný. Tento problém lze tedy řešit standardizací na jednotku objemu, případně na minutovou ventilaci. Pro popis dechové práce lze tedy doporučit standardizované parametry  $iWoB_V$  a  $iPTP_V$ , případně  $iWoB_{MV}$  nebo  $iPTP_{MV}$ .

## 6.4 Vývoj respiračních plynů při experimentu na probandech

Odlišné výsledky však poskytuje pohled na respirační plyny. Zde se kompenzační fáze C blíží fázi A, což odpovídá možnosti míchat okolní vzduch, který je respirován. Proband tedy ve fázích C a A mohl exspirovat alveolární plyny do prostoru kde se promíchaly a koncentrace jednotlivých plynů nebyly na takových úrovních jako v případě fáze F. Při plně zasypaném trychtýři proband exspiroval plyny jen do modelu sněhu a mrtvého prostoru aparatury. Alveolární plyny, které mají nejvyšší koncentraci oxidu uhličitého a nejmenší koncentraci kyslíku, byly ihned opět inhalovány a docházelo tedy k rychlejšímu nástupu hypoxie. V obrázcích 5.20 a 5.21 nastává statisticky signifikantní rozdíl už během 10 sekundy záznamu u obou parametrů  $EtCO_2$  i  $EtO_2$ . Ve studii Roubíka et al. [19] nastává statisticky významný rozdíl až minutu po připojení u parametru  $EtCO_2$  a pro  $EtO_2$  byla tato doba výrazně delší. Nutno však podotknout, že zkoumaná vzduchová kapsa v tomto případě byla polovičního objemu a měření probíhalo na reálném sněhu.

## 6.5 Vývoj parametru $SpO_2$ při experimentu na probandech

Z hlediska měření doby přežití byl sledován parametr  $SpO_2$ , ze kterého je patrný vliv navýšené dechové práce i možnost cirkulovat a míchat vzduch ve vzduchové kapse. Na obrázku 5.22 je vidět statisticky významný rozdíl fáze F od ostatních po jedné minutě od připojení. Tento rozdíl je patrný i ve studii Roubíka et al. [19]. Z obrázku je také vidět vliv navýšené dechové práce u fáze C, kdy hodnota  $SpO_2$  klesá rychleji než fáze u A, nicméně není tento rozdíl na hladině významnosti 5 % statisticky významný. Samotný parametr  $SpO_2$  je však komplexní, kdy inspirovaný vzduch na alveolárním rozhraní předává kyslík a přijímá oxidu uhličité. Předaný kyslík prochází oběhovým systémem a až v poslední fázi se dostává do periferního řečiště. Mezi inspirovaným vzduchem a periferní cirkulací je tedy přechod dvou systémů, které se odrážejí na výsledné hodnotě parametru  $SpO_2$ , a v neposlední řadě i metabolismus. Neexistuje tedy přímá kauzalita.

Spojením výše uvedených pohledů na vývoj doby přežití při výskytu vzduchové kapsy je následující zjištění. Na vyhodnoceném časovém záznamu museli probandi vynakládat ve fázích F a C podobnou dechovou práci, což je patrné z jednotlivých obrázků mapující vývoj parametru *iPTP* a *iWoB* při expirační i v inspirační části dechového cyklu. Nicméně z hlediska vývoje respiračních plynů byla patrná podobnost fáze A a C, jelikož moli probandi míchat vzduch ve vytvořeném prostoru vzduchové kapsy i přes vytvořenou obstrukci, která uměle navyšovala dechovou práci. Lze tedy tvrdit, že na vyhodnoceném časovém úseku neměla navýšená dechová práce významný vliv na dobu přežití na rozdíl od možnosti míchat si respirovaných vzduch a zlepšit tím profil jednotlivých dechů. Pokud byl proband plně zasypán, tak byl nucen ihned inspirovat vzduch, který byl bohatý na oxid uhličitý vyloučený z plic. Přítomnost vzduchové kapsy pozitivně ovlivňující dobu přežití při zavalení tedy neznamená jen snížení odporu dechové dráhy, ale spíše možnost dýchat promíchanou směs plynů. Otevírá se tedy cesta pro potvrzení toho faktoru u budoucích prací.

## 6.6 Limitace práce

V rámci měření pilotních dat na simulátorech plic je nutno zmínit limitace simulátoru ASL, kdy podle studie [28] dochází k chybné simulaci dechových cyklů při nízkých hodnotách průtočného odporu modelu v řádu desetin  $\text{cmH}_2\text{O}\cdot\text{s}\cdot\text{L}^{-1}$ . Lze vidět i na obrázku 5.1, že hodnoty parametru *iWoB* u prvních dvou měření odporové dekády vykazují vyšší hodnoty než simulátor HansRudolph, který se zdá být robustnější a odolnější vůči krajním hodnotám měřeného spektra. Z tohoto důvodu bylo užito dvou simulátorů pro dostatečnou analýzu parametru dechové práce.

Z hlediska návrhu kompenzačního odporu je největší limitací volba metody, ačkoliv je kyselina polymléčná zdravotně nezávadný a biodegradabilní a materiál, tak nutno myslet na technologii výroby modelů. Jednotlivé vrstvy mohou obsahovat velice malé mezery způsobující netěsnosti, čemuž se však dle veškerých postupů a kalibrací samotné tiskárny dostatečně zabránilo. Velkým faktorem však zůstává možnost tisknout modely jen do určité rozlišovací schopnosti, kterou udává průměr trysky použité tiskárny. Při návrhu se došlo na technologický limit, jenž byl ještě možný použít, aniž by ve struktuře kapilár nevznikaly nehomogenity. Samotný kompenzační odpor by kopíroval odporovou charakteristiku perlitu, který vykazuje přechod mezi lineární a parabolickou charakteristikou, pokud by bylo možno tisknout co nejvíce kapilár s malým průměrem. Tento postup by byl možný za využití nové technologie 3D tisku, která užívá vytvrzení jednotlivých vrstev tekutého média UV světlem. Nicméně je opět tento typ tisku limitován svojí rozlišovací schopností. Další významnou nevýhodou je samotné médium, kterým bývá pryskyřice, který až na výjimky postrádá výhody materiálu PLA, nehledě na potřebu výsledný model dostatečně vysušit od přebytečného nevytvrzeného materiálu. Druhým faktorem ovlivňující zamýšlenou funkci kompenzačního odporu je měření odporových charakteristik jen v expirační fázi dechového cyklu z důvodu

obtížnosti realizace těsnícího víka na horní část použitého plechového kužele, ke kterému by byl připojen zdroj stlačeného vzduchu. Avšak jako u měření na simulátorech v metodických postupech nijak nefiguruje kompenzační mechanismy, kterými tělo reaguje na změnu respiračních podmínek. Samotný vytvořený odpor je symetrický, tudíž se nepředpokládá změna charakteristiky v závislosti na orientaci průtoku.

Dalším limitujícím faktorem této práce lze považovat měřicí segment dechové dráhy probanda. Za kompenzačním odporem by měl být v ideálním případě umístěn ihned proband dýchající do soustavy. Za vysokoprůtokovou clonou, odběrovým místem pro respirační plyny následoval úsek vřapové hadice s filtrem a náustkem pro probanda. Vznikl tudíž mrtvý prostor navyšující pomyslnou vzduchovou kapsu. Velikost tohoto mrtvého prostoru však byla okolo 120 mL, což odpovídá 6 % navyšení vzduchové kapsy.

Práce navíc zkoumala pouze obstrukční část navyšení dechové práce pomocí umělého průtočného odporu, případně modelu sněhu. Z hlediska restriktivní části ovlivňující dechovou práci vlivem snížení poddajnosti hrudní stěny byli probandu zatíženi jen samotnou polohou, ve které dýchali. Každý proband byl v poloze na břicho a zapřený o lokty. V reálném prostředí nastává výrazné omezení způsobené závalem, což signifikantně omezuje možnost expanze hrudního koše.

Ke konci záznamu (obrázek 5.22) je patrný pokles i pod hodnotu limitace sekundárního parametru  $SpO_2$  pod 75 %. Nutno podotknout, že hlavní limitaci danou parametrem  $EtCO_2$  nikdo nepřekonal, případně byli probandi odpojeni od soustavy. Aktuální články věnujícím se lavinovému experimentu pracují s myšlenkou substituce parametru  $SpO_2$  za parametr regionální mozkové oxygenace pomocí metody NIRS. Při ventilační insuficienci nastává náhlý pokles okysličené krve v periférii, což ukazuje parametr  $SpO_2$ , nicméně data z regionální oxygenace ukazují, že je mozek stále dostatečně zásoben okysličenou krví a reaguje na náhlý přísun kyslíku daleko rychleji než parametr  $SpO_2$ . Lze tedy hovořit o určité centralizaci přísunu kyslíku do mozku jako kompenzační mechanismus [29, 30]. Ačkoliv byl parametr regionální oxygenace měřen, tak nebyl zvolen z důvodu velké míry artefaktů a problémovému umístění u probandů. Navíc by nebylo možné výsledky adekvátně porovnávat s jinými pracemi.

Na konci experimentu bylo s probandy veden rozhovor pro získání subjektivních názorů na průběh měření z pohledu účastníka studie. Každý z probandů měl svůj přístup, jak se s insuficiencí vyrovnat, nicméně se majoritní většina shodla na obtížnostech jednotlivých fází, kdy za nejtěžší vždy považovali fázi F. Navíc je i ze záznamů patrný rozdíl mezi probandy. Původní studie věnující se lavinovému závalům měla za probandy trénované jedince, u nichž byla jejich fyzická zdatnost uniformní. Do studie byla přizváno široké spektrum osob s různým aktivním vyžitím. Výrazná úspěšnost ve všech fázích experimentu byla u probandů, kteří uvedli že aktivně plavou, hrají na dechový nástroj, aktivně cvičí nebo běhají. Pro získání konzistentních datových záznamů a delších časových úseků pro zpracování by bylo vhodnější výběr probandů specifikovat.

## 7 Závěr

V rámci diplomové práce proběhla laboratorní studie parametrů *iPTP* a *iWoB* vyjadřující velikost dechové práce. Pro popis dechové práce je vhodné využít parametru *iPTP*, případně standardizovaných parametrů *iWoB<sub>V</sub>*, *iPTP<sub>V</sub>*, *iWoB<sub>MV</sub>* nebo *iPTP<sub>MV</sub>*. Tyto parametry zohledňují míru vykonané dechové práce potřebnou pro ventilaci jednoho litru vzduchu. Dále byla koncipována studie zahrnující 13 probandů a tři fáze měření, které testovaly parametr navýšené dechové práce při uměle navozené ventilační insuficienci způsobené dýcháním do modelu sněhu simulující lavinový zával. Pro jednu z fází studie byl navržen a vyroben kompenzační odpor, který nutil probandy vynakládat dechovou práci shodnou se stavem úplného zasypání, ačkoliv bylo možno dýchat do dutiny. Z dílčích výsledků je patrné, že ačkoliv byla uměle navýšena dechová práce probanda, tak se vývoj respiračních plynů podobal stavu dýchání do čisté vzduchové kapsy.

Lze předpokládat, že pozitivní účinky vzduchové kapsy spočívají v možnosti míchat a cirkulovat vzduch. Tento jev umožňuje promíchání alveolárních plynů, které jsou při výdechu silně hypoxickou směsí. V případě úplného závalu je proband nucen inspirovat tuto směs, která jako poslední opouští respirační soustavu. Z výsledků vývoje saturace periferní krve kyslíkem je patrný vliv navýšené dechové práce, nicméně není statisticky významný na sledovaném časovém úseku. Větší vliv na vývoj parametru *SpO<sub>2</sub>* lze hledat u možnosti míchat vzduch a tím si zlepšit profil jednotlivých respiračních plynů, což může být námět pro navazující vědecké práce v tomto poli výzkumu.

# Seznam použité literatury

- [1] BRUGGER, Hermann, et al. Resuscitation of avalanche victims: evidence-based guidelines of the international commission for mountain emergency medicine (ICAR MEDCOM): intended for physicians and other advanced life support personnel. *Resuscitation*, 2013, 84.5: 539-546.
- [2] MCINTOSH, Scott E., et al. Cause of death in avalanche fatalities. *Wilderness & environmental medicine*, 2007, 18.4: 293-297.
- [3] PROCTER, Emily, et al. Burial duration, depth and air pocket explain avalanche survival patterns in Austria and Switzerland. *Resuscitation*, 2016, 105: 173-176.
- [4] HAEGELI, Pascal, et al. Comparison of avalanche survival patterns in Canada and Switzerland. *Cmaj*, 2011, 183.7: 789-795.
- [5] RADWIN, Martin I.; GRISSOM, Colin K. Technological advances in avalanche survival. *Wilderness & environmental medicine*, 2002, 13.2: 143-152.Sd
- [6] GRISSOM, Colin K., et al. Hypercapnia increases core temperature cooling rate during snow burial. *Journal of Applied Physiology*, 2004, 96.4: 1365-1370.
- [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] HOHLRIEDER, Matthias, et al. Pattern and severity of injury in avalanche victims. *High altitude medicine & biology*, 2007, 8.1: 56-61.
- [12] RADWIN, Martin I.; KEYES, Lany; RADWIN, Donna L. Avalanche air space physiology. In: *Proceedings International Snow Science Workshop*. 1998. p. 296.
- [13] TRUHLÁŘ, Anatolij, et al. European resuscitation council guidelines for resuscitation 2015: section 4. Cardiac arrest in special circumstances. *Resuscitation*, 2015, 95: 148-201.
- [14] RATNOVSKY, Anat; ELAD, David; HALPERN, Pinchas. Mechanics of respiratory muscles. *Respiratory physiology & neurobiology*, 2008, 163.1-3: 82-89.
- [15] SASSOON, C. S. H.; MAHUTTE, C. K. Work of breathing during mechanical ventilation. *Lung biology in health and disease*, 1998, 118: 261-310.

- [16] CABELLO, Belen; MANCEBO, Jordi. Work of breathing. *Applied Physiology in Intensive Care Medicine* 1, 2012, 11-14.
- [17] COLLETT, P. W.; PERRY, C.; ENGEL, L. A. Pressure-time product, flow, and oxygen cost of resistive breathing in humans. *Journal of Applied Physiology*, 1985, 58.4: 1263-1272.
- [18] POLÁK, Jiří. *Hodnocení dechové práce*. 2017. Master's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [19] ROUBÍK, Karel; SIEGER, Ladislav; SYKORA, Karel. 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*, 2015.
- [20] PAAL, Peter, et al. Factors affecting survival from avalanche burial—A randomised prospective porcine pilot study. *Resuscitation*, 2013, 84.2: 239-243.
- [21] BRUGGER, Hermann, et al. Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in snow: implications for avalanche survival. *Resuscitation*, 2003, 58.1: 81-88
- [22] 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.
- [23] GRISSOM, Colin K., et al. Respiration during snow burial using an artificial air pocket. *Jama*, 2000, 283.17: 2266-2271.
- [24] ROUBIK, Karel, et al. MATERIALS SUITABLE TO SIMULATE SNOW DURING BREATHING EXPERIMENTS FOR AVALANCHE SURVIVAL RESEARCH. *Lékař a technika-Clinician and Technology*, 2020, 50.1: 32-39.
- [25] 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.
- [26] ŠILAR, Jan; JEŽEK, Filip; KOFRÁNEK, Jirí. PDEModelica and Breathing in an Avalanche. In: *Proceedings of the 12th International Modelica Conference, Prague, Czech Republic, May 15-17, 2017*. Linköping University Electronic Press, 2017. p. 367-372.
- [27] Bís, Ladislav. *Návrh vysokoprůtokové clony pro ventilační experimenty*. 2020. Bachelor's Thesis. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum.
- [28] STRÁNSKÁ, M.; ROUBÍK, K.; ROŽÁNEK, M. ASL 5000 lung model fails to simulate preset mechanical parameters during HFJV and volume control ventilation with a decelerating flow waveform in some ventilators. *RN*, 2014, 1050: 5600i.
- [29] STRAPAZZON, Giacomo, et al. Effects of hypothermia, hypoxia, and hypercapnia on brain oxygenation and hemodynamic parameters during simulated avalanche burial: a porcine study. *Journal of Applied Physiology*, 2021, 130.1: 237-244.
- [30] 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, nemecest3@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 přikládaných 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

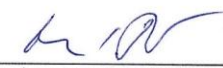
Projekt byl schválen etickou komisí FBMI ČVUT dne: 10. 2. 2021      platný do: 6/2021  
pod číslem: 04/2021

Etická komise FBMI ČVUT v Praze, ve složení Mgr. Martina Šliková (předsedkyně), RNDr. Taňa Jarošíková, CSc., MUDr. Radek Matlach, Ing. Lucie Škorňoková a Ing. Petr Kudrna, Ph.D., zhodnotila předložený projekt a neshledala žádné rozporů 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  
řazítka 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

## Syllabus výzkumného projektu

A: Základní údaje o výzkumném projektu:	
Název projektu: Dechová práce v podmínkách extrémní hyperkapnie navozené ventilační insuficiencí	
Název anglicky: Work of Breathing under extreme hypercapnia induced by ventilation insufficiency	
Typ studie:	<input checked="" type="checkbox"/> intervenční <input checked="" type="checkbox"/> prospektivní <input type="checkbox"/> observační <input type="checkbox"/> retrospektivní
Půjde o práci:	<input checked="" type="checkbox"/> s osobami <input type="checkbox"/> s laboratorními zvířaty
Cíl projektu, testovaná hypotéza: 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.	
Přínos projektu v technické, diagnostické, léčebné oblasti, pro lékařské poznání nebo individuální subjekt hodnocení: 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.	
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.)

Popis nakládání se subjekty, popis intervence, odebírání vzorků apod.:

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.

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 oporů hlavním měřicí aparatury. Následovat bude dýchání do mokrého perlitu o definovaném objemu 50 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.

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.

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 ověřovací 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: Doplňující 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 mokrý 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>Tiffeneauv 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	<i>Štěpán Němec</i>	<input type="checkbox"/>
„Perlit operátor“	Přesypává perlit, zapojuje a čistí ventilační prvky	<i>Štěpán Němec</i>	<input type="checkbox"/>
„Logger“	Provádí záznam dat na počítači	<i>Šimon Walzel / Ladislav Bís</i>	<input type="checkbox"/>
Doktor	Provádí spirometrické vyšetření, hlídá stav probanda	<i>MUDr. Lenka Horáková</i>	<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)	100	80	60	40	20
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:

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

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

Průtok Q (l/min)	100	80	60	40	20
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 začátku příprav</b>

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

Průtok Q (l/min)	100	80	60	40	20
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:

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).

Měření probíhalo	ID probanda	Vytvořil
		Němec Š.

