



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**  
**Katedra biomedicínské techniky**

**Vliv dechového vzoru na přežití člověka  
zasypaného lavinových sněhem**

**Effect of respiratory pattern on survival time  
on human covered by avalanche snow**

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: David Chadima

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Václav Ort

---

**Kladno 2018**

Katedra biomedicínské techniky

Akademický rok: 2016/2017

## Z a d á n í   b a k a l á ř s k é   p r á c e

Student: **David Chadima**  
Obor: Biomedicínský technik  
Téma: **Vliv dechového vzoru na dobu přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem**  
Téma anglicky: Effect of respiratory pattern on survival time of human covered by avalanche snow

Zásady pro vypracování:


Navrhněte, realizujte a ověřte laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu z hlediska výměny plynů při dýchání zasypaného člověka. Navrhněte parametry charakterizující dechový vzor a proveďte pilotní studii na zdravých dobrovolnících zjišťující vliv změny vybraných parametrů na dobu přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem.

Seznam odborné literatury:

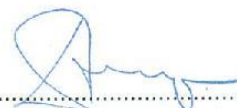
- [1] Roubík, K., Sieger, L., Sykora, K., Work of Breathing into Snow in the Presence versus Absence of an Artificial Air Pocket Affects Hypoxia and Hypercapnia of a Victim Covered with Avalanche Snow: A Randomized Double Blind Crossover Study, PLoS ONE, ročník 10, číslo 12, 2015, Prosinec, doi:10.1371/journal.pone.0144332, <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0144332>  
[2] Otis, A.B., The Work of Breathing, Journal of Physiological Reviews, ročník 34, číslo 3, 1954, 449-458 s.

Zadání platné do: 25.09.2018

Vedoucí: Ing. Václav Ort



vedoucí katedry / pracoviště



děkan

V Kladně dne 16.02.2018

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Vliv dechového vzoru na přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

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

V Kladně 18.5.2018



.....  
David Chadima

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Václavu Ortovi za, trpělivou pomoc a ochotu. Zároveň bych rád poděkoval konzultantovi prof. Ing. Karlu Roubíkovi, Ph.D. a Ing. Ladislavu Siegerovi, CSc, za cenné rady a čas který mi věnovali při plnění této práce.

Práce byla podporována grantem ČVUT v Praze SGS17/203/OHK4/3T/17.

## **ABSTRAKT**

### **Vliv dechového vzoru na přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem**

Cílem této bakalářské práce je realizovat a ověřit laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu z hlediska výměny plynů při dýchání člověka zasypaného lavinovým sněhem a provést pilotní studii na zdravých dobrovolnících zjišťující vliv změny vybraných parametrů na dobu přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem. Byla sestrojena konstrukce laboratorního modelu, na které bylo provedeno měření celkem dvanácti dobrovolníků z řad studentů FBMI. Naměřená data byla zpracována v prostředí MATLAB a STATISTICA a následně interpretována v grafech. Z výsledků provedeného experimentu vyplývá, že se jako nejefektivnější dechový vzor pro člověka zasypaného lavinovým sněhem jeví delší, hluboké dechy.

### **Klíčová slova:**

Dechový vzor, Lavinový sníh, Laboratorní model

## **ABSTRACT**

### **Effect of respiratory pattern on survival time on human covered by avalanche snow**

The aim of this bachelor thesis is to construct and verify a laboratory model simulating the characteristics of avalanche snow in terms of gas exchange during respiration of a man covered with avalanche snow and to realize a pilot study on healthy volunteers to determine the influence of change of selected parameters on the survival time of a man covered with avalanche snow. The construction of a laboratory model was developed, on which a total of twelve volunteers from the FBMI students were measured. The measured data was processed in the MATLAB and STATISTICA environment and subsequently interpreted in the graphs. The result of the experiment shows that longer, deep breathing appears as the most efficient breathing pattern for a man covered with an avalanche snow.

### **Keywords**

Breathing pattern, Avalanche snow, Laboratory model

# Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratk</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Úvod</b> .....	<b>9</b>
1.1 Přehled současného stavu.....	10
1.1.1 Lavinová problematika.....	10
1.1.2 Dechový vzor a dechová práce.....	12
1.2 Cíle práce.....	13
<b>2 Metody</b> .....	<b>14</b>
2.1 Popis modelu.....	14
2.1.1 Výběr materiálu.....	17
2.1.2 Záznam distribuce <b>CO<sub>2</sub></b> v modelu.....	17
2.1.3 Ověření zdravotní nezávadnosti.....	19
2.2 Vliv dechového vzoru.....	20
2.2.1 Průběh měření.....	20
2.2.2 Dechový vzor.....	22
2.2.3 Etické otázky.....	23
2.2.4 Metodika vyhodnocování dat.....	23
2.2.5 Vyhodnocení distribuce <b>CO<sub>2</sub></b> v modelu sněhu.....	24
2.2.6 Statistické vyhodnocení dat.....	26
<b>3 Výsledky</b> .....	<b>28</b>
3.1 Výběr materiálu.....	28
3.2 Vliv dechového vzoru.....	30
<b>4 Diskuse</b> .....	<b>33</b>
<b>5 Závěr</b> .....	<b>36</b>
<b>6 Seznam použité literatury</b> .....	<b>37</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>40</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>41</b>
<b>Příloha A: Grafy jednotlivých dechových vzorů</b> .....	<b>42</b>
<b>Příloha B: Dokumenty etické komise</b> .....	<b>50</b>
<b>Příloha C: Protokol měření</b> .....	<b>57</b>
<b>Příloha D: Obsah přiloženého CD</b> .....	<b>59</b>

# Seznam symbolů a zkratk

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$FiCO_2$	%	Koncentrace nadechnutého oxidu uhličitého
$EtCO_2$	%	Obsah oxidu uhličitého na konci výdechu
$FiO_2$	%	Koncentrace vdechnutého kyslíku
$FeO_2$	%	Koncentrace vydechovaného kyslíku
$SpO_2$	%	Saturace periferní krve kyslíkem
$N_2O$	%	Oxid dusný, též rajský plyn
L	-	Litry psány velkým písmenem pro odlišení.

## Seznam zkratk

Zkratka	Význam
CHOPN	Chronická obstrukce dýchacích cest
D-lite	Spirometrická clonka patientského monitoru Datex
p-hodnota	Stupeň validity dosažené hladiny významnosti



# 1 Úvod

Experiment se zabývá problematikou dýchání člověka zasypaného lavinovým sněhem. Počet úmrtí pod lavinou roste dle statistických údajů každým rokem a tím pádem se jím zabývá řada výzkumných týmů. Existuje velký počet studií popisujících výměnu plynů při dýchání do lavinového sněhu, vlastnosti tohoto sněhu nebo například vliv dechové dutiny na dobu přežití pod lavinou. Doposud žádná se ale nezabývala vlivem dechového vzoru v rámci této problematiky.

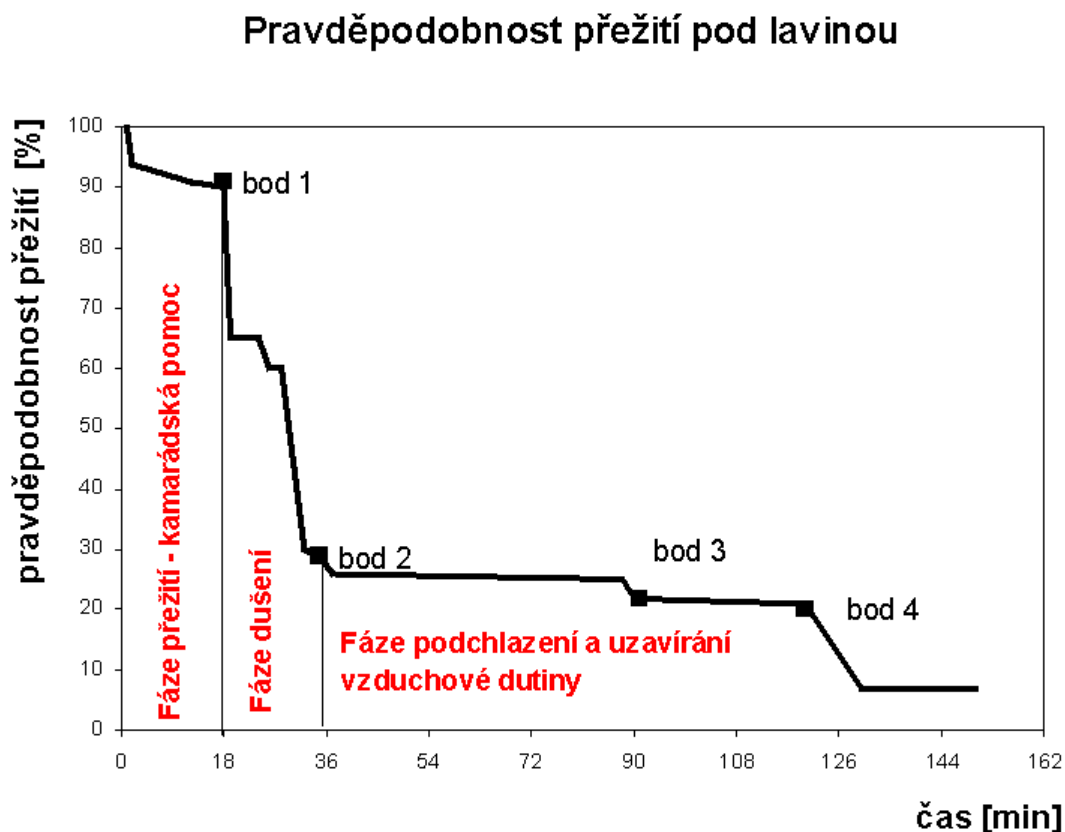
Dechový vzor lze popsat pomocí celé řady parametrů, které figurují v rovnicích pro výpočet dechové práce. Tudíž lze říci, že přímo souvisí s efektivitou dýchání. To se dá pro příklad demonstrovat u některých onemocnění dýchací soustavy. Lidské tělo se totiž obecně vždy přizpůsobuje daným podmínkám tak, aby to pro něj bylo co nejefektivnější. V případě změny dechového vzoru je to klinicky prokázáno u pacientů s chronickou obstrukcí dýchacích cest (CHOPN). Otázkou je, jakým způsobem se změní efektivita dýchání u člověka zasypaného lavinovým sněhem v souvislosti s dechovou prací, upraví-li se dechový vzor.

Studie se zabývá aktuálním tématem, které může prohloubit znalosti ohledně přežití lidského organismu pod lavinou. Cílem je vytvořit laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu a s jeho pomocí ověřit vliv změny dechového vzoru na dechovou práci člověka zasypaného lavinovým sněhem.

## 1.1 Přehled současného stavu

### 1.1.1 Lavinová problematika

Křivka šance přežití pod lavinovým sněhem dostává rychlého spádu už po patnácti minutách, kdy je pravděpodobnost přežití 92 %, při čemž v dalších 35 minutách klesá pravděpodobnost na 30 [1].



**Obrázek č. 1.1:** Graf pravděpodobnosti přežití pod lavinou. Zdroj: [3]

Proto je každá vteřina, kterou lze ušetřit, nesmírně důležitá. Dominující příčinou smrti spojených s lavinou je akutní zadušení. K udušení dochází v důsledku zablokování dýchacích cest nebo v důsledku vážné hypoxie a hyperkapnie vyplývající z opakovaného vdechování, již vydechnutého plynu. Když člověk opakovaně vdechuje a vydechuje stále stejný plyn, tak se v daném plynu postupně snižuje koncentrace kyslíku, a naopak zvyšuje koncentrace oxidu uhličitého. Rychlost tohoto procesu závisí na řadě faktorů, jako je například přítomnost vzduchové kapsy. Tou se dopodrobna zabývá studie profesora Roubíka [2]. Vzduchová kapsa významně ovlivňuje dobu přežití zejména kvůli nižšímu

odporu při dýchání a také kvůli lepší difúzi plynů. Další studií potvrzující, že stupeň hypoxie závisí na objemu vzduchové kapsy, hustotě sněhu a individuálních parametrech jednotlivce je studie Hermanna Bruggera [3]. S tím, že dlouhodobější přežití je možné pouze se vzduchovou kapsou.

Lavinu a její rozsah ovlivňuje řada faktorů jako je například velikost otevřeného prostoru ve směru pádu laviny, přirozené překážky jako skaliska nebo stromy, ale i počasí [4]. Do velké míry ovlivňují dýchání člověka zasypaného pod lavinou vlastnosti samotného sněhu, a to především jeho hustota. To je jedna ze základních vlastností porézních materiálů, mezi které sníh patří a v rámci lavin se její hodnota pohybuje mezi 296–350  $kg \cdot m^3$  [5].

Podrobným způsobem smrti pod lavinou se zabývá studie *Mechanics of death in avalanche victims* [6], popisující podrobně 12 obětí ze dvou různých lavin v severním Norsku. Na základě pitvy všech obětí byly zjištěny následující nálezy: Plicní edém, mírnější mozkový edém a akutní ucpaní plic a ledvin. Čtyři z těchto smrtí byli čistě kvůli asphyxii a tři kvůli srdeční zástavě. Tři z celkového počtu obětí utrpěli vážné zlomeniny a u žádné z celkového počtu 12 nebyli patrné stopy po vzduchové kapse. Obecně pak bylo stanoveno, že příčinou smrti byl obrovský tlak na tělo s akutním zkratem respiračního a oběhového systému [6]. V obdobných studiích z evropských Alp, ale i celosvětově přidělují velké procento úmrtí přímo zraněním způsobeným při pádu laviny. Zbytek pak ale opět asphyxii [1] [7]. Otázkou je zdali, popřípadě do jaké míry, má na tento proces vliv dechový vzor člověka.

Zajímavé jsou některé statistické údaje počtu úmrtí v důsledku laviny, které úzce souvisejí s námi řešeným tématem. Pro příklad se zaměříme na Spojené státy americké, kde takto zemřelo v průběhu minulých deseti let 27 lidí ročně. Na webu Colorado avalanche information center, je vedena podrobná statistika od roku 1950 až do současnosti. Počet smrtí až na malé výkyvy každoročně roste a nejčastějšími oběťmi jsou horolezci, hikeři, snowboardisté/lyžaři nebo jezdci na sněžných skútrech [8]. Téma zavalení člověka lavinovým sněhem je tedy s dobou stále více aktuální.

## 1.1.2 Dechový vzor a dechová práce

Dechový vzor popisujeme podle celé řady parametrů, jako jsou dechový objem, dechová frekvence a délka výdechu nebo nádechu. V populaci je, co se dechového vzoru týče, velká diverzita a jednotlivci se odlišují právě v těchto parametrech. První data týkající se měření dechové frekvence při spontánním dýchání člověka jsou ze studií Queteleta a Hutchinsona [9]. Měření proběhla na více než dvou tisících probandech a výsledkem je široká škála dechových frekvencí od 6 – 31 dechů za minutu. Dechovým objem byl poprvé popsán Dejoursem v roce 1961 a podobně jako u dechové frekvence se u jednotlivců liší (442-1549 ml při dýchání v klidu). Důležitým faktorem je také vzor proudění vzduchu, kdy v ideálním případě při snaze minimalizovat dechovou práci by mělo být proudění rovnoměrné při výdechu a nádechu. Podle Dejourse [9] existuje velké množství možných kombinací hodnot těchto parametrů, abychom dosáhli stejné minutové ventilace. Počet těchto kombinací se snižuje s rostoucí ventilací, neboť při maximálních hodnotách ventilace se dechové vzory jednotlivců podobaly nejvíce.

Existují některé nemoci, při kterých si tělo přirozeně svůj dechový vzor upravuje. Je to například chronická obstrukce dýchacích cest (CHOPN), při které dochází ke zúžení a ucpávání dýchacích cest [10]. Tělo se poté zhoršeným podmínkám přizpůsobuje právě úpravou dechového vzoru [11]. Z toho tedy můžeme soudit, že způsob dýchání má bez pochyb vliv na jeho efektivitu.

Dechová práce se řídí rovnicemi, které dal dohromady již v 50. letech minulého století doktor Otis v jeho práci *Mechanics of breathing in man* [12]. Při dýchání musí být překonány různé faktory jako jsou elastické síly při roztahování plic nebo odpor při turbulentní proudění vzduchu respiračním traktem. Všechny tyto faktory Otis uvažoval v rámci odporových konstant a dal dohromady vztah pro výpočet dechové práce za jednotku času

$$W = \frac{1}{2}Kf\left(\frac{V_A}{f} + V_D\right) + \frac{1}{4}K'\pi^3 (V_A + fV_D)^2 + \frac{2}{3}K''\pi^2(V_A + fV_D)^3$$

kde  $W$  je dechová práce,  $K$ ,  $K'$ ,  $K''$  odporové konstanty,  $V_A$  je alveolární ventilace,  $V_D$  mrtvý prostor a  $f$  dechová frekvence. Když tedy známe hodnotu alveolární ventilace, mrtvého prostoru a dechové frekvence jsme schopni vypočítat dechovou práci. Toho vzorce se na příklad využívá u ventilačního režimu ASV – adaptivní podpůrné ventilace, jejímž cílem je poskytnout nastavenou úroveň alveolární ventilace při minimální dechové práci [13]. V praxi si tak ASV vybírá vzor s vyšší frekvencí a nižším  $V_t$  u restriktivních pacientů a dechový vzor s pomalou frekvencí a větším  $V_t$  u pacientů s chronickou obstrukcí dýchacích cest [14].

## 1.2 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je realizovat a ověřit laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu z hlediska výměny plynů při dýchání člověka zasypaného lavinovým sněhem. Provést pilotní studii na zdravých dobrovolnících zjišťující vliv změny vybraných parametrů na dobu přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem.

## 2 Metody

### 2.1 Popis modelu

V rámci experimentu byla vytvořena sestava se kterou bylo možné experimenty provádět v laboratorním prostředí. Základ tvořil plechový kužel o objemu 65 L, pro který byl speciálně na míru vyroben kovový stojan, tak aby se s ním dalo co nejlépe manipulovat.

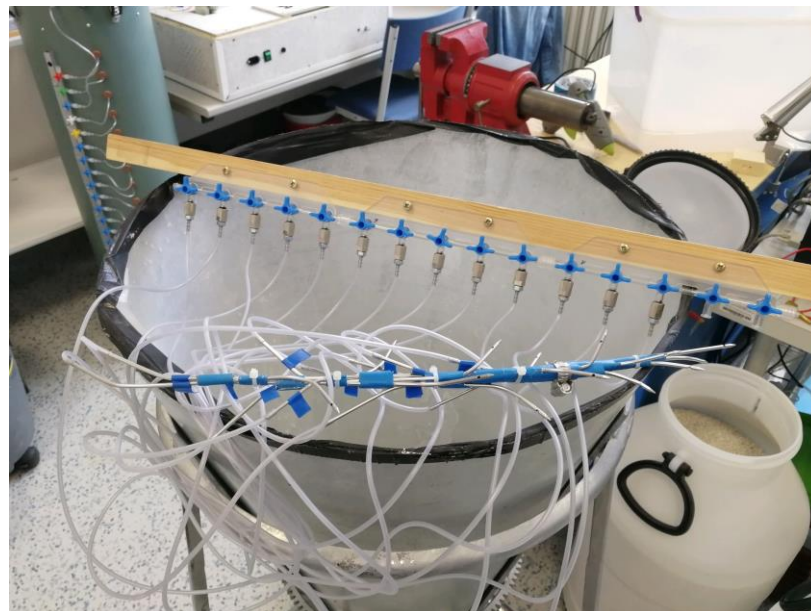


Obrázek č. 2.1: Stojan modelu.

Kužel samotný je zevnitř pokryt plastovou výztuží a zakončený medicínskou spojkou tak, aby se k němu dala připojit soustava hadiček s filtrem.

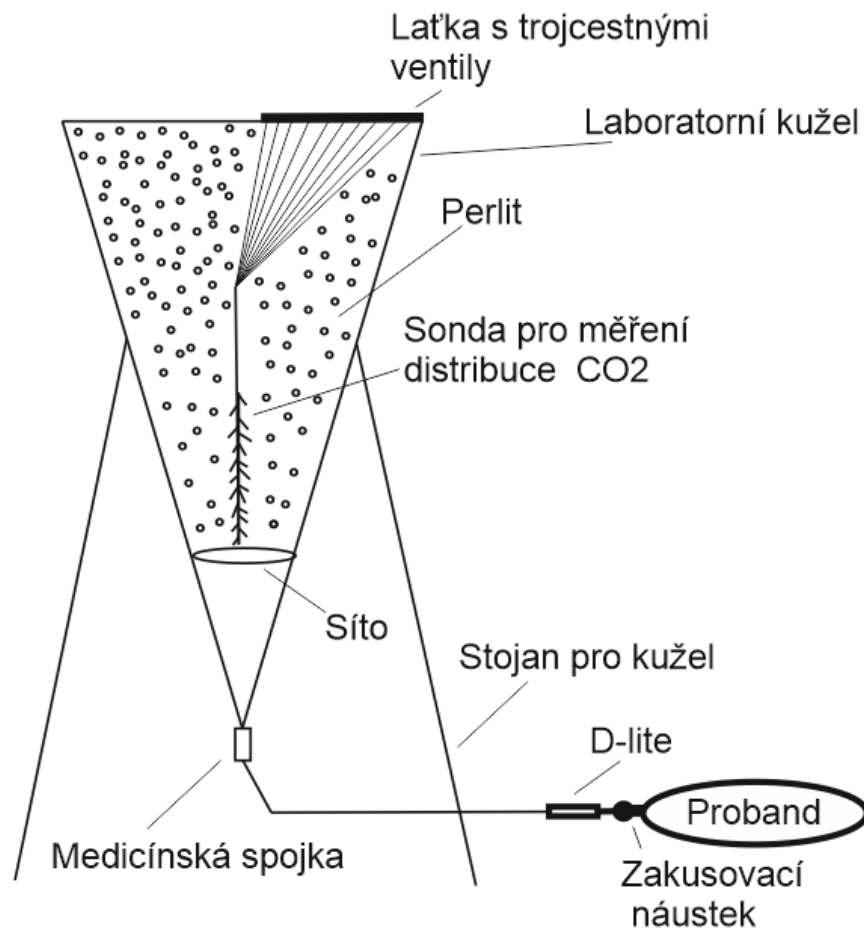


**Obrázek č. 2.2:** Kužel pro materiál simulující sněh.



**Obrázek č. 2.3:** Kužel zasazený ve stojanu se sondou pro záznam distribuce  $CO_2$  v modelu.

Pro přehlednost bylo vytvořeno schéma, kde je vyobrazen model a veškeré komponenty využívané při měření v rámci experimentu.



**Obrázek č. 2.4:** Schéma laboratorního modelu.



### 2.1.1 Výběr materiálu

Na začátku všech experimentů bylo potřeba vybrat materiál, který by vhodně simuloval lavinový sníh.

Daný materiál byl zprvu vybírán na základě porovnání jeho mechanických vlastností s vlastnostmi sněhu. Materiál by měl být porézní a také dostatečně těžký, neboť při zátěži může být minutová ventilace vysoká, a tak by v případě lehčího materiálu mohlo dojít k jeho pro-dýchnutí [15]. Další věcí, co bylo potřeba vzít v potaz, je rozpustnost oxidu uhličitého a kyslíku v ledu. Na základě studie Melissy Headly, Martina Wahlen a Edwarda J. Brooka [16], bylo zjištěno, že tato hodnota je jen velice obtížně zjistitelná, ale zároveň zanedbatelně malá a v rámci této studie by neměla mít žádný vliv.

Nakonec byly vybrány 3 materiály nebo jejich směsi, které byly experimentálně ověřeny. Provedli jsme měření jednotlivých parametrů ( $FiCO_2$ ,  $EtCO_2$ ,  $SpO_2$ ,  $FiO_2$ ,  $FeO_2$ ), které proběhlo na několika probandech na námi zhotoveném modelu.

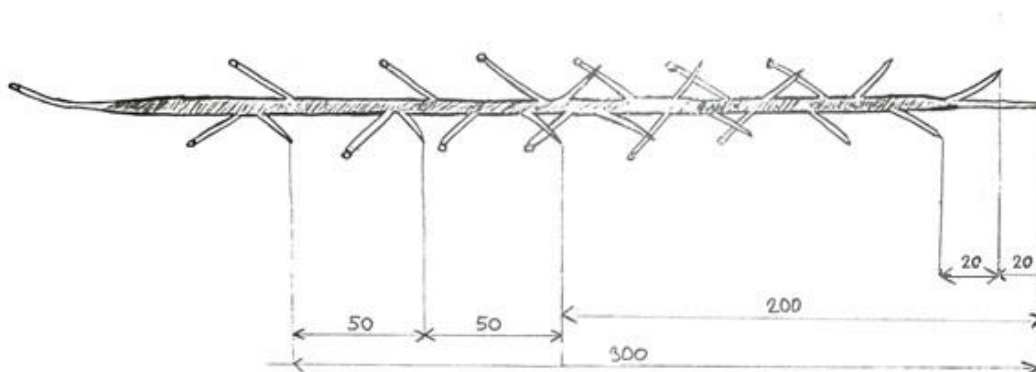
### 2.1.2 Záznam distribuce $CO_2$ v modelu

V rámci všech experimentů bylo zkoumáno také jak se šíří plyn v materiálu. Pro odběr vzorků byla navržena a vytvořena měřící sonda. Ta se skládá ze soustavy infuzních jehel k sobě vzájemně pospojovaných. Každá z nich byla ohnuta na obou koncích, tak aby se k ní dala lépe připojit vzorkovací hadička a aby nebyl vzorek odebírán přímo od konstrukce, kde by mohla vzniknout vzduchová kapsa, byť jen o malém objemu. Vzorkovací hadičky ústí každá trojcestným ventilem, které jsou pevně připojeny k dřevěné laťce. Pro lepší přehlednost má každá jehla ve své vrchní části štítek s číslem podle pořadí, aby mohla být v případě jejího ucpání nebo jiného problému rozpoznána. Odběr vzorků probíhal vždy na konci měření, kdy byla připojena vzorkovací hadička k sondě a postupným otevíráním trojcestných ventilů byly odebrány vzorky z jednotlivých vzdáleností.



**Obrázek č. 2.5:** Sonda pro záznam distribuce  $CO_2$  v modelu.

Jednotlivé otvory pro odebrání vzorku jsou v prvních 20 cm umístěny vždy po 2 cm počínaje 0 – tudíž celkem 11 míst pro odebírání vzorku. To bylo určeno na základě zpracování a vyhodnocení dat naměřených ve sněhu skutečném podle předchozí studie [2]. Následují ještě dva měřicí body na 25 cm a 30 cm. Ústí infuzní jehly je vždy umístěno v jiném směru, tak aby se zamezilo ovlivnění hodnoty koncentrace plynu díky předchozím odběrům.

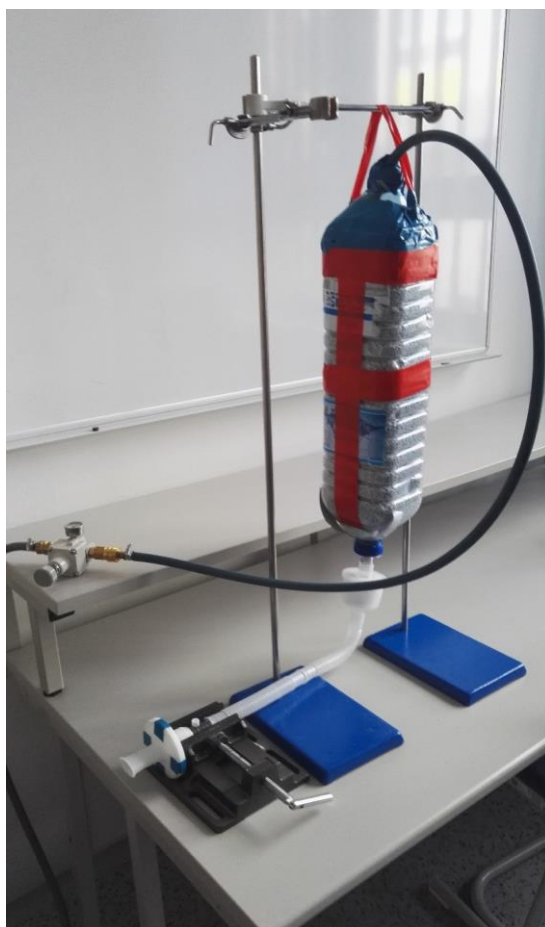


**Obrázek č. 2.6:** Kóta sondy pro záznam distribuce  $CO_2$  v modelu.

### 2.1.3 Ověření zdravotní nezávadnosti

Vzhledem k tomu, že experiment byl realizován na lidech, bylo potřeba ověřit, zdali je dýchání skrz materiál bezpečné.

V rámci pilotního experimentu byl model připojen k centrálnímu rozvodu vzduchu a za soustavu filtrů byl přidán v jednom případě filtrační papír a v druhém vata která je sama o sobě posledním komponentem soustavy, do které dýchá proband. Na začátku měření se vata a filtrační papír zvažili s přesností na desetiny miligramu na analytických vahách, byli přidány do koncové části modelu a vystaveny proudění vzduchu skrz materiál simulující sněh. Celá soustava byla utěsněna tak aby vzduch nikde neucházel, přičemž byl tlak plynu před vstupem v distální části regulován. Hadice, která vede do modelu byla na jejím konci obalena kouskem vaty, tak aby vzduch nečeřil perlit, který potom na základě toho poletoval. Perlit byl navlhčený jako při ostatních experimentech, a to tak, aby jeho hustota odpovídala  $270 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$ .



**Obrázek č. 2.7:** Sestava pro ověření zdravotní nezávadnosti modelu.

Po dvou hodinovém měření byli vata a filtrační papír vyňaty a přeneseny do horkovzdušné laboratorní sušárny, aby se zbavili vlhkosti nabrané z modelu. Po vytažení ze sušárny byly opět zváženy a výsledky byly porovnány.

**Tabulka 2.1:** Hmotnost filtračního papíru a vaty před a po provedení experimentu zdravotní nezávadnosti

Materiál	Hmotnost [g]	Hmotnost po experimentu – nevysušené [g]	Hmotnost po experimentu – vysušené [g]
Vata	1,3511	1,3514	1,3511
Filtrační papír	0,4726	0,4988	0,4717

V Tabulce 2.1 můžeme vidět výsledky experimentu pro ověření zdravotní nezávadnosti. Hmotnost vaty, se po ukončení měření a jejím vysušení v laboratorní sušárně nezměnila. U filtračního papíru sice můžeme vidět rozdíl v hmotnosti po a před experimentem, ale jedná se řádově pouze o tisícinu gramu. Vata i filtrační papír byli navíc vystaveny proudění vzduchu po 2 hodiny, což je mnohonásobně delší čas oproti průměrným 4 minutám dýchání probanda do modelu v rámci experimentů s dechovým vzorem.

## 2.2 Vliv dechového vzoru

### 2.2.1 Průběh měření

Experiment probíhal v laboratoři na námi sestaveném modelu. Před začátkem měření byl vždy připraven perlit o dané hustotě –  $270 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Příprava probíhala v barelech, kam byl perlit doplněný po rysku na objem 60 L. Následně se materiál převážil a byl doplněn o dané množství vody do definované hustoty. Barel byl poté utěsněn a celý materiál důkladně promíchán, tak aby bylo jeho složení homogenní.

Nejprve bylo do kuželu vloženo síto pro dutinu o objemu 2 L a do jeho středu byla umístěna spodní část sondy pro záznam distribuce  $CO_2$  z modelu sněhu. Poté se kužel naplnil perlitem se sondou uprostřed a soustava trojcestných ventilů na dřevěné laťce se umístila na vrchní okraj kužele, tak aby se k ní později mohla přiložit vzorkovací hadička. Na závěr se ke spodnímu ústí modelu připojila soustava hadiček s antibakteriálním filtrem Servo Duo Guard (Maquet).

Před měřením dostal každý proband svůj vlastní náustek a nosní klip. Náustek byl zvolen zakusovací, tak aby se plně zamezila možnost přidechování z okolí. Nosní klip si každý proband nasadil sám a nejprve ozkoušel, zdali plně těsní. Poté byl ještě nos zespod přelepen lepící páskou přímo ke klipu.

Měření započalo se spirometrickou clonkou patientského monitoru Datex (D-lite), nasazeným na náustek pro záznam výměny plynů při dýchání již v ustalovací fázi. Proband dýchal nejprve 3 minuty pouze skrz D-lite pro ustálení hodnot. V případě, že se nejednalo o dýchání spontánní, ale dýchalo se podle dechového vzoru, byl před probanda umístěn počítač s připravenou aplikací. Poté byl připojen k modelu a dýchal, dokud mu nepoklesla saturace periferní krve kyslíkem na námi určenou, bezpečnou, spodní hranici 80 %. Proband měl po celou dobu měření možnost experiment sám kdykoli přerušit a být odpojen od sestavy. Po odpojení subjekt dodýchal pouze skrz D-lite opět do ustálení hodnot.

Na konci měření byla připojena vzorkovací hadička k sondě pro měření distribuce  $CO_2$  v modelu a postupným otevíráním trojcestných ventilů byly odebrány vzorky z jednotlivých vzdáleností. Vždy byl zaznamenán přesný čas připojení a následného odpojení probanda z modelu, začátek odebírání vzorků distribuce  $CO_2$  a samotného ukončení měření. Pro kontrolu byla doba dýchání do modelu měřena i zvlášť na stopkách a čas byl opět zaznamenán.

Po ukončení byl model pomocí kompresoru pročištěn vzduchem od zbylého  $CO_2$ , které se v materiálu usadilo. Materiál byl dále kompletně přesypán a vyměněn, tak aby nezkreslil následující měření.

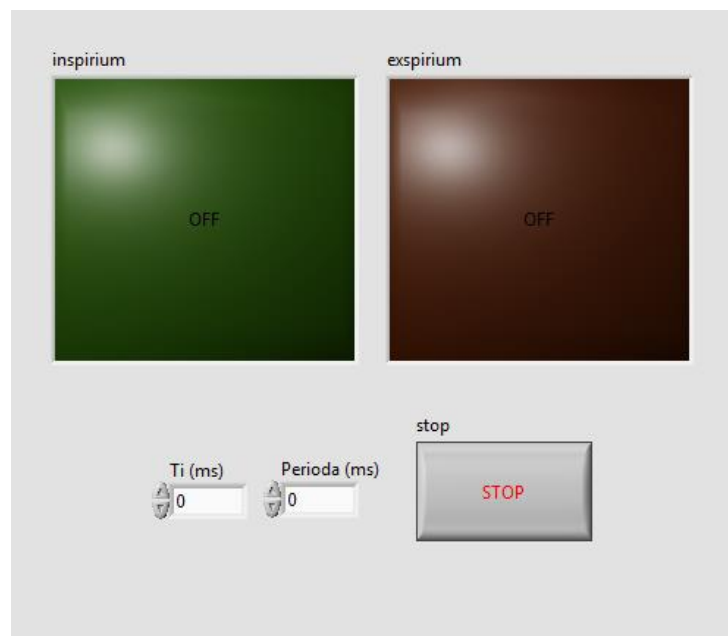
Protokol měření je uvedený v příloze.

## 2.2.2 Dechový vzor

V rámci experimentů dýchal každý proband třikrát. Jednou spontánně, tak jak mu to bylo přirozené a další dvě dýchání probíhala podle předem určeného dechového vzoru.

Ten byl řízen pomocí námi vytvořené aplikace v prostředí LabVIEW. Do aplikace byl vložen celkový čas jednoho cyklu inspirium/expirium a poté ještě poměr inspiračního a expiračního času. Těmito parametry jsme dechový vzor v rámci celého experimentu řídili. V první fázi dýchání probanda, ještě nepřípojeného k modelu, jsme pomocí D-lite změřili jeho klidovou, dechovou frekvenci. Ze změřené frekvence byla vypočítána délka jednoho cyklu pro každého probanda individuálně. Poměr inspirium/expirium byl brán 2:3, který se ukázal na základě dřívějších pilotních měření pro probandy jako nejvhodnější.

Pro nejlepší představu o vlivu dechového vzoru byly zvoleny dva extrémní případy. První z nich byl pro malou frekvenci, která byla dopočítávána o třetinu nižší, než klidová dechová frekvence probanda a vycházela v rozmezí 6-10 dechů za minutu. Druhý z nich byly dechy o vysoké frekvenci, kde už jsme si mohli dovolit určit hodnotu vyšší. Dýchalo se s frekvencí jednou tak vysokou jako klidová a v průměru vycházela mezi 24-30 dechy za minutu.



**Obrázek č. 2.8:** Aplikace pro řízení dechového vzoru.

### 2.2.3 Etické otázky

Studie byla včetně všech potřebných dokumentů řádně projednána a schválena etickou komisí FBMI ČVUT. Studie byla rovněž zaregistrována na portálu ClinicalTrials.gov, vedeným Národní lékařskou knihovnou Spojených států a Národním institutem pro zdraví.

Před samotným začátkem každého z měření byl proband nejprve seznámen s problematikou a průběhem měření. Na základě toho byl probandem podepsán informovaný souhlas, bez kterého by se měření nemohl účastnit.

Bezpečnost při experimentu byla zajištěna antibakteriálním filtrem Servo Duo Guard (Maquet) a proti prostoupení makroskopických částecek byla spodní strana medicínské spojky překryta gázou. Ke snížení rizika proniknutí prachu a drobných částecek, přispělo také navlhčení materiálu. V rámci ověření zdravotní nezávadnosti modelu proběhl i laboratorní experiment s pozitivním výsledkem. Soukromí probandů při experimentu a ochrana jejich osobních údajů byli řádně zajištěny v souladu s legislativou a běžnou klinickou praxí. Experimentu se nemohl účastnit subjekt s jakýmkoli typem onemocnění dýchacích cest, jako je například astma, nebo jakýmkoli typem onemocnění kardiovaskulárního systému.

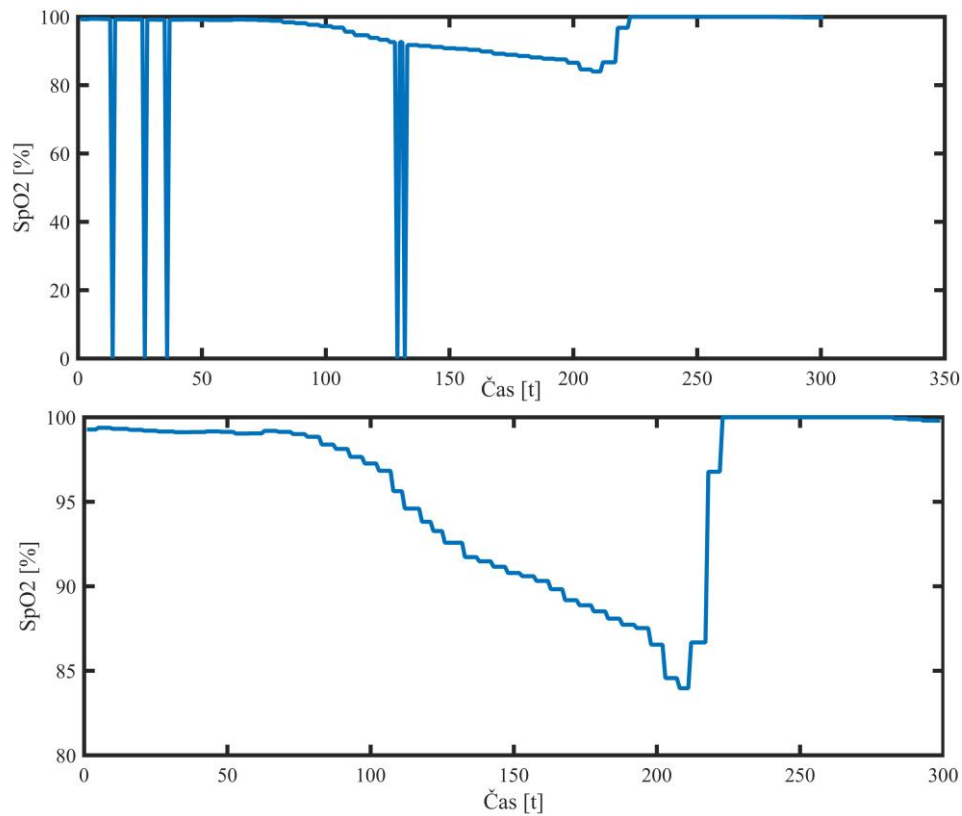
Sylabus projektu a informovaný souhlas jsou uvedeny v příloze.

### 2.2.4 Metodika vyhodnocování dat

Zpracování dat probíhalo v programovacím prostředí Matlab. Každý proband byl podroben 3 měřením, což je při 12 probandech 36 křivek pro každý z parametrů ( $FiCO_2$ ,  $EtCO_2$ ,  $SpO_2$ ,  $FiO_2$ ,  $FeO_2$ ). Křivky všech probandů byly vždy pro daný vzor zprůměrovány, aby pak mohly být porovnány jednotlivé vzory mezi sebou.

Všechna data musela být před svým použitím zkontrolována a upravena tak, aby nebyly v záznamu chvilkové výpadky. Pro příklad je na obrázku 2.4 uvedena úprava dat saturace periferní krve kyslíkem, kdy je na vrchním grafu vidět signál s výpadky a na grafu spodním již graf upravený bez výpadků, s chybějícími hodnotami doplněnými interpolací. Ve všech případech byl sledován průběh dané veličiny v čase, kromě

záznamu distribuce  $CO_2$  v modelu sněhu, kde byla sledována koncentrace plynu v závislosti na vzdálenosti, kterou plyn modelem prošel. Jednotlivé kroky, které byly pro distribuce  $CO_2$  v modelu sněhu specifické, jsou uvedeny níže.

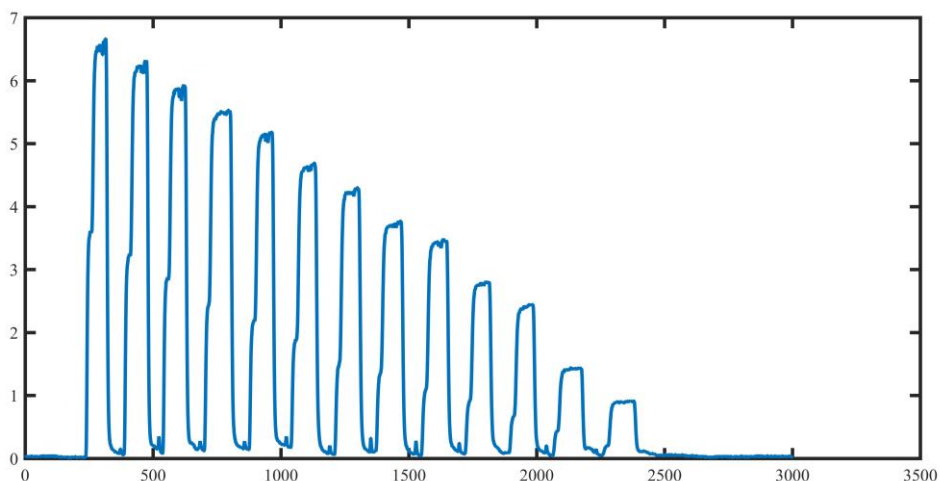


**Obrázek č. 2.9:** Oprava signálu saturace periferní krve kyslíkem.

### 2.2.5 Vyhodnocení distribuce $CO_2$ v modelu sněhu

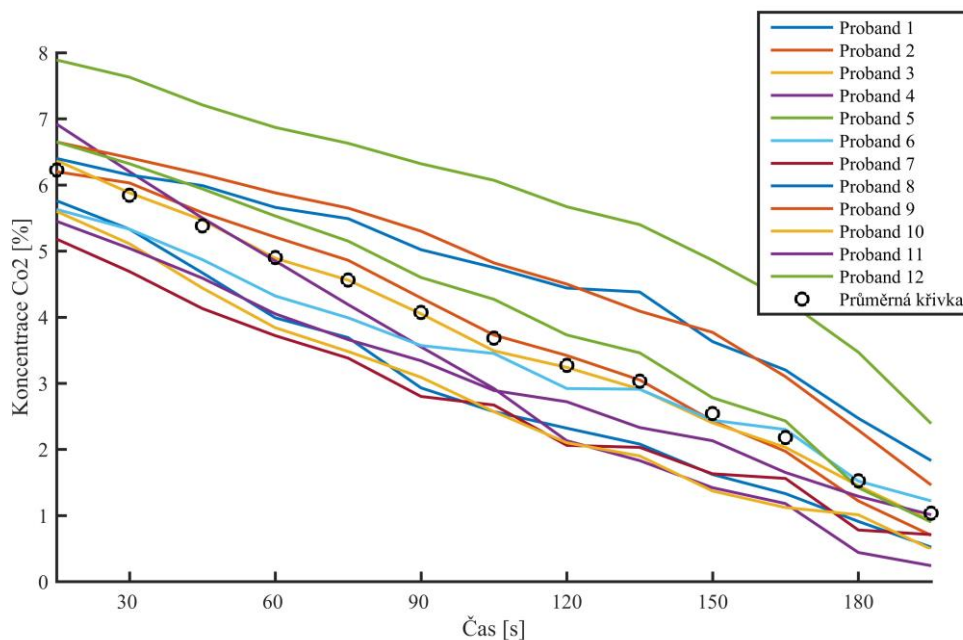
Pomocí trojcestných ventilů, do kterých ústily vzorkovací hadičky, se po jejich otevření postupně nasávala směs z jednotlivých jehel sondy. Z těchto vzorků plynu, které byly odebrány z modelu sněhu byla vyhodnocována postupně klesající koncentrace  $CO_2$ .





**Obrázek č. 2.10:** Graf záznamu distribuce  $CO_2$  z modelu, schodový signál.

Odběr vzorků probíhal vždy v koncové fázi, a tak bylo nutné nejprve vyobrazit potřebný úsek měření. Na Obrázku 2.10 můžeme vidět křivku připomínající schody podle toho, jak koncentrace s rostoucí vzdáleností postupně klesala. Z každého odběru se poté brala jedna ustálená hodnota koncentrace.



**Obrázek č. 2.11:** Křivky pro všech 12 probandů, při jednom dechovém vzoru.

V dalším kroku byly tyto koncentrace všech probandů vykresleny vždy pro jeden dechový vzor. Z těchto 12 křivek se potom udělala jedna průměrná, a tak mohli být jednotlivé vzory porovnány mezi sebou podle průstupu  $CO_2$  materiálem.

## 2.2.6 Statistické vyhodnocení dat

Ke statistickému vyhodnocení dat byl použit program STATISTICA. Nejprve byly vykresleny křivky všech probandů od daného dechového vzoru pro všechny sledované parametry. U těchto křivek bylo posléze sledováno, do jaké míry se shodují a zdali některé z nich viditelně nesměřují do nesmyslných hodnot, případně neděje-li se tomu tak opakovaně u jednoho určitého subjektu. Do studie bylo nakonec zařazeno všech 12 probandů, při čemž všechny sledované grafy jsou uvedeny v příloze. Data byla posléze patřičně upravena do formátu nutného k jejich následnému vyhodnocení.

Dále bylo potřeba zjistit, zdali hodnoty vyhovují normálnímu rozdělení populace. Pro všechny vyhodnocované parametry byl použit Shapiro-Wilksův test, kdy se vykreslily histogramy a byla sledována p-hodnota (stupeň validity dosažené hladiny významnosti).

**Tabulka 2.2:** Stupně validity dosažené hladiny významnosti pro v experimentu měřené parametry.

Parametr	p-hodnota													
<i>SpO2</i>	0,20	0,35	0,15	0,08	0,04	0,25	0,60	0,42	0,27	0,18	0,13	0,08	0,07	
<i>FiCO<sub>2</sub></i>	0,49	0,32	0,38	0,30	0,19	0,17	0,09	0,07	0,08	0,02	0,02	0,04	0,08	
<i>EtCO<sub>2</sub></i>	0,43	0,04	0,06	0,03	0,06	0,07	0,38	0,56	0,49	0,56	0,30	0,42	0,68	
<i>FiO<sub>2</sub></i>	0,19	0,09	0,46	0,92	0,97	0,86	0,84	0,90	0,68	0,56	0,10	0,02	0,01	
<i>EtO<sub>2</sub></i>	0,06	0,12	0,51	0,98	0,99	0,76	0,74	0,65	0,34	0,49	0,31	0,13	0,07	

V tabulce můžeme vidět p-hodnoty po vyhodnocení histogramů. Je-li p-hodnota větší než 0,05 normalita se nezamítá. Několik málo hodnot sice vyšlo menších než 0,05 ale při daném rozsahu dat je to v rámci tolerance, a tak lze data považovat za použitelná k dalšímu vyhodnocení.

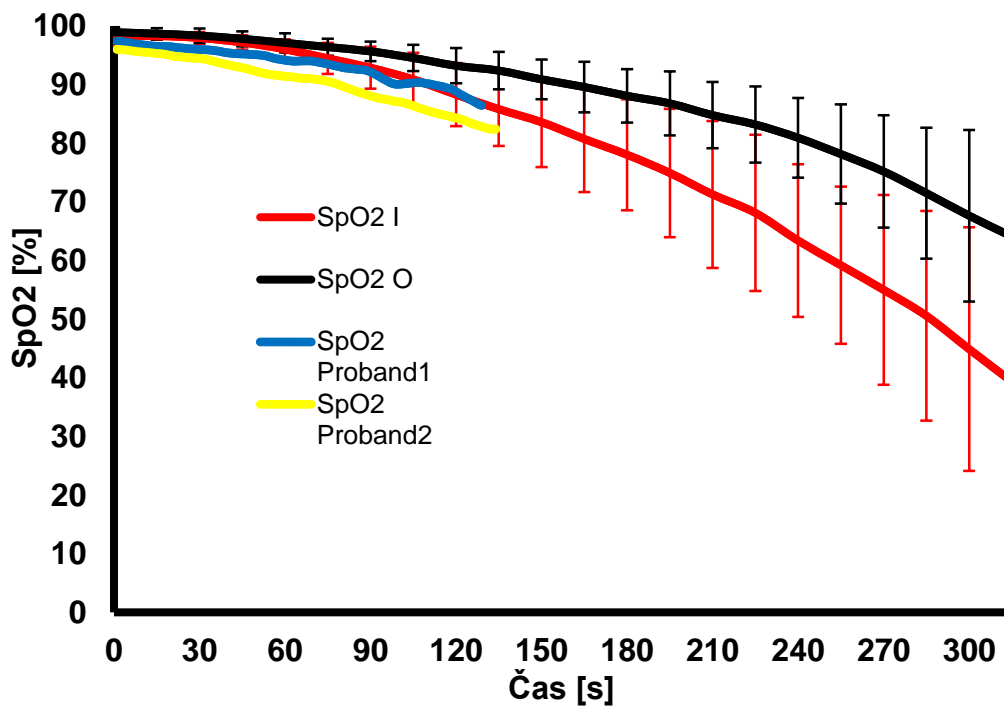
K určení statistické významnosti byla použita metoda ANOVA, ta nám umožňuje určit, zda na hodnotu náhodné veličiny pro určitého jedince má statisticky významný vliv hodnota některého znaku, který je u jedince pozorovatelný. Výsledné grafy vyhodnocení touto metodou jsou uvedeny ve výsledcích v kapitole 3.2. Data byla následně podrobena Bonferroniho testu se zjištěním, že se nejedná o statisticky významná data.

## 3 Výsledky

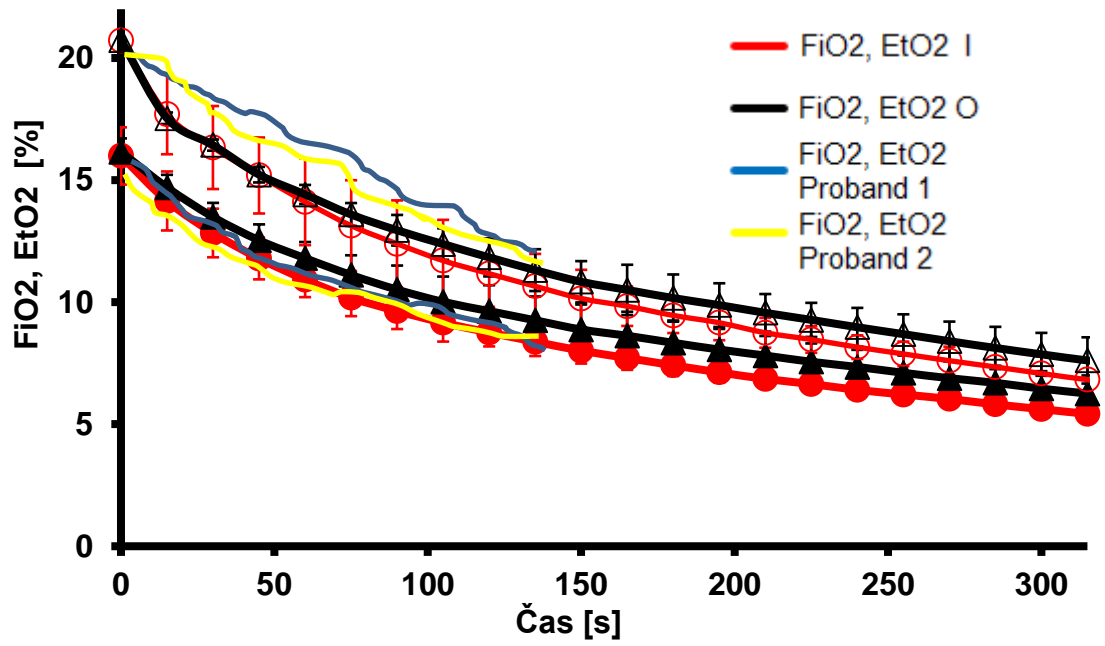
### 3.1 Výběr materiálu

V následujících grafech jsou jednotlivé naměřené parametry vždy pro dva probandy (žlutá a modrá křivka) porovnány s daty naměřenými ve sněhu skutečném (černá křivka – dýchání s přítomností vzduchové kapsy, červená křivka – dýchání bez přítomnosti vzduchové kapsy) [2].

Z jejich následného zpracování do grafů a jejich porovnání s předešlou studií [2] jsme zjistili, že materiálem nejpodobnějším sněhu a vhodným pro měření v laboratoři je perlit.



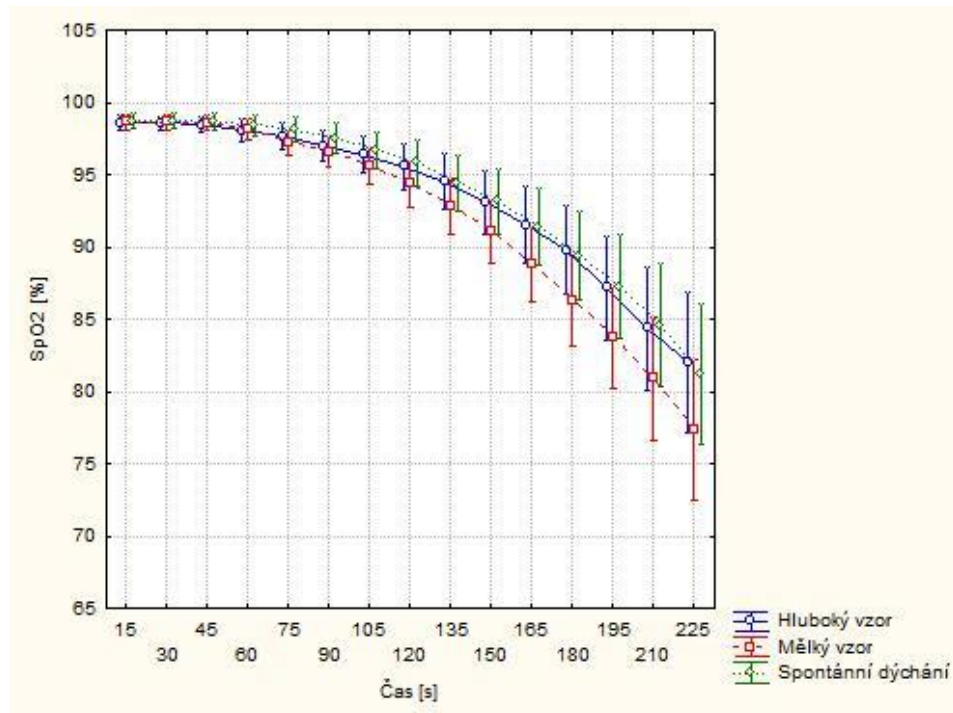
Obrázek 3.1: Graf saturace periferní krve kyslíkem v závislosti na čase, při dýchání do testovaného materiálu.



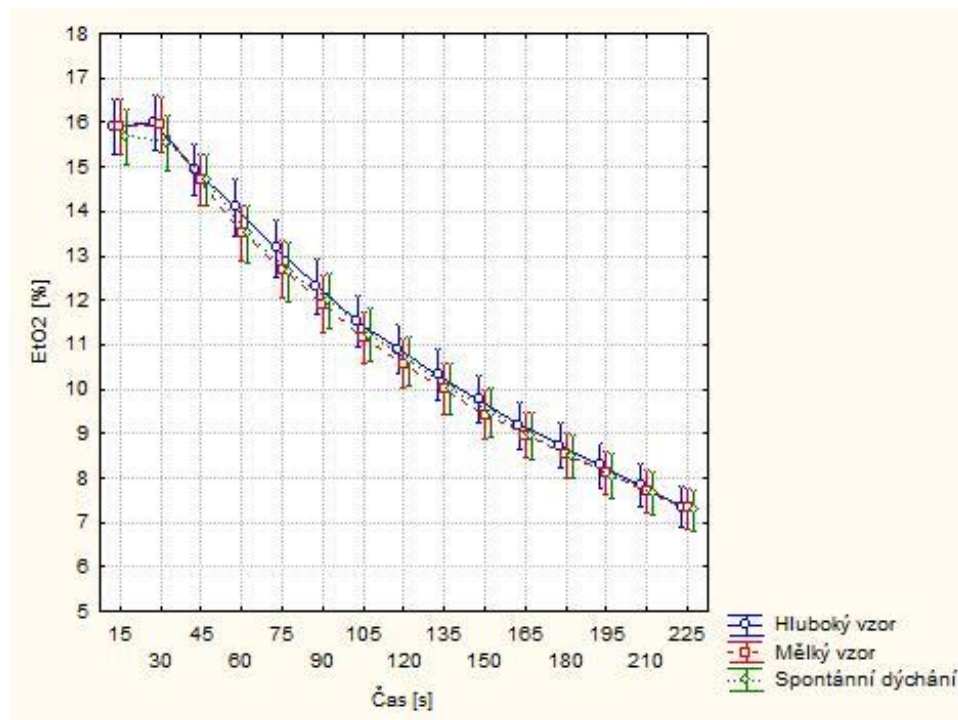
Obrázek č. 3.2: Graf koncentrace vdechovaného a vydechovaného kyslíku v závislosti na čase, při dýchání do testovaného materiálu.

### 3.2 Vliv dechového vzoru

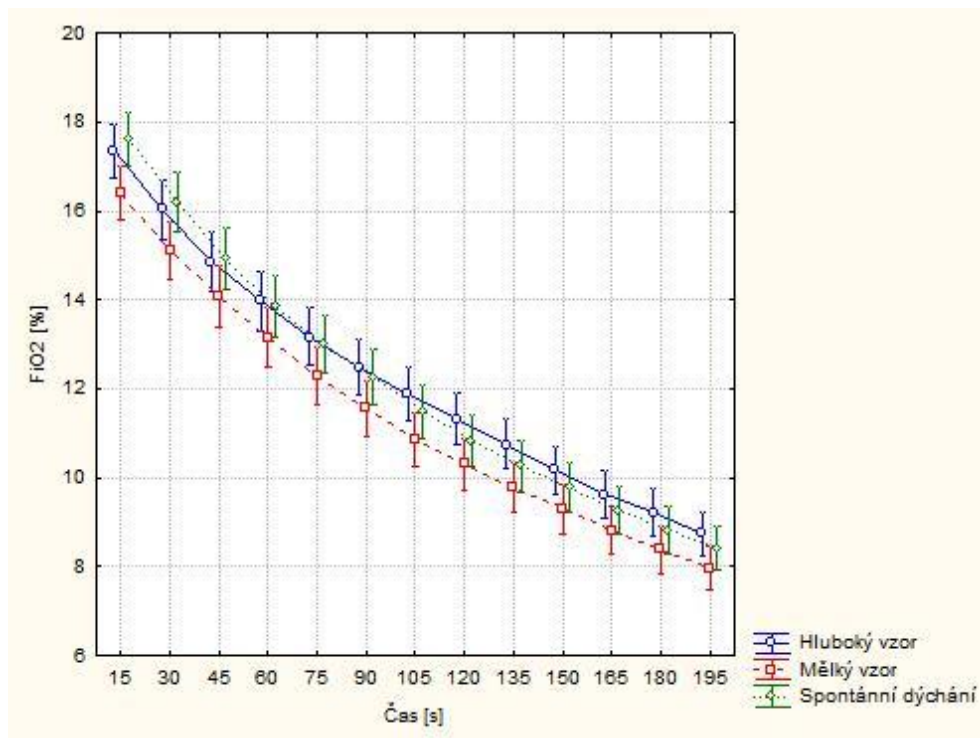
V následujících grafech jsou zobrazeny výsledky experimentu vlivu dechového vzoru na dýchání člověka zasypaného lavinovým sněhem.



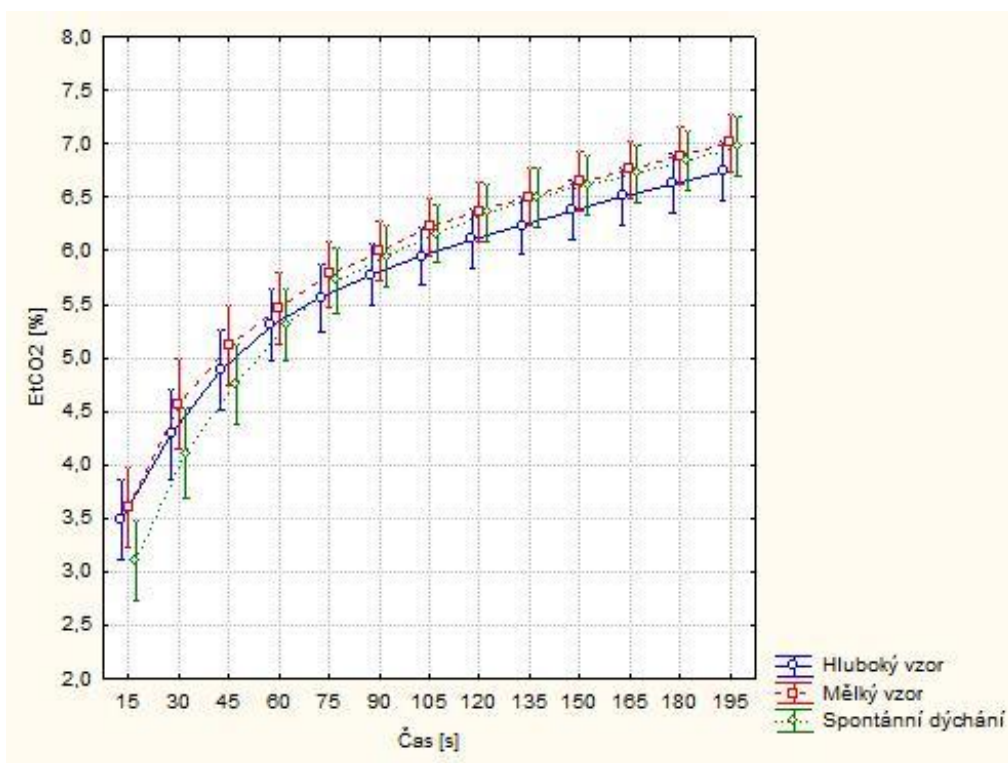
Obrázek 3.3: Saturace periferní krve kyslíkem v závislosti na čase.



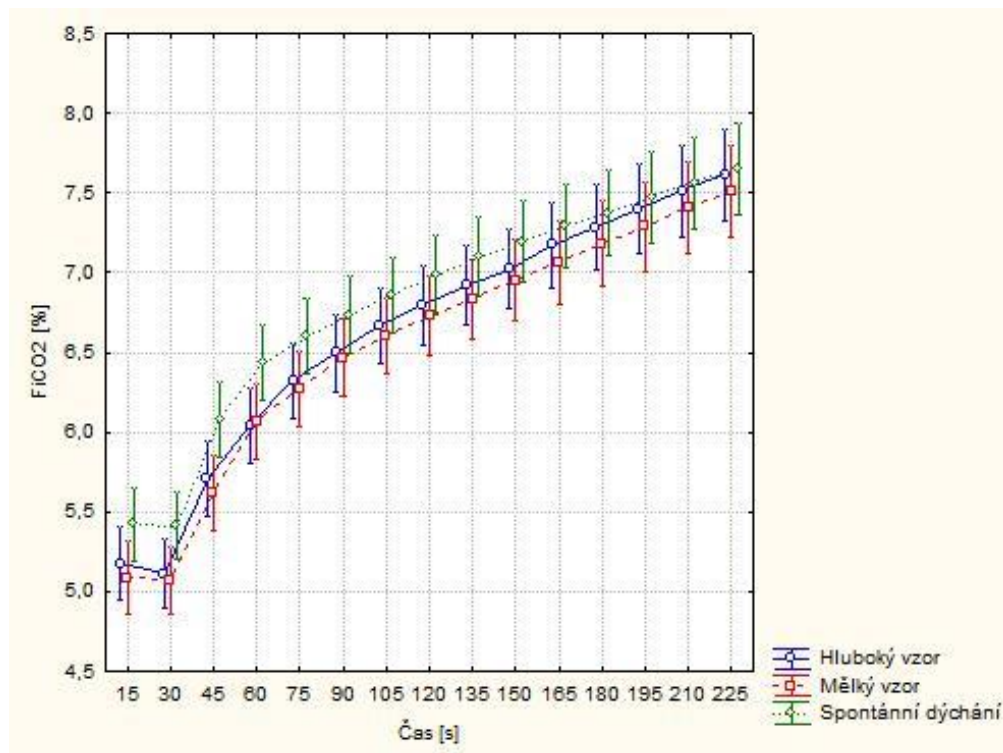
Obrázek 3.4: Koncentrace exspirovaného  $O_2$  v závislosti na čase.



**Obrázek 3.5:** Koncentrace inspirovaného  $O_2$  v závislosti na čase.



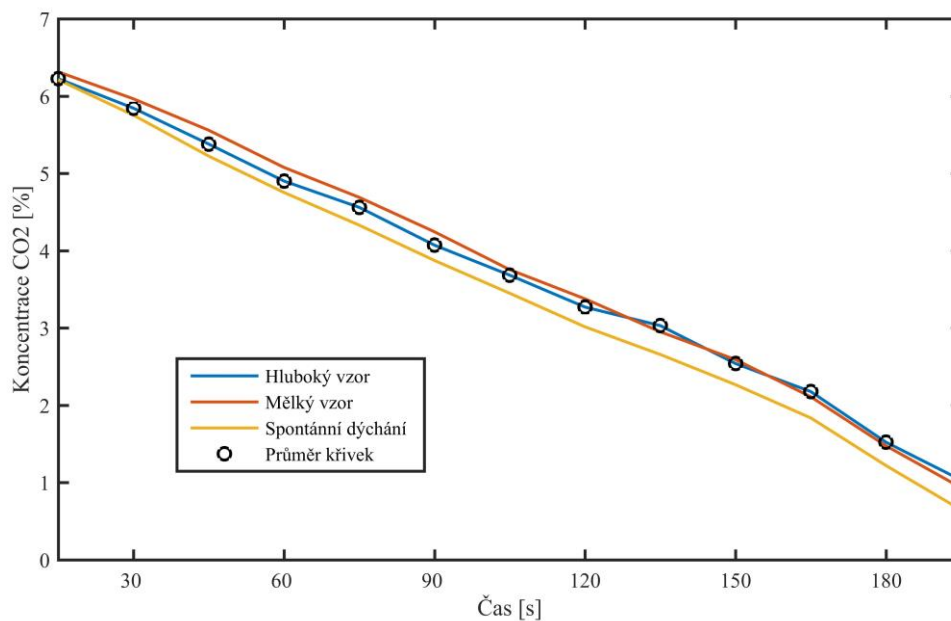
**Obrázek 3.6:** Koncentrace expirovaného  $CO_2$  v závislosti na čase.



**Obrázek 3.7:** Koncentrace inspirovaného  $CO_2$  v závislosti na čase.

## Distribuce $CO_2$ v modelu

V následujícím grafu jsou výsledné křivky z dat naměřených sondou pro záznam distribuce  $CO_2$  v modelu.



**Obrázek 3.8:** Koncentrace  $CO_2$  z jednotlivých odběrných míst modelu sněhu v závislosti na čase.



## 4 Diskuse

Hlavním výsledkem experimentu je funkční sestava simulující dýchání do lavinového sněhu v laboratorním prostředí. Na základě křivek a pozorování jsme rovněž potvrdili, že dechový vzor ovlivňuje sledované parametry koncentrace oxidu uhličitého, kyslíku a saturace periferní krve kyslíkem a tím pádem i dobu přežití organismu pod lavinovým sněhem.

Materiál simulující sníh byl zprvu sháněn na základě porovnání jeho mechanických vlastností s vlastnostmi sněhu. V potaz byly brány porézní materiály, které jsou zároveň dostatečně těžké, neboť při zátěži může být minutová ventilace vysoká, a tak by v případě lehčího materiálu mohlo dojít k jeho pro-dýchnutí [15]. Bylo vybráno několik materiálu, které byly ozkoušeny v rámci laboratorních experimentů, při čemž jako nejvhodnější vyšel po jejich vyhodnocení perlit. Výsledky experimentů ohledně výběru materiálu jsou vyobrazeny v kapitole 3.1. Křivky ve zde vyobrazených grafech nejsou úplně stejné, ale trendem velice podobné. Jedná se o prvotní měření, pouze na 2 probandech a s původní verzí modelu. Tyto nesrovnalosti byly k finálnímu experimentu odstraněny. Perlit se pro větší podobnost opravdovému sněhu ještě částečně navlhčuje, což zároveň s antibakteriálními filtry zamezí riziku proniknutí drobných prachových částic ze soustavy do respiračního systému subjektu.

Pilotní měření funkčnosti modelu proběhlo na verzi skládajícím se pouze z plastových barelů o celkovém objemu 33 L a vyplněném pouze suchým perlitem. Aby se ověřilo, že model věrně simuluje dýchání do lavinového sněhu, byla naměřená data porovnávána s daty ze sněhu skutečného [2]. Perlit jakožto materiál nahrazující sníh fungoval poměrně dobře, ale data se stále plně neshodovala, a tak bylo nutné něco změnit. Proběhly pokusy s přidáním různých odporů na měřicí clonku, to však zapříčinilo pouze zvýšení dechové práce a na základě toho experiment končil po krátkém čase, z důvodu únavy subjektů. V dalším měření už jsme používali navlhčený perlit. Hodnoty  $FiO_2$  a  $FiCO_2$  se s tímto modelem již shodovaly, ale trend saturace byl pořád odlišný. V modelu složeném z barelů totiž docházelo k pro-dýchnutí materiálu po jeho stranách. Byl tedy navržen model nový, tak jak je podrobně popsáno v kapitole 2.1. Se stejnou sestavou probíhala měření i ve sněhu skutečném, a to v rámci studie týkající se lavinové

problematiky ve spolupráci ČVUT, Univerzity Karlovy a na dobrovolnících z řad Armády České republiky.

V rámci experimentu dechového vzoru proběhla rovněž série pilotních měření. S daty naměřenými na několika prvních subjektech byl při jejich analýze zaznamenán problém s při-vdechováním okolního vzduchu. Na základě toho byly změněny náustky původní na náustky zakusovací, u nichž je riziko přídýchnutí ústy prakticky nulové. Nosní klip byl vždy probandem nejprve ozkoušen, tak aby pevně těsnil a poté byl ještě zespod přelepen lepící páskou. Jakožto marker případného, nežádoucího přidechování byl zvolen rajský plyn ( $N_2O$ ). Ten byl připojen k náustku a zapnut vždy při připojení probanda k modelu a vypnut po ukončení měření. Prostor okolo úst a nosu byl částečně utěsněn igelitovou plachtou, tak aby bylo v daném místě  $N_2O$  koncentrovanější. Koncentrace  $N_2O$  byla po celou dobu měření sledována na patientském monitoru a kdykoli byla zaznamenána jakákoli její hodnota v experimentálním okruhu, bylo měření neprodleně ukončeno. Dechový vzor samotný se nejprve měnil pouze podle frekvence s poměrem inspirium/exspirium – 1:1. To se ale po prvních měření ukázalo jako neefektivní a hlavně nepřírozené. Po 5 změřených subjektech bylo na základě konzultace a pozorování průběhu experimentu určen poměr inspirium/exspirium - 2:3. Před každým měřením byl proband obeznámen s daným vzorem, který si posléze i vyzkoušel a natrénoval.

Experiment byl prováděn na zdravých dobrovolnících (probandech) zejména z řad studentů FBMI. Nejprve dostal každý subjekt k vyplnění dotazník s otázkami ohledně jeho zdravotního stavu a kondice (hmotnost, kuřák, respirační potíže apod.). Soukromí subjektů při experimentu a ochrana jejich osobních údajů byla řádně zajištěna v souladu s legislativou a běžnou klinickou praxí. Všechna data získaná z měření byla, před jejich podrobnou úpravou potřebnou k vyhodnocení, zpracována v prostředí MATLAB a STATISTICA. Výsledné křivky v grafech jsou složené z dat od všech naměřených dobrovolníků.

Výsledky mohly být zkreslené z několika důvodů. Nádoba samotná by měla mít dostatečný objem, který by měl být větší než vitální kapacita plic, která je asi 4,5 l. Objem námi využitých nádob je 65 l, což je několikanásobek dané hodnoty, s tím že kuželovitým tvarem bylo zabráněno i předchozím problémům s pro-dechnutím po stranách. Další věc, kterou bylo nutno vzít v úvahu je, že mezi jednotlivými měřeními zůstává v materiálu oxid uhličitý po předešlém probandovi. Materiál bylo tedy nutné propláchnout vzduchem


z centrálního rozvodu stlačeného vzduchu. Hodnota saturace mohla být zkreslena kvůli pohybovým artefaktům, které jsme se ale snažili co nejvíce eliminovat tak, že v průběhu měření by měl být proband celou dobu v klidu a bez pohybu.

V kapitole 3.2 jsou vyobrazeny výsledky experimentu ohledně dechového vzoru. V porovnání všech tří dechových vzorů vyšel jako nejhorší vzor mělkého dýchání. Vzor hluboký se spontánním dýcháním jsou si velice podobné a prakticky se shodují. Dle slov probandů po absolvování experimentu připadal valně většině nejméně pohodlný opět mělký vzor. Naopak vzor hluboký někteří z nich vyzdvihli i před spontánní dýchání. V reálné situaci zavalení člověka lavinovým sněhem je celý organismus vystaven silné dávce stresu, a tak v těchto situacích dochází přirozeně k hyperventilaci, která by se dala přirovnat k mělkému vzoru. Za předpokladu, že by se daný člověk zvládl uklidnit natolik, aby svůj dechový vzor přizpůsobil dlouhým a hlubším dechům, vedl by tento počín pravděpodobně k prodloužení času jeho přežití. Rozdíl mezi jednotlivými vzory je tedy viditelný, ale na základě Bonferroniho testu statisticky nevýznamný. Experiment ale probíhal na poměrně malém počtu subjektů, a tak je možné, že by se statistická významnost projevila teprve u studie rozsáhlejší.

## 5 Závěr

V rámci bakalářské práce byl vytvořen model simulující dýchání do lavinového sněhu v laboratorním prostředí a dále byl proveden experiment vlivu dechového vzoru na dobu přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem. Zaznamenaná data byla zpracována v prostředí MATLAB a STATISTICA a následně vyhodnocena v grafech. Na základě křivek a pozorování bylo zjištěno, že dechový vzor ovlivňuje sledované parametry koncentrace oxidu uhličitého, kyslíku a saturace periferní krve kyslíkem a tím pádem i dobu přežití organismu pod lavinovým sněhem. Z výsledků laboratorního experimentu provedeného na 12 dobrovolnících vyplývá, že se jako nejefektivnější dechový vzor pro člověka zasypaného lavinovým sněhem jeví delší, hluboké dechy.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] FALK, Markus, Hermann BRUGGER a Liselotte ADLER-KASTNER. Avalanche survival chances. *Nature* [online]. 1994, **368**(6466), 21-21 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1038/368021a0. ISSN 0028-0836. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/368021a0>
- [2] ROUBÍK, Karel, Ladislav SIEGER a Karel SÝKORA. 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* [online]. 2015 [cit. 2016-11-11]. DOI: 10.1371/journal.pone.0144332. Dostupné z: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0144332>
- [3] BRUGGER, Hermann, Günther SUMANN, Roland MEISTER, Liselotte ADLER-KASTNER, Peter MAIR, Hanns Christian GUNGA, Wolfgang SCHOBERSBERGER a Markus FALK. Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in snow: implications for avalanche survival. *Resuscitation* [online]. 2003, **58**(1), 81-88 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1016/S0300-9572(03)00113-8. ISSN 03009572. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0300957203001138>
- [4] STATHAM, Grant, Pascal HAEGELI, Ethan GREENE et al. A conceptual model of avalanche hazard. *Natural Hazards* [online]. 2018, **90**(2), 663-691 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1007/s11069-017-3070-5. ISSN 0921-030X. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11069-017-3070-5>
- [5] PROKSCH, Martin, Nick RUTTER, Charles FIERZ a Martin SCHNEEBELI. Intercomparison of snow density measurements: bias, precision, and vertical resolution. *The Cryosphere* [online]. 2016, **10**(1), 371-384 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.5194/tc-10-371-2016. ISSN 1994-0424. Dostupné z: <http://www.the-cryosphere.net/10/371/2016/>
- [6] STALSBERG, Helge, Claus ALBRETSSEN, Mads GILBERT, Michael KEARNEY, Einar MOESTUE, Ivar NORDRUM, Morten ROSTRUP a Anne RBO. Mechanism of death in avalanche victims. *Virchows Archiv A Pathological Anatomy and Histopathology* [online]. 1989, **414**(5), 415-422 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1007/BF00718625. ISSN 0174-7398. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00718625>

- [7] BOYD, J., P. HAEGELI, R. B. ABU-LABAN, M. SHUSTER a J. C. BUTT. Patterns of death among avalanche fatalities: a 21-year review. *Canadian Medical Association Journal* [online]. 2009, **180**(5), 507-512 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1503/cmaj.081327. ISSN 0820-3946. Dostupné z: <http://www.cmaj.ca/cgi/doi/10.1503/cmaj.081327>
- [8] Avalanche statistics and reporting. *Colorado Avalanche information center* [online]. USA, Colorado, Aspen: CAIC, 2018 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <http://avalanche.state.co.us/accidents/statistics-and-reporting/>
- [9] Breathing pattern in humans: diversity and individuality. *Respiration physiology - Elsevier* [online]. 2000, **2000**, 123-129 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: <https://kundoc.com/pdf-breathing-pattern-in-humans-diversity-and-individuality-.html>
- [10] CHEN, Sabei, Ying LI, Zeguang ZHENG, Qun LUO a Rongchang CHEN. The analysis of components that lead to increased work of breathing in chronic obstructive pulmonary disease patients. *Journal of Thoracic Disease* [online]. 2016, **8**(8), 2212-2218 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.21037/jtd.2016.08.01. ISSN 20721439. Dostupné z: <http://jtd.amegroups.com/article/view/8763/7883>
- [11] TANGRI, S. a C. R. WOOLF. The Breathing Pattern in Chronic Obstructive Lung Disease during the Performance of Some Common Daily Activities. *CHEST Journal* [online]. 2015 [cit. 2016-11-11]. Dostupné z: <http://journal.publications.chestnet.org/article.aspx?articleid=1059925&resultClick=1>
- [12] OTIS, Arthur B., Wallace O. FENN a Hermann RAHN. Mechanics of Breathing in Man. *Journal of Applied Physiology* [online]. 1950, **2**(11), 592-607 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1152/jappl.1950.2.11.592. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappl.1950.2.11.592>
- [13] LAUBSCHER, T.P., W. HEINRICHS, N. WEILER, G. HARTMANN a J.X. BRUNNER. An adaptive lung ventilation controller. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* [online]. b.r., **41**(1), 51-59 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1109/10.277271. ISSN 00189294. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/277271/>
- [14] BERKHOF, Farida F., Jan W.K. VAN DEN BERG, Steven M. UIL a Huib A.M. KERSTJENS. Health status and health-care utilization in COPD patients: A randomized trial. *Respirology* [online]. 2015, **20**(2), 279-285 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.1111/resp.12437. ISSN 13237799. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/resp.12437>

- [15] POMEROY, J. W. a E. BRUN. *Physical properties of snow* [online]. University of Saskatchewan, 2001 [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: [http://www.usask.ca/hydrology/papers/Pomeroy\\_et\\_al\\_2001.pdf](http://www.usask.ca/hydrology/papers/Pomeroy_et_al_2001.pdf)
- [16] AHN, Jinho, Melissa HEADLY, Martin WAHLEN, Edward J. BROOK, ... Paul A. MAYEWSKI a Kendrick C. TAYLOR. CO2 diffusion in polar ice: observations from naturally formed CO2 spikes in the Siple Dome (Antarctica) ice core. *Journal of Glaciology* [online]. 2008, **54**(187), 685-695 [cit. 2018-05-11]. DOI: 10.3189/002214308786570764. ISSN 0022-1430. Dostupné z: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022143000208794/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022143000208794/type/journal_article)

## Seznam obrázků

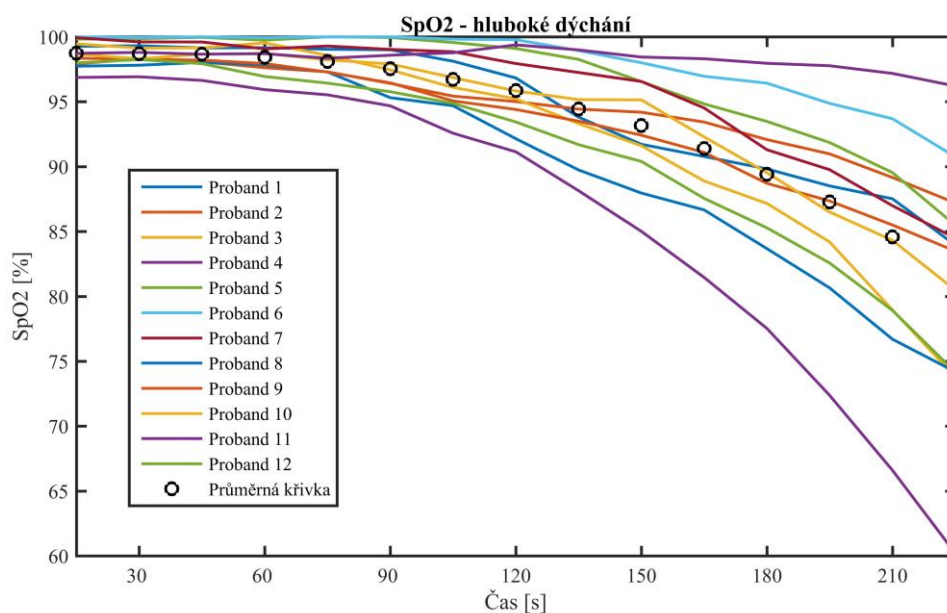
<b>Obrázek č. 1.1:</b> Graf pravděpodobnosti přežití pod lavinou. Zdroj: [3].....	10
<b>Obrázek č. 2.1:</b> Stojan modelu.....	14
<b>Obrázek č. 2.2:</b> Kužel na materiál simulující sněh.....	15
<b>Obrázek č. 2.3:</b> Kužel zasazený ve stojanu se sondou pro záznam distribuce $CO_2$ v modelu.....	15
<b>Obrázek č. 2.4:</b> Schéma laboratorního modelu.....	16
<b>Obrázek č. 2.5:</b> Sonda pro záznam distribuce $CO_2$ v modelu.....	18
<b>Obrázek č. 2.6:</b> Kóta sondy pro záznam distribuce $CO_2$ v modelu.....	18
<b>Obrázek č. 2.7:</b> Sestava pro ověření zdravotní nezávadnosti modelu.....	19
<b>Obrázek č.2.8:</b> Aplikace pro řízení dechového vzoru.....	22
<b>Obrázek č. 2.9:</b> Oprava signálu saturace periferní krve kyslíkem.....	24
<b>Obrázek 2.10:</b> Graf záznamu distribuce $CO_2$ z modelu, schodový signál.....	25
<b>Obrázek č. 2.11:</b> Křivky pro všech 12 probandů, při jednom dechovém vzoru.....	25
<b>Obrázek 3.1:</b> Graf saturace periferní krve kyslíkem v závislosti na čase, při dýchání do testovaného materiálu.....	28
<b>Obrázek č. 3.2:</b> Graf koncentrace vdechovaného a vydechovaného kyslíku v závislosti na čase, při dýchání do testovaného materiálu.....	29
<b>Obrázek 3.3:</b> Saturace periferní krve kyslíkem v závislosti na čase.....	30
<b>Obrázek 3.4:</b> Koncentrace exspirovaného $O_2$ v závislosti na čase.....	30
<b>Obrázek 3.5:</b> Koncentrace inspirovaného $O_2$ v závislosti na čase.....	31
<b>Obrázek 3.6:</b> Koncentrace exspirovaného $CO_2$ v závislosti na čase.....	31
<b>Obrázek 3.7:</b> Koncentrace inspirovaného $CO_2$ v závislosti na čase.....	32
<b>Obrázek 3.8</b> Koncentrace $CO_2$ z jednotlivých odběrných míst modelu sněhu v závislosti na čase.....	32



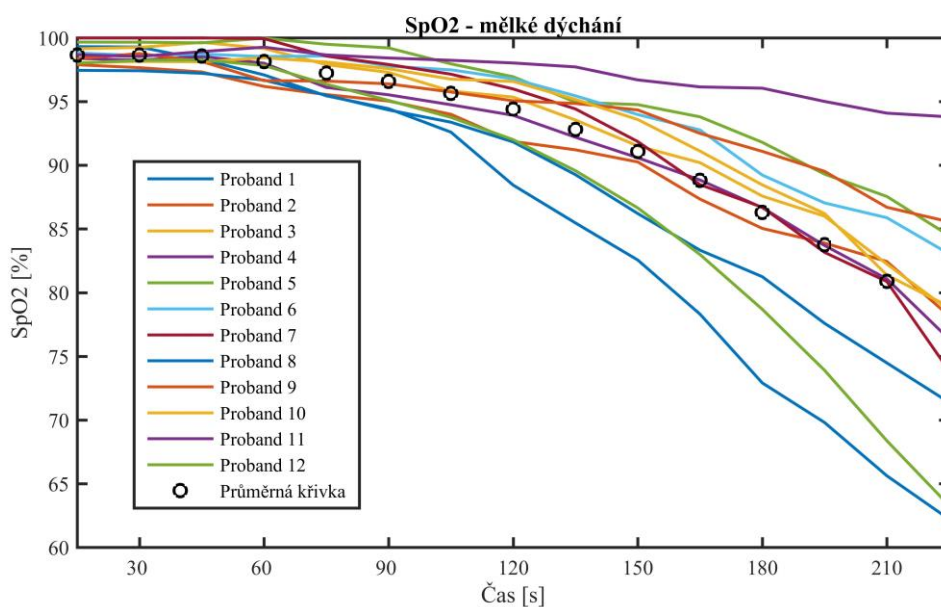
# Seznam tabulek

<b>Tabulka 2.1:</b> Hmotnost filtračního papíru a vaty před a po provedení experimentu zdravotní nezávadnosti.....	20
<b>Tabulka 2.2:</b> Stupně validity dosažené hladiny významnosti pro v experimentu měřené parametry.....	26

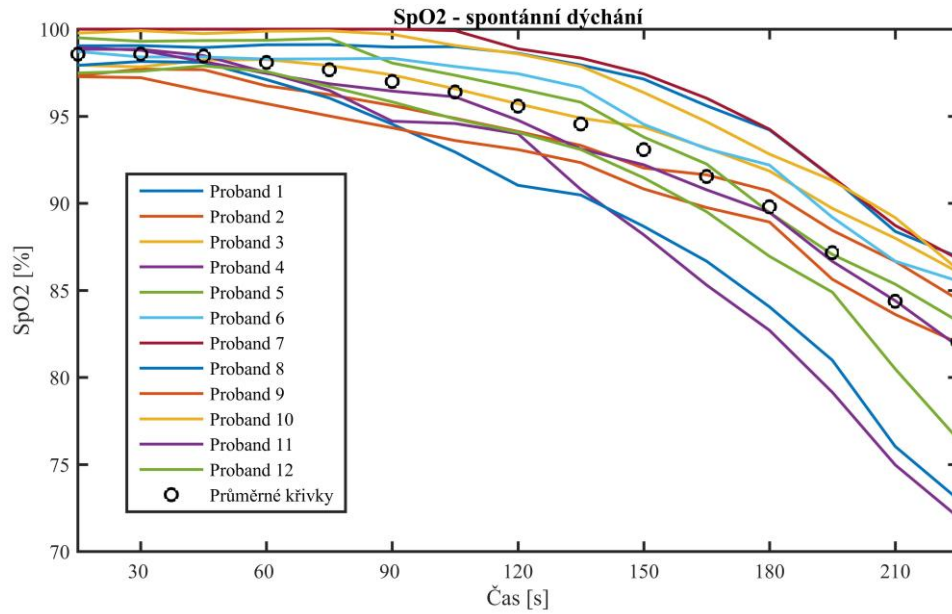
## Příloha A: Grafy jednotlivých dechových vzorů



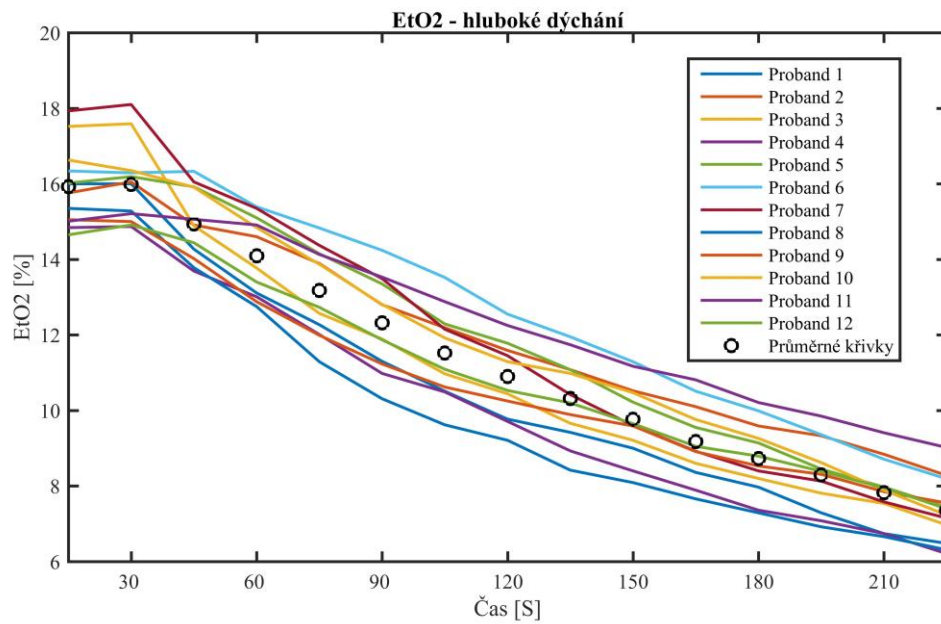
Obrázek č.1: Graf  $SpO_2$  v závislosti na čase pro všechny probandy, při hlubokém dechovém vzoru.



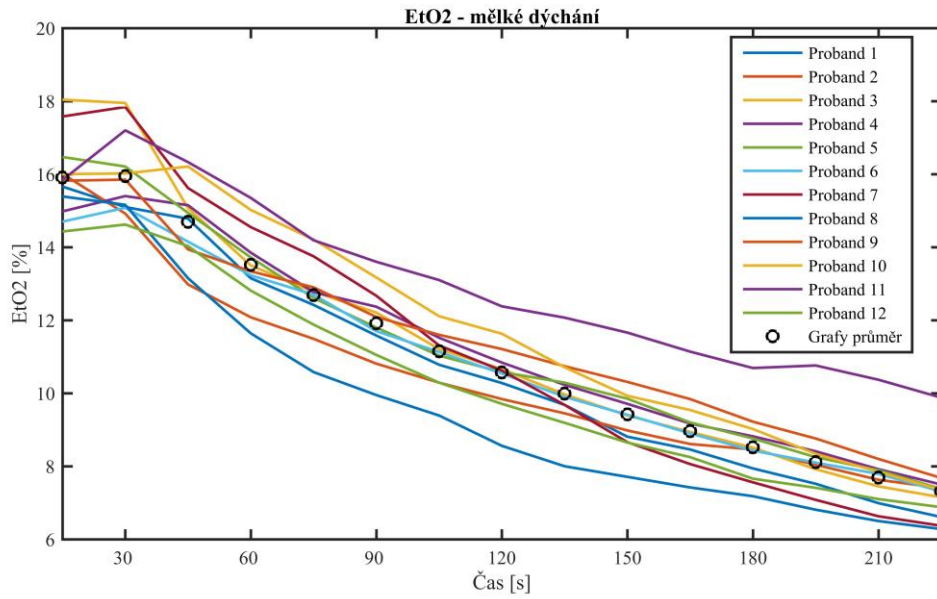
Obrázek č.2: Graf  $SpO_2$  v závislosti na čase pro všechny probandy, při mělkém dechovém vzoru.



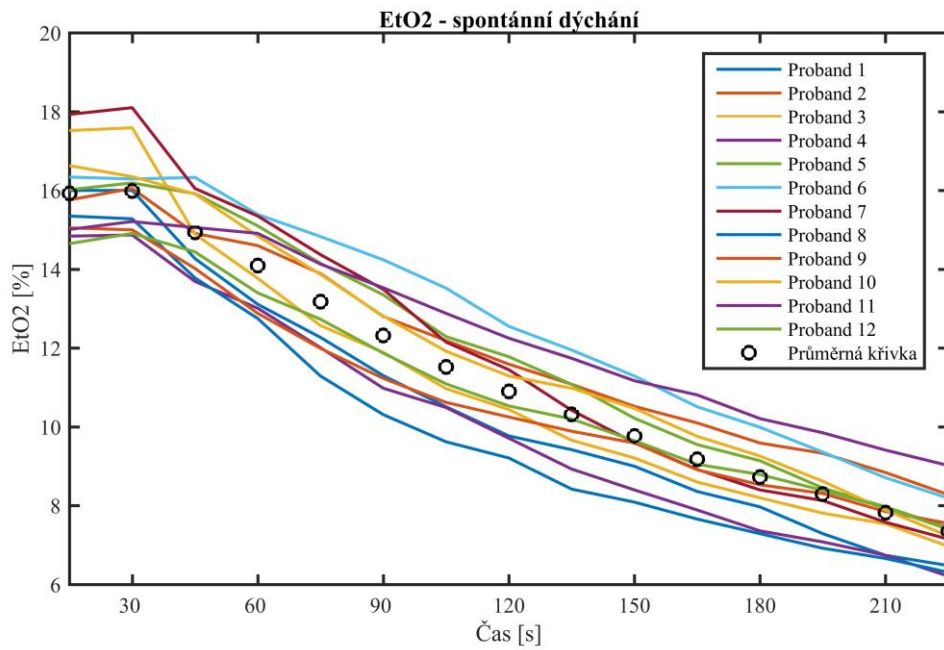
**Obrázek č.3:** Graf  $SpO_2$  v závislosti na čase pro všechny probandy, při spontánním dýchání.



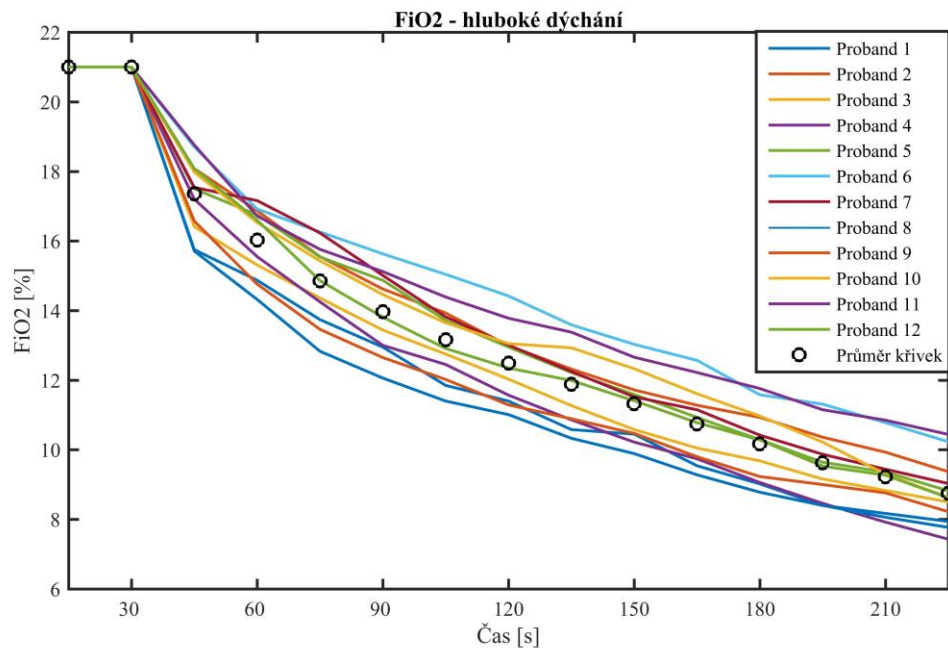
**Obrázek č.4:** Koncentrace vydechaného kyslíku v závislosti na čase, pro hluboký vzor.



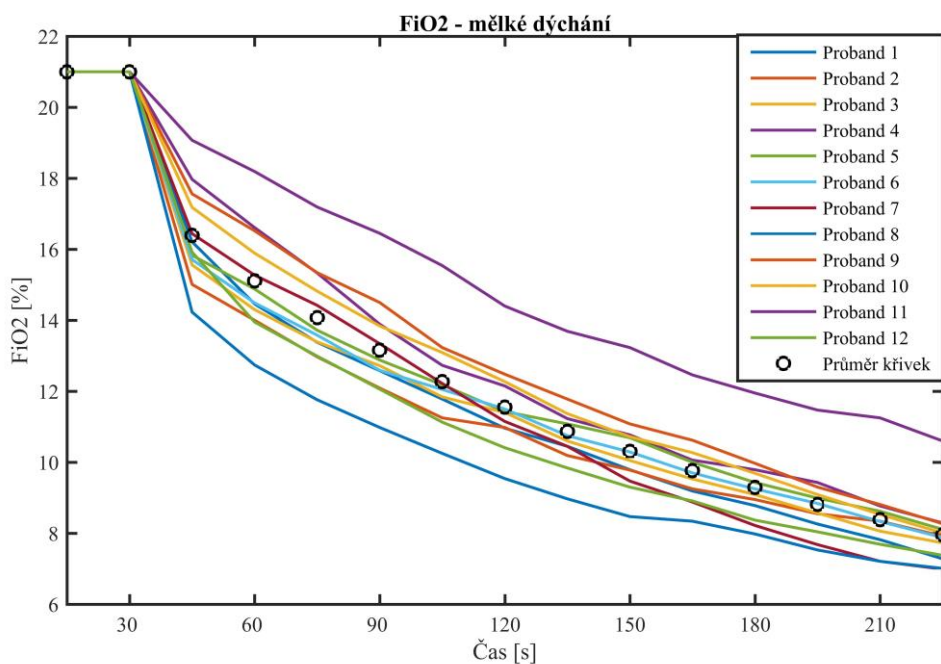
**Obrázek č.5:** Koncentrace vydechovaného kyslíku v závislosti na čase, pro mělký vzor.



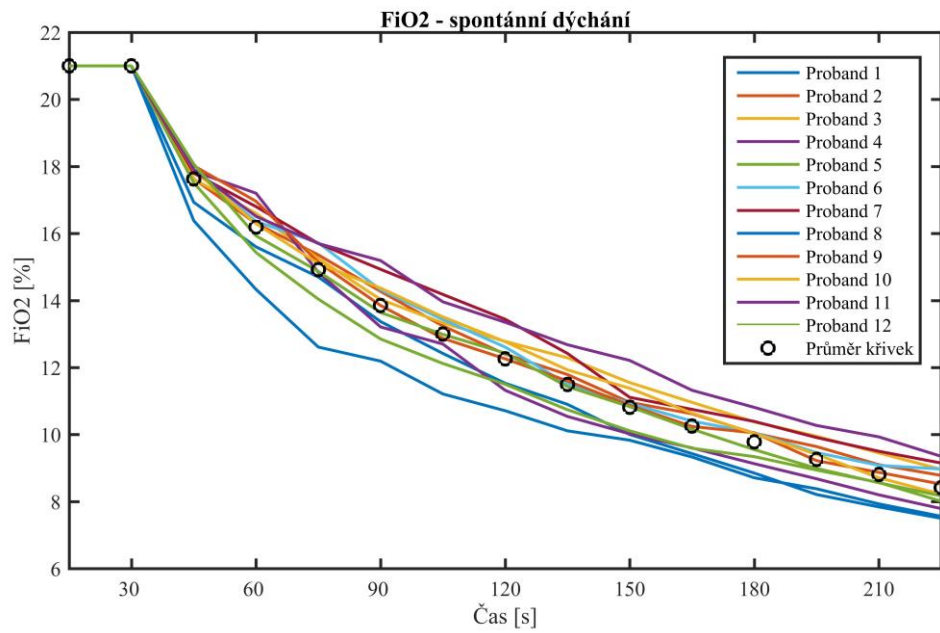
**Obrázek č.6:** Koncentrace vydechovaného kyslíku v závislosti na čase, při spontánním dýchání.



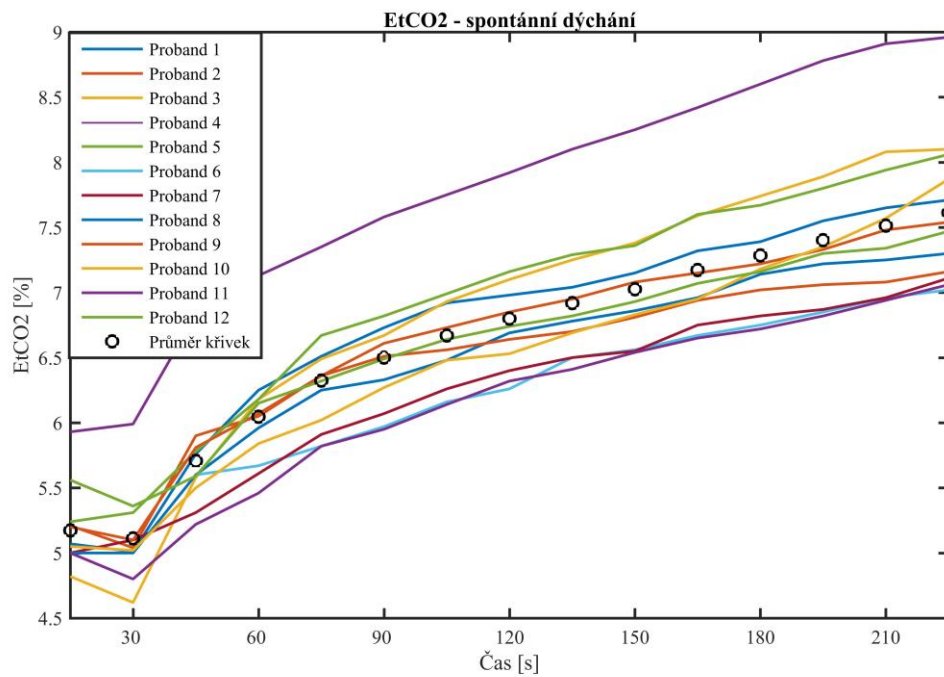
**Obrázek č.7:** Koncentrace vdechovaného kyslíku v závislosti na čase, pro hluboký vzor.



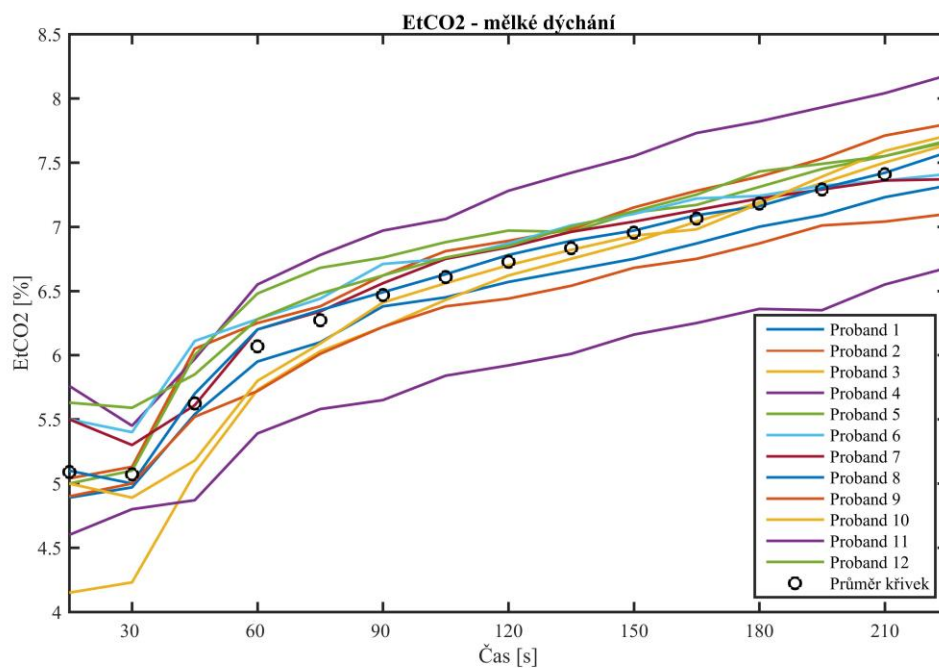
**Obrázek č.8:** Koncentrace vdechovaného kyslíku v závislosti na čase, pro mělký vzor.



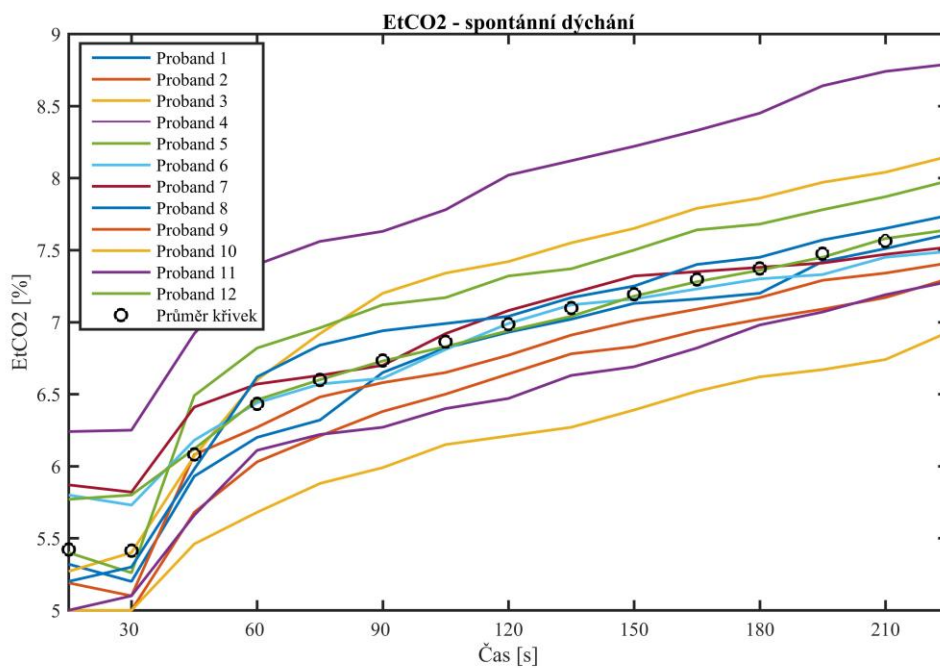
**Obrázek č.9:** Koncentrace vdechovaného kyslíku v závislosti na čase, při spontánním dýchání.



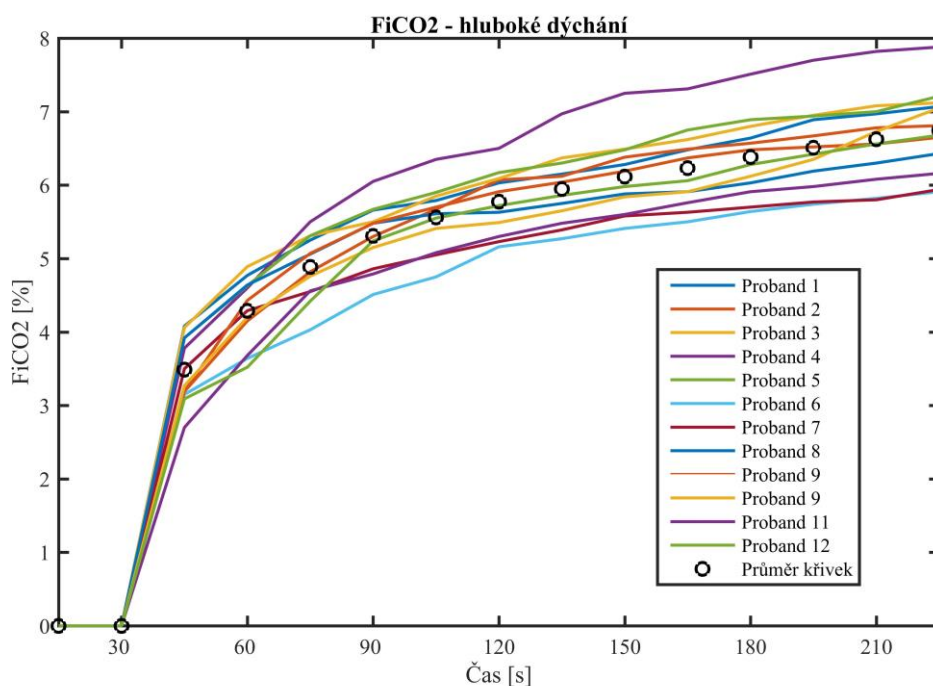
**Obrázek č.10:** Koncentrace vydechovaného oxidu uhličitého v závislosti na čase, pro hluboké dýchání.



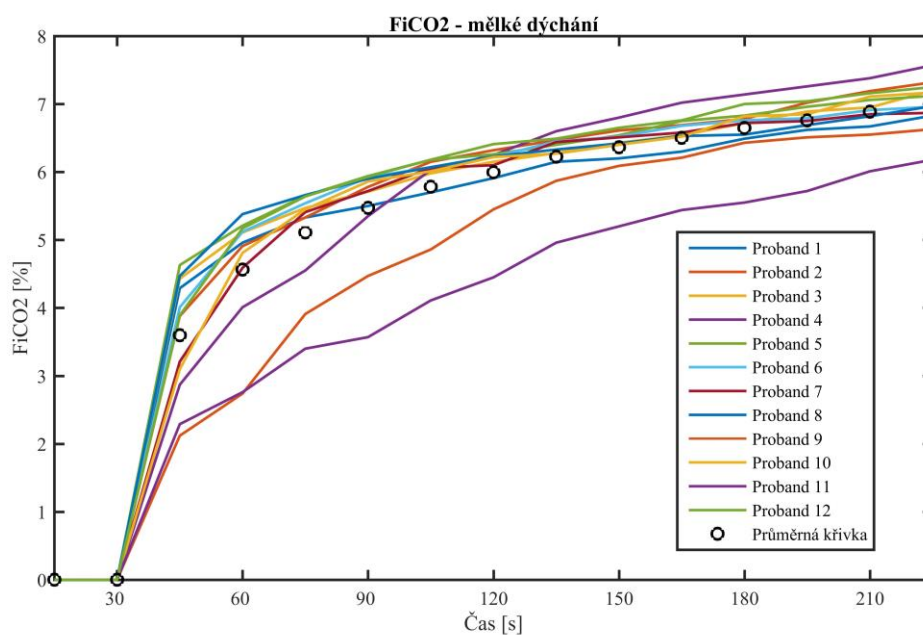
**Obrázek č.11:** Koncentrace vydechaného oxidu uhličitého v závislosti na čase, pro mělké dýchání.



**Obrázek č.12:** Koncentrace vydechaného oxidu uhličitého v závislosti na čase, při spontánním dýchání.

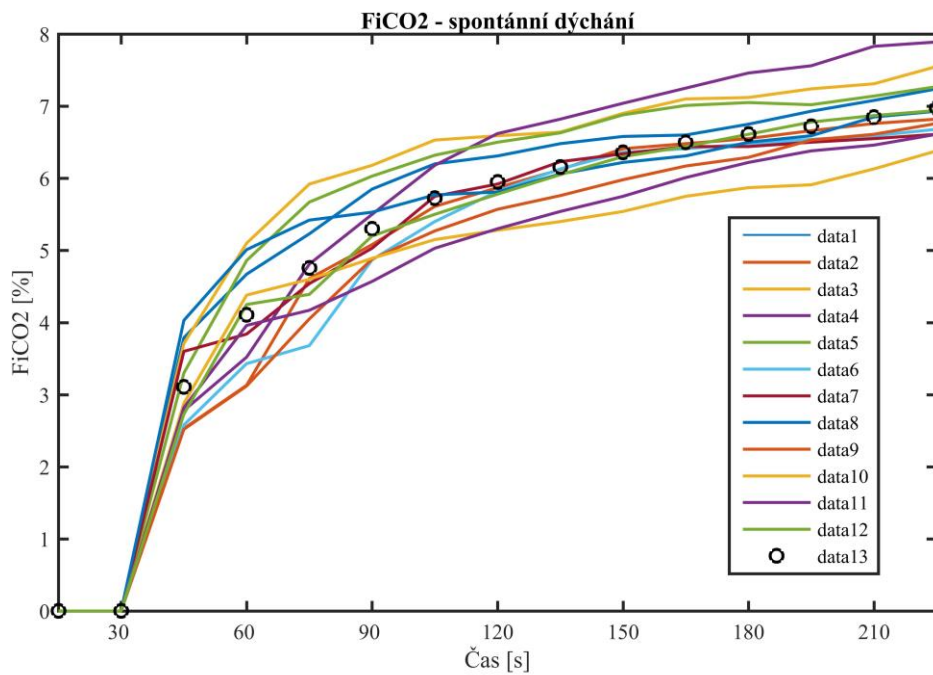


**Obrázek č.13:** Koncentrace vdechovaného oxidu uhličitého v závislosti na čase, pro hluboké dýchání.



**Obrázek č.14:** Koncentrace vdechovaného oxidu uhličitého v závislosti na čase, pro mělké dýchání.





**Obrázek č.15:** Koncentrace vdechovaného oxidu uhličitého v závislosti na čase, při spontánním dýchání.

## **Příloha B: Dokumenty etické komise**

# **Informovaný souhlas a informace pro subjekt hodnocení**

**Název projektu: Vliv dechového vzoru na dechovou práci člověka dýchajícího do simulovaného lavinového sněhu**

**Hlavní řešitel:** David Chadima, FBMI ČVUT, chadidav@fbmi.cvut.cz

**Spoluřešitel:** Ing. Václav Ort ČVUT v Praze, FBMI.

Cílem je vytvořit laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu a s jeho pomocí ověřit vliv změny dechového vzoru na dechovou práci člověka zasypaného lavinovým sněhem. Dechový vzor popisujeme pomocí řady parametrů, jako jsou dechový objem, dechová frekvence a délka výdechu nebo nádechu. U těchto parametrů existuje velké množství možných kombinací tak, abychom dosáhli stejné minutové ventilace. Lidské tělo se totiž vždy přizpůsobuje daným podmínkám, tak aby to pro něj bylo co nejefektivnější. V případě změny dechového vzoru je to klinicky prokázáno u pacientů s onemocněním dýchacích cest, jako je například chronická obstrukce dýchacích cest. Otázkou je, jakým způsobem se mění dechový vzor v souvislosti s dechovou prací u člověka zasypaného lavinovým sněhem. Studie se zabývá aktuálním tématem, které může prohloubit znalosti ohledně přežití lidského organismu pod lavinou. Projekt je realizován v rámci předmětu „Semestrální projekt“, ale předpokládá se u něj další pokračování v bakalářské práci.

Experiment bude prováděn na zdravých dobrovolnících (subjektech) zejména z řad studentů FBMI. Nejprve dostane každý subjekt k vyplnění dotazník s otázkami ohledně jeho zdravotního stavu a kondice (hmotnost, kuřák, respirační potíže apod.).

Konstrukce testovacího modelu bude umístěna na vyvýšeném místě na stole, při čemž subjekt bude sedět vedle modelu na židli tak, aby mohl být jednoduše připojen. Model se skládá z hlavní nádoby válcovitého tvaru, v níž bude vložen materiál simulující sníh. Jako materiál reprezentující sníh se zdá být nejlepší perlit, který ale bude v průběhu ověřování případně doplněn o rašelinu nebo kůru. Do nádoby je zavedena trubice, na

kterou je napojena standardní spirometrická clonka a pomocí monitoru vitálních funkcí Datex-Ohmeda S/5 Patient Monitor bude zaznamenávána saturace periferní krve kyslíkem a koncentrace kyslíku a oxidu uhličitého v inspirovaném a exspirovaném vzduchu.

Nejprve se začne s dýcháním 2 minuty pouze skrze clonku pro ustálení hodnot. Poté bude subjekt připojen k modelu, do kterého bude dýchat, dokud mu nepoklesne saturace periferní krve kyslíkem na námi určenou spodní hranici 85 %. Proband bude mít po celou dobu měření možnost experiment sám kdykoli přerušit a být odpojen od sestavy. Po odpojení subjekt dodýchává pouze s měřicí clonkou opět do ustálení hodnot. Data budou zpracovávána v prostředí MATLAB a bude sledován vývoj jednotlivých veličin v čase.

Mezi směsí uvnitř modelu a subjektem jsou postupně umístěny tři bariéry chránící subjekt před vdechnutím směsi. Otvor v nádobě je překryt textilií a mimo nádobu jsou na trubici napojeny dva antibakteriální filtry. V průběhu měření bude u subjektu klesat oxygenace organismu a poroste kapnie. Po celou dobu je ale monitorována saturace periferní krve kyslíkem, u které byla stanovena spodní hranice 85%, při jejímž překročení je měření ukončeno. Subjekt má zároveň možnost měření kdykoli sám ukončit. Subjekt bude rovněž připojen ke dvěma nezávislým pulzním oxymetrům pro případ selhání jednoho z nich. V potaz bude brána vždy ta nižší hodnota.

Náklady na odškodnění v případě poškození probanda ponese ČVUT FBMI, nicméně riziko je prakticky nulové. Účast na experimentu je zcela dobrovolná, bez nároku na jakoukoliv odměnu. Zároveň se nepředpokládají žádné finanční výdaje probanda.

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.

Záznamy, podle nichž lze identifikovat probanda, budou uschovány jako důvěrné a nebudou, v míře zaručené právními předpisy, veřejně zpřístupněny. Budou-li výsledky studie publikovány, totožnost probanda nebude zveřejněna.

Vyskytne-li se informace, která by mohla mít vliv na rozhodnutí probanda, zda pokračovat v účasti ve studii nebo ne, bude proband o této skutečnosti včas informován.

Další informace týkající se této studie a práv probandů lze získat u výše zmíněných řešitelů. V případě poškození zdraví v souvislosti se studií kontaktujte hlavního řešitele projektu.

Experimentu se nemůže účastnit subjekt s jakýmkoli typem onemocnění dýchacích cest, jako jsou například astmatici, nebo jakýmkoli typem onemocnění kardiovaskulárního systému. Subjekt nesmí rovněž trpět onemocněním Diabetes mellitus. Předpokládaná doba trvání experimentu v rámci jednoho probanda je typicky 30 minut. Studie se zúčastní 10-20 probandů.

Vaše účast ve studii je dobrovolná, můžete ji odmítnout nebo můžete od účasti ve studii kdykoliv odstoupit, a to bez udání důvodu a bez jakýchkoliv finančních, právních či jiných následků.

Jméno probanda:

Datum narození:

Proband byl do studie zařazen pod číslem:

Odpovědný řešitel:

Podpis probanda:

Datum:

Podpis odpovědného řešitele:

Datum:

## Sylabus výzkumného projektu

A: Základní údaje o výzkumném projektu:	
Název projektu: <b>Vliv dechového vzoru na dechovou práci člověka dýchajícího do simulovaného lavinového sněhu</b>	
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 <i>(V závislosti na typu testovaných subjektů vyplňte buď část B, nebo část C tohoto sylabu)</i>
Cíl projektu, testovaná hypotéza: Cílem je vytvořit laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu a s jeho pomocí ověřit vliv změny dechového vzoru na dechovou práci člověka zasypaného lavinovým sněhem.	
Přínos projektu v technické, diagnostické, léčebné oblasti, pro lékařské poznání nebo individuální subjekt hodnocení: Studie se zabývá aktuálním tématem, které může prohloubit znalosti ohledně přežití lidského organismu pod lavinou a do jisté míry navazuje na studii profesora Roubíka [1]. Projekt je realizován v rámci předmětu „Semestrální projekt“, ale předpokládá se u něj další pokračování v bakalářské práci.  [1] Roubík Karel, Sieger Ladislav a Sýkora 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. <i>Plos ONE</i> [online]. 2015 [cit. 2016-11-11]. DOI: 10.1371/journal.pone.0144332. Dostupné z: <a href="http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0144332">http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0144332</a>	
B: Charakteristika souboru subjektů (osob) klinického hodnocení:	
Počet: 10-20	Věková struktura: převážně studenti FBMI, případně další dobrovolníci pro doplnění skupiny
Pohlaví: M/Ž	Způsob jejich náboru: Dohodou na FBMI

Odměna za účast: není	Jiné: není
Doba trvání celého projektu (datum od-do): 4. 1. 2017 do 30. 9. 2018	Doba trvání pro jeden subjekt hodnocení: typicky cca 30 min
<p>Popis nakládání se subjekty, popis intervence, odebírání vzorků apod:</p> <p>Nejprve dostane každý subjekt k vyplnění dotazník s otázkami ohledně jeho zdravotního stavu a kondice (hmotnost, kuřák, respirační potíže apod.).</p> <p>Konstrukce testovacího modelu bude umístěna na vyvýšeném místě na stole, při čemž subjekt bude sedět vedle modelu na židli tak, aby mohl být jednoduše připojen. Model se skládá z hlavní nádoby válcovitého tvaru, v níž bude vložen materiál simulující sněh. Jako materiál reprezentující sněh se zdá být nejlepší perlit, který ale bude v průběhu ověřování případně doplněn o rašelinu nebo kůru.</p> <p>Do nádoby je zavedena trubice, na kterou je napojena standardní spirometrická clonka a pomocí monitoru vitálních funkcí Datex-Ohmeda S/5 Patient Monitor bude zaznamenávána saturace periferní krve kyslíkem a koncentrace kyslíku a oxidu uhličitého v inspirovaném a expirovaném vzduchu.</p> <p>Nejprve se začne s dýcháním 2 minuty pouze skrze clonku pro ustálení hodnot. Poté bude subjekt připojen k modelu, do kterého bude dýchat, dokud mu nepoklesne saturace periferní krve kyslíkem na námi určenou spodní hranici 85 %. Proband bude mít po celou dobu měření možnost experiment sám kdykoli přerušit a být odpojen od sestavy. Po odpojení subjekt dodýchává pouze s měřicí clonkou opět do ustálení hodnot. Data budou zpracovávána v prostředí MATLAB a bude sledován vývoj jednotlivých veličin v čase.</p>	
<p>Liší se projekt od standardního postupu v denní praxi: <input checked="" type="checkbox"/> ANO      <input type="checkbox"/> NE</p> <p>V případě, že ano, popište rozdíly:</p> <p>Využijeme standardní měřicí clonku patientského monitoru Datex-Ohmeda S/5 Patient Monitor, ale na rozdíl od běžné praxe bude připojena k modelu simulujícímu lavinový sněh. Model, na kterém bude měření probíhat, je plastová nádoba o objemu 19 l s otvorem pro připojení spirometrické clonky ve spodní části. Nádoba je vyplněna materiálem simulujícím lavinový sněh (vlhký perlit, případně směs vlhkého perlitu, rašeliny a mulčovací kůry v případě potřeby zvýšení průtočného odporu směsi). Mezi směsí uvnitř modelu a subjektem jsou postupně umístěny tři bariéry chránící subjekt</p>	

před vdechnutím směsi. Otvor v nádobě je překryt textilií a mimo nádobu jsou na trubici napojeny dva antibakteriální filtry.

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

V průběhu měření bude u subjektu klesat oxygenace organismu a poroste kapnie. Po celou dobu je ale monitorována saturace periferní krve kyslíkem, u které byla stanovena spodní hranice 85%, při jejímž překročení je měření ukončeno. Subjekt má zároveň možnost měření kdykoli sám ukončit. Subjekt bude rovněž připojen ke dvěma nezávislým pulzním oxymetrům pro případ selhání jednoho z nich. V potaz bude brána vždy ta nižší hodnota.

Jak je zajištěna bezpečnost testovaného subjektu:

Celá konstrukce je vybavena třemi filtry, z nichž první je tkanina, fungující jako základní oddělení respirační soustavy od modelu sněhu a zbylé dva jsou antibakteriální. Abychom snížili riziko proniknutí prachu a drobných částic, bude materiál navlhčen. Soukromí probandů při experimentu a ochrana jejich osobních údajů bude řádně zajištěna v souladu s legislativou a běžnou klinickou praxí. Experimentu se nemůže účastnit subjekt s jakýmkoli typem onemocnění dýchacích cest, jako jsou například astmatici, nebo jakýmkoli typem onemocnění kardiovaskulárního systému. Subjekt nesmí rovněž trpět onemocněním Diabetes mellitus.

Kdo ponese náklady na odškodnění v případě poškození subjektu hodnocení:  
ČVUT FBMI

C: Doplňující informace k výzkumnému projektu:

Výzkumný cíl tohoto projektu se týká aktuálního tématu. I přes to, že je tato studie realizována pouze v rámci předmětu „Semestrální projekt“, předpokládá se u ní další pokračování v bakalářské práci a představuje potenciál pro publikační činnost.

V Kladně dne 13. 12. 2016

\_\_\_\_\_

*podpis hlavního řešitele*

# **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:** Vliv dechového vzoru na dechovou práci člověka dýchajícího do simulovaného lavinového sněhu

**Name of the project:** The affect of breathing pattern on the work of breathing into simulated avalanche snow

**Hlavní řešitel projektu:** David Chadima, FBMI ČVUT, chadidav@fbmi.cvut.cz

## **Stručný popis projektu**

Cílem je vytvořit laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu a s jeho pomocí ověřit vliv změny dechového vzoru na dechovou práci člověka zasypaného lavinovým sněhem. Dechový vzor popisujeme pomocí řady parametrů, jako jsou dechový objem, dechová frekvence a délka výdechu nebo nádechu. U těchto parametrů existuje velké množství možných kombinací tak, abychom dosáhli stejné minutové ventilace. Lidské tělo se totiž vždy přizpůsobuje daným podmínkám, tak aby to pro něj bylo co nejefektivnější. V případě změny dechového vzoru je to klinicky prokázáno u pacientů s onemocněním dýchacích cest, jako je například chronická obstrukce dýchacích cest. Otázkou je, jakým způsobem se mění dechový vzor v souvislosti s dechovou prací u člověka zasypaného lavinovým sněhem. Experiment bude prováděn na zdravých dobrovolnících zejména z řad studentů FBMI na námi vytvořeném laboratorním modelu.

**Charakter projektu:** Výzkum prováděný v rámci předmětu „Semestrální projekt“ a předpokládá se u něj další pokračování v bakalářské práci.

## **Seznam příkládaných dokumentů:**

- sylabus projektu
- informovaný souhlas vč. informace pro subjekt hodnocení

V Kladně dne 4. 1. 2017

---

*podpis hlavního řešitele*



## **Příloha C: Protokol měření**

### **Protokol – Měření dechového vzoru člověka zasypaného lavinovým sněhem**

Přístroje:

Datex Ohmeda 5 + příslušenství (D-lite, sonda pro pulzní oxymetrii), antibakteriální filtr – Servo Duo Guard (Maquet), síto pro dutinu o daném objemu, konstrukce pro laboratorní model sněhu, nosní klip

Cíle experimentu:

- Navrhnout, realizovat a ověřit laboratorní model simulující vlastnosti lavinového sněhu z hlediska výměny plynů při dýchání zasypaného člověka.
- Provést pilotní studii na zdravých dobrovolnících zjišťující vliv změny vybraných parametrů na dobu přežití člověka zasypaného lavinovým sněhem.

#### **Příprava:**

##### **Model:**

- Připravit perlit o dané vlhkosti – hmotnost barelu zaplněného po rysku – 18,2 kg.
- Připojit mechanický filtr ke spodní části laboratorního modelu.
- Umístit do modelu síto pro dutinu 2 L.
- Umístit do modelu sondu pro záznam šíření plynu z modelu sněhu.
- Zkontrolovat, zda jsou všechny trojcestné ventily ve správné pozici.
- Vyplnit konstrukci materiálem simulujícím sněh.
- Nasadit soustavu s antibakteriálním filtrem a hadiček k výstupu z modelu.

##### **Technika:**

- Připojit k přístroji Datex hadičky pro záznam plynů.
- Připojit k přístroji Datex sondu pro pulzní oxymetrii.
- V prostředí S5 collect nastavit sběr potřebných parametrů: Waves – vše, Trends - O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>.
- Nastavit parametry v aplikaci pro daný dechový vzor v prostředí LabVIEW.

**Proband:**

- Uložit probanda na podložku vedle modelu.
- Nasadit sondu pro pulzní oxymetrii a nosní klip.
- Připojit probanda ke spirometrické clonce s antibakteriálním filtrem.

**Měření:**

Dechový vzor:

Normálně

Mělce

Hluboce

Po připojení probanda k sestavě spirometrická clonka/antibakteriální filtr zapnout záznam sběru dat.

Čas:

- Po dobu 3 minut dýchat bez připojení k modelu.

Připojení probanda k modelu s materiálem simulujícím lavinový sněh.

Čas:

Odpojení probanda po 5 minutách nebo na jeho žádost.

Čas:

Důvod odpojení:

- Dýchání do ustálení hodnot.

Odpojení probanda.

Čas:

- Měření záznamu šíření plynů v profilu.

Konec měření.

Čas:

- Uložení dat, ukončení měření.
- Vypláchnutí modelu vzduchem, vyjmutí sondy pro měření záznamu z profilu, vyprázdnění modelu.

## **Příloha D: Obsah přiloženého CD**

- 1) Klíčová slova v českém a anglickém jazyce
- 2) Abstrakt v českém jazyce
- 3) Abstrakt v anglickém jazyce
- 4) Naskenované zadání práce
- 5) Bakalářská práce