

Univerzita Karlova v Praze  
Fakulta tělesné výchovy a sportu

Autoreferát disertační práce

Ventilačně-respirační změny a difuze plynů v simulované sněhové lavině

Katedra fyziologie a biochemie

Studijní program: Kinantropologie

Autor: Mgr. Karel Sýkora

Školitel: doc. MUDr. Staša Bartůňková, CSc.

Konzultant: Ing. Ladislav Sieger, CSc.

Disertační práce představuje původní rukopis. S jejím plným textem je možné se seznámit v Ústřední tělovýchovné knihovně, J. Martího 31, Praha 6.

18. 5. 2016

**Oponenti:** .....

**Datum konání obhajoby:** .....

**Předseda komise pro obhajobu:** .....

Tématem disertační práce je problematika přežití při zasypání sněhovou lavinou. Zaměřuje se především na ventilačně-respirační parametry a difuzi plynů v simulované sněhové lavině.

V dnešní době stále více narůstá popularita outdoorových sportů. Jednou z takových oblastí jsou i aktivity spojené s horským prostředím, a to jak v létě, tak i v zimě. Pohyb v horském prostředí s sebou přináší i určitou míru rizika, kterou je možné minimalizovat na základě dostatečných znalostí, dovedností a zkušeností. V zimním období jsou stále více populárnější aktivity okolo freeridového lyžování. Jedná se i o aktivity s ním spojené, jako je doprava pomocí lanovek, vrtulníků nebo vyvezení rolbou. Je to i záležitost dalších činností, jakými jsou skialpinismus, skitouring nebo horolezectví. Při všech těchto aktivitách se využívá sněhové pokrývky a tím pádem je zde riziko lavinového nebezpečí.

V současnosti se tomuto problému věnuje hodně pozornosti, a to především formou odborných lavinových kurzů a školení a samozřejmě také vývojem ochranných pomůcek. Tyto pomůcky procházejí v poslední době velkou evolucí a díky digitalizaci a elektronice je jejich užívání neustále snadnější a méně náročné na obsluhu. Ochranné pomůcky jsou však převážně pouze pomůckami pasivními a jejich používání nebrání samotnému zasypání lavinou. Jedinou aktivní ochranou je v současnosti airbagový batoh a ani jeho použití nezajišťuje uživateli stoprocentní bezpečnost před zasypáním nebo dalšími následky laviny.

Téma disertační práce jsem si vybral na základě mnohaletých zkušeností v této oblasti. Jako odborný garant přesunů na sněhu a ledu v Armádě České republiky (AČR) vedu v průběhu roku mnoho lavinových, instruktorských a dalších odborných kurzů nejen pro příslušníky AČR, ale také pro Policii České republiky (PČR), Hasičský záchranný sbor (HZS) a v neposlední řadě i civilní kurzy. Dále jsem strážcem Krkonošského národního parku (KRNAP), spolupracuji s příslušníky Horské služby (HS) a aktivně se účastním konferencí Společnosti horské medicíny a konferencí urgentní medicíny.

Předložená práce navazuje na výzkum kolegy PhDr. Michala Maška, Ph.D., z r. 2012, který se zabýval problematikou difusibility plynů při dýchání do sněhové kapsy s následnými projevy asfyxie. Jednalo se o unikátní pilotní projekt zaměřený mimo jiné na řešení nových metodických postupů i na možnosti minimalizace rizik. Zmíněného výzkumu jsem se osobně účastnil. Problematika tohoto charakteru je natolik zajímavá, že jsem se rozhodl v dalším výzkumu pokračovat.

Touto prací jsem chtěl zkoumat fyziologické a fyzikální procesy, které probíhají v případě zasypaní lavinou. Byl bych rád, kdyby zjištěné poznatky vedly k vývoji nových ochranných pomůcek, které by zvyšovaly šanci na přežití obětí zasypaných sněhovou lavinou.

## 2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

---

Ve světě je v posledních letech věnována lavinám velká pozornost. Je to především z důvodu prevence, ale samozřejmě zde hraje nezastupitelnou roli i záchrana zasypaných. Nejčastějšími oběťmi lavin jsou skialpinisté, lyžaři a snowboardisté lyžující mimo sjezdovky, horolezci a v USA a Kanadě jsou to i jezdci na sněžných skútrech (<http://avalanche.state.co.us>). Tyto aktivity znamenají, že většina lavinových neštěstí se odehrává v oblastech, které jsou vzdáleny od lyžařských středisek a nejsou tedy dostatečně kontrolovány [1, 2]. V Evropě a Severní Americe byl v letech 1994 – 2003 medián každoroční úmrtnosti lavinových neštěstí 141 obětí [3].

V rámci ICAR-CISA (International Commission for Alpine Rescue) jsou v Evropě sledovány statistiky lavinových nehod. Údaje jsou dostupné na internetu ([www.ikar-cisa.org](http://www.ikar-cisa.org)). Většina doporučení vychází ze statistických údajů. Jedná se o souhrnné údaje ze zpracovaných kazuistik. V evropském regionu tyto statistiky zpracovává právě ICAR-CISA ([www.ikar-cisa.org](http://www.ikar-cisa.org)), který je odbornou autoritou pro problematiku vysokohorské medicíny. V Čechách tyto statistiky zpracovává bezpečnostní komise Českého horolezeckého svazu ve spolupráci s lékařskou komisí ([www.horosvaz.cz](http://www.horosvaz.cz)) a se Společností horské medicíny ([www.horska-medicina.cz](http://www.horska-medicina.cz)).

Podle Falka et al. a Bruggera et al. [4, 5] a i dalších autorů [6] je šance na přežití v lavině závislá na několika faktorech:

- závažnost traumatického poranění
- doba zasypaní
- míra zasypaní
- hloubka zasypaní
- existence vzduchové kapsy

## 2.1 PATOFYZIOLOGIE LAVINOVÝCH ÚMRTÍ

---

Podle evropských i amerických analýz příčin úmrtí v lavině je dominantní příčinou udušení, a to až v 90 % případů [3, 4, 7, 8]. Hypotermie a traumatická poranění jsou méně statisticky významná. Analýzy některých autorů [2] však naznačují vyšší počet traumatických poranění, a to až téměř ve 25 % případů (Tabulka č. 1). Tyto rozdíly vytvářejí především geografické odlišnosti. V zalesněných oblastech nebo v místech se skalnatým podložím lze očekávat vyšší pravděpodobnost traumatického poranění než na otevřených a nezalesněných svazích s minimálním skalnatým povrchem. V současné době také díky novým technologiím, jako je např. airbag systém – aktivní lavinová ochrana, dochází zároveň ke zvýšení procentuálního zastoupení traumatických poranění. Tato aktivní lavinová ochrana zabraňuje zasypání oběti sněhem a snižuje tak možnost udušení ve sněhu.

Mezi typicky se vyskytující traumatická poranění patří fraktury obličeje, lebky a žeber související s pneumotoraxem nebo plicním pohmožděním, dále pak vnitřní krvácení a otevřené fraktury dlouhých kostí.

*Tabulka 1 Příčiny úmrtí v lavině*

	<b>Zadušení [%]</b>	<b>Trauma [%]</b>	<b>Hypotermie [%]</b>	<b>Celkem [%]</b>	<b>Počet nehod</b>
Hohliedder et al. [3]	92	6	2	100	39
McIntosh et al. [9]	95	5	-	100	56
Boyd et al. [2]	75	24	1	100	204

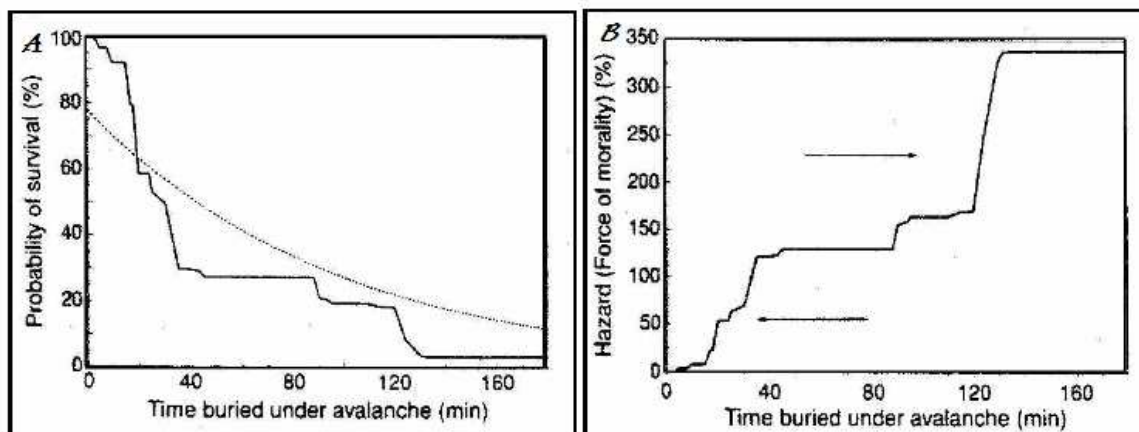
---

### 2.1.1 DOBA ZASYPÁNÍ

---

Pravděpodobnost přežití úplně zasypaných obětí ve volném terénu na základě dat alpských zemí z let 1981–1998 ( $n = 735$ ) ukazují rychlý pokles pravděpodobnosti přežití, a to z 92% v 15. minutě na 30% pravděpodobnost přežití úplně zasypané oběti ve 35. minutě [1, 4]. Haegeli et al. [10] popisují, že v Kanadě a v oblastech přímořského charakteru se jedná pouze o prvních 10 minut vlivem jiných klimatických a sněhových podmínek. V této fázi dochází k akutnímu udušení oběti sněhové laviny. Akutní udušení je nejčastější příčinou lavinových úmrtí [2, 3, 9]. K udušení dochází v důsledku blokování dýchacích cest, nebo v důsledku silné hypoxie a hyperkapnie vyplývající z opakovaného nadechování

vydechnutého plynu, což má za následek neustále se snižující koncentraci kyslíku ( $CO_2$ ), zatímco koncentrace oxidu uhličitého ( $CO_2$ ) naopak narůstá. V případě, kdy má postižený možnost vydechnout vzduch do jiného prostoru, než odkud je vzduch nadechován (např. pomocí zařízení AvaLung), je schopen přežít bez větších problémů dobu delší jak 60 minut [11, 12, 13] a nebo dokonce 90 minut [14]. Další pokles mezi 35. a 90. minutou není už tak strmý. Oběť má průchodné dýchací cesty, vytvořenou vzduchovou kapsu, u které však dochází k jejímu uzavírání. Vlivem tepelného rozdílu mezi okolním prostředím a vydechovaným vlhkým vzduchem oběti dochází ke srážení této vlhkosti na stěnách vzduchové kapsy a jejímu postupnému namrzání. Právě srážení vlhkosti je příčinou vytvoření ledové krusty, která neumožňuje jakýkoli proces difuze plynů ( $O_2$  a  $CO_2$ ). Tuto fázi nazýváme jako fázi uzavírání vzduchové kapsy. Důsledkem uzavření vzduchové kapsy je hypoxie a hyperkapnie. Následný pokles pravděpodobnosti přežití (přibližně na 7 % ve 130. minutě) je důsledkem další hyperkapnie ve vytvořené vzduchové kapse současně s hypotermií [4] - viz obr. č 1.



**Obrázek 1** Křivka pravděpodobnosti přežití (A) a zvyšování rizika úmrtí (B) úplně zasypaných lavinových obětí ve vztahu k době zasypaní v alpských zemích

Na obr. „A“ plná čára ukazuje na kasuistické vyjádření lavinových nehod z let 1981 – 1998, ( $n = 735$ ) přerušovaná čára vyjadřuje vypočítanou matematickou funkci pravděpodobnosti přežití. Obr. „B“ ukazuje na celkové zvyšování rizika úmrtí ve vztahu k době zasypaní [ $\log$  (pravděpodobnost přežití)]. Dvě skokové fáze grafu zvýšení rizika indikované šipkami reprezentují prognózu pro skupinu bez (spodní šipka) a se (horní šipka) vzduchovou kapsou [1].

---

### 2.1.2 MÍRA ZASYPÁNÍ

---

Míra zasypání je jedním z důležitých faktorů, které ovlivňují pravděpodobnost přežití pod sněhovou lavinou. Definice úplného zasypání uvádí, že úplné zasypání je takové, kdy sníh zakrývá tělo i hlavu postiženého. Ve všech ostatních případech se jedná o zasypání částečné [1]. Analýza lavinových nehod v alpských zemích v letech 1981 až 1998 (přibližně 2000 lavinových neštěstí) ukazuje, že celková úmrtnost při zasažení dosahuje 23 %. Tato hodnota dále pak narůstá až k 52 % pro oběti, u kterých došlo k úplnému zasypání [4]. Na druhou stranu v případech částečného zasypání dosahuje pouze 4 % [1]. U těchto případů částečného zasypání můžeme však předpokládat, že většina částečných zasypání nebyla reportována. Odhaduje se, že počet neprotokolovaných případů může být až dvakrát tak velký jako počet případů zaznamenaných. Tento efekt tedy redukuje pravděpodobnost úmrtí při částečném zasypání pod již zmíněná 4 % [1]. V současné době právě díky používání airbagových batohů se tato skupina neustále navyšuje, což má za následek nižší úmrtnost obětí zasažených lavinou [15–18]. Většina lavinových úmrtí je však spojena s úplným zasypáním. Právě z tohoto důvodu je dnes při lyžování a pohybu ve volném terénu doporučováno používání aktivní ochrany před zasypáním v podobě lavinových airbagů. Tyto ochranné prvky, které jsou zabudovány v neseném batohu a jsou aktivovány vlastním uživatelem, zvyšují šanci na přežití tím, že ochraňují uživatele od úplného zasypání. Pravděpodobnost toho, že postižený při použití airbagového batohu nebude zasypán, nebo bude zasypán pouze částečně, je 50 % a vyšší [15–18]. Výrobce lavinových batohů ABS dokonce uvádí, že z 250 lavinových neštěstí při použití lavinového batohu s airbagy od firmy ABS přežilo 97 % obětí těchto lavin (<http://abs-airbag.de>). Dalšími výrobci airbagových systémů jsou firmy Mammut, Scott, Pieps a BCA, jejichž systémy využívají i firmy jako např. Deuter, Ortovox, Black Diamond a další [19].

---

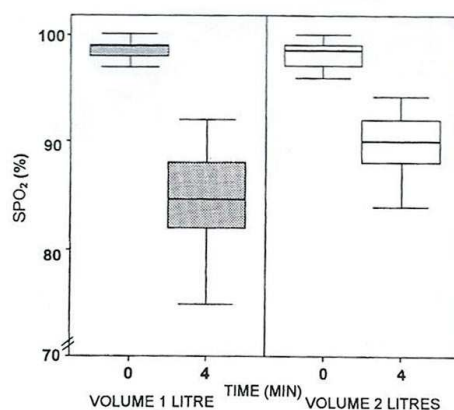
### 2.1.3 HLOUBKA ZASYPÁNÍ

---

S mírou zasypání úzce souvisí i hloubka zasypání [20]. V průměru je hlava zasypána 70 cm pod povrchem. Závislost mezi hloubkou zasypání a pravděpodobností přežití při zvážení doby zasypání však nebylo možné statisticky dokázat. Jak lze předpokládat, tak závislost pravděpodobnosti přežití na čase souvisí i s delší dobou vyproštění, avšak není jasné, zda-li tlak sněhu nad zasypaným člověkem ovlivňuje šanci na přežití.

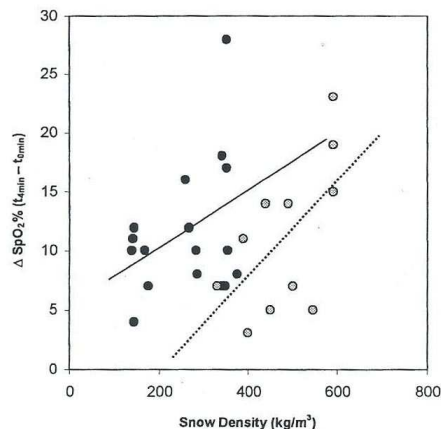
## 2.1.4 EXISTENCE VZDUCHOVÉ KAPSY

Značná část prací a autorů řeší jednotlivé postupy a metodiky při záchraně zasypaných. Zabývají se způsoby vyhrabávání, aby nedošlo k borcení vzduchové kapsy před obličejem, organizací záchrany a časovými plány jednotlivých činností. Některé práce se ale zaměřují cíleně i na měření, která se zabývají asfyxií či hyperkapnií pod sněhem [12–14, 21–23]. Důležitou prací bylo měření hyperkapnie při dýchání do vzduchové kapsy o objemu 1 a 2 litry [22]. Toto měření probíhalo v nadmořské výšce 1 640 m n. m. ( $n = 12$ , průměrný věk byl 25 let, z tohoto souboru byly 4 ženy). Realizace samotného měření probíhala ve čtyřech dnech. První měření probíhalo za teploty vzduchu 4,8 °C, tlaku vzduchu 84,3 kPa, teploty sněhu 0 °C a jeho hustoty  $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$ . Druhé měření probíhalo za teploty vzduchu -1 °C, tlaku vzduchu 82,5 kPa, teploty sněhu -1,4 °C a hustoty sněhu  $\rho = 275 \text{ kg/m}^3$ . Práce byla zaměřena především na měření rozdílu  $SpO_2$  (%) a rozdílu nárůstu  $EtCO_2$  (kPa). Dále je zde měřen čas do přerušení experimentu (min) v obou objemech vzduchové kapsy. Také je vyčíslen procentuální rozdíl  $SpO_2$  při dýchání do vzduchové kapsy o objemu 2 litry a o objemu 1 litr. Následně byl pomocí krabicového grafu vyhodnocen vztah velikosti vzduchové kapsy na snížení periferního  $O_2$  pomocí saturace  $SpO_2$ . Ve studii se rovněž uvádí korelace měrné hustoty sněhu ( $\text{kg/m}^3$ ) a snížení periferního  $O_2$  pomocí periferní saturace krve kyslíkem ( $SpO_2$ ) v prvních čtyřech minutách ( $r = 0,50$  a  $p = 0,021$ ).



Obrázek 2 Krabicový graf vztahu  $SpO_2$  a velikosti vzduchové kapsy ( $n = 28$ )

Boxy vyznačují interkvartilové rozpětí. Linka uvnitř značí medián a chybové úsečky nahoře a dole ukazují na nejvyšší a nejnižší hodnoty. Medián  $SpO_2$  (%) se snižuje v prvních 4 minutách z 99 % (od 96 do 100 %) na 84 % (od 71 do 92 %) při dýchání do vzduchové kapsy o objemu 1 litru. U vzduchové kapsy o objemu 2 litry dochází ke snížení  $SpO_2$  z 98 % (od 93 do 100 %) na 90 % (od 82 do 94 %). Mann-Whitney U-test,  $p = 0,003$  [22].



Obrázek 3 Korelace mezi snižováním  $SpO_2$  a hustotou sněhu ( $kg/m^3$ )

Šedé body jsou výsledkem prvního měření v dubnu 2000 ( $n = 12$ ), černé body jsou výsledkem druhého měření v únoru 2001 ( $n = 16$ ) [22].

Dalším zdrojem zajímavých informací byl výzkum na selatech v rakouském Ventu [23]. Tato studie se zabývala porovnáváním dýchání do sněhové kapsy o objemech 1 litr, 2 litry a do otevřeného, neomezeného prostoru při úplném zasypání. Měřil se především vliv třetího faktoru, z tzv. “Triple H Syndroms” (hypoxie, hyperkapnie, hypotermie), tedy i vliv podchlazení. Protože Helsinská deklarace nepovoluje pokusy s podchlazením na lidech, byla k tomuto účelu použita selata. I přestože byl výzkum schválen ministerstvem pro vědu a výzkum a byl prováděn Lékařskou univerzitou v Innsbrucku společně s Ústavem urgentní medicíny Evropské univerzity v Bolzanu, vzedmula se proti tomuto výzkumu obrovská nevole především ze strany ochránců zvířat a výzkum byl vzhledem k těmto okolnostem předčasně ukončen. Podařilo se změřit osm zvířat při úplném zasypání. Zvířata byla při pokusu vždy uspána a byly jim aplikovány anestetické prostředky. Ukázalo se, že teplota jádra se v prvních deseti minutách snižovala velmi rychle, a to průměrně o  $15\text{ }^\circ\text{C/h}$  u všech skupin, tedy jak u skupiny dýchající do vzduchové kapsy o neomezeném objemu, tak i u skupin dýchajících do sněhových kapes o objemu 1 litr, popřípadě 2 litry. Díky takto rychlému snižování teploty dochází i ke snížení metabolismu. Další studie by se podle autorů měly zaměřit především na vzájemné působení velikosti vzduchové kapsy, měrné hustoty sněhu, rychlosti hypotermie, hypoxie a hyperkapnie během zasypání lavinou. Vztah mezi hyperkapnií a hypotermií potvrzuje i studie z Kanady při používání ochranných prostředků při zasypání v lavině [11].

Problémy narůstající hyperkapnie vzhledem k uzavírání sněhové kapsy se zabývají další práce [12–14]. Tyto práce jsou zaměřeny na zvýšení šance na přežití při použití speciálních prostředků pro dýchání. Společným znakem těchto prostředků je využívání



difuzivity sněhu a získávání  $O_2$  pro nádech. Vydechovaný vzduch je odváděn trubicemi za tělo postiženého, čímž nedochází k hyperkapnii a doba přežití se tím výrazně prodlužuje. Velkou nevýhodou těchto prostředků je, že si je postižený při stržení lavinou musí stihnout vložit do úst a tam je i udržet. Z těchto důvodů nejsou tyto ochranné prostředky v Evropě příliš využívány a využívají je převážně lyžaři a snowboardisté v oblastech Severní Ameriky, kde roční srážkový úhrn činí 12 – 18 m sněhu za rok. V těchto podmínkách poté hrozí další nebezpečí, které je nazýváno tzv. „tree well“ (stromová studna). Postižený se při pádu poblíž stromu propadá podél něj do sněhové závěje (nejčastěji hlavou napřed) a není schopen se zachránit bez cizí pomoci. V takovém případě má ale možnost použít výše zmiňované ochranné prostředky pro prodloužení doby přežití a záchrany.

Měřením difuze různých druhů plynů ve sněhu se zabývala skupina vědců v Coloradu, avšak jednalo se pouze o prostou difuzi jednotlivých plynů ve sněhu, který volně nasněžil na zařízení sestavené k měření [24]. Toto měření probíhalo průběžně během celé zimní sezóny a jeho výsledky se zaměřily především na ovlivňování životního prostředí.

Cílem naší studie bylo hledat především závislost doby přežití na velikosti malých vzduchových kapes. Z fyzikálního pohledu se totiž rozdíl objemů 1 L a 0 L u člověka při vitální kapacitě plic 5 L nejeví jako příliš důležitý a zásadní.

V současné době se při záchraně obětí lavinových nehod definuje jako vzduchová kapsa jakýkoli prostor kolem dýchacích cest [1, 25]. Není publikována ani známa žádná studie, která by se zabývala zjišťováním efektu dýchání bez vzduchové kapsy.

### 3 VÝZKUMNÉ OTÁZKY, CÍLE, ÚKOLY, HYPOTÉZY

---

#### **CÍL:**

Cílem této práce bylo sledování různých ventilačně-respiračních parametrů při dýchání v simulované sněhové lavině se vzduchovou kapsou a bez ní.

#### **VÝZKUMNÉ OTÁZKY:**

Jaký je vztah objemu vzduchových kapes 0 L a 1 L k rychlosti nárůstu koncentrace  $P_{Et}CO_2$  ve vydechovaném vzduchu?

Jaký je vztah objemu vzduchových kapes 0 L a 1 L k rychlosti poklesu  $SpO_2$  v krvi?

Jaký je vztah difuze  $CO_2$  ve sněhu v závislosti na velikosti sněhové kapsy?

Je možné dýchat i bez vzduchové kapsy?

### ÚKOLY:

- Studium odborné literatury
- Rešerše dosavadních výzkumů v oblasti lavin, patofyziologie úmrtí v lavinách, hypotermie, fyziologie a patofyziologie dýchání – hypoxie, hyperkapnie, acidóza
- Plánování měření na základě rešerše, dostupných podmínek a technologických možností
- Podání žádosti ke schválení výzkumu Etickou komisí FTVS UK
- Výběr probandů
- Pilotní měření
- Vlastní měření
- Zpracování a vyhodnocení dat
- Sepsání výsledků a závěrů
- Publikování studie v odborném časopise
- Účast na konferencích zaměřených na podobnou problematiku
- Obhajoba disertační práce

### HYPOTÉZY:

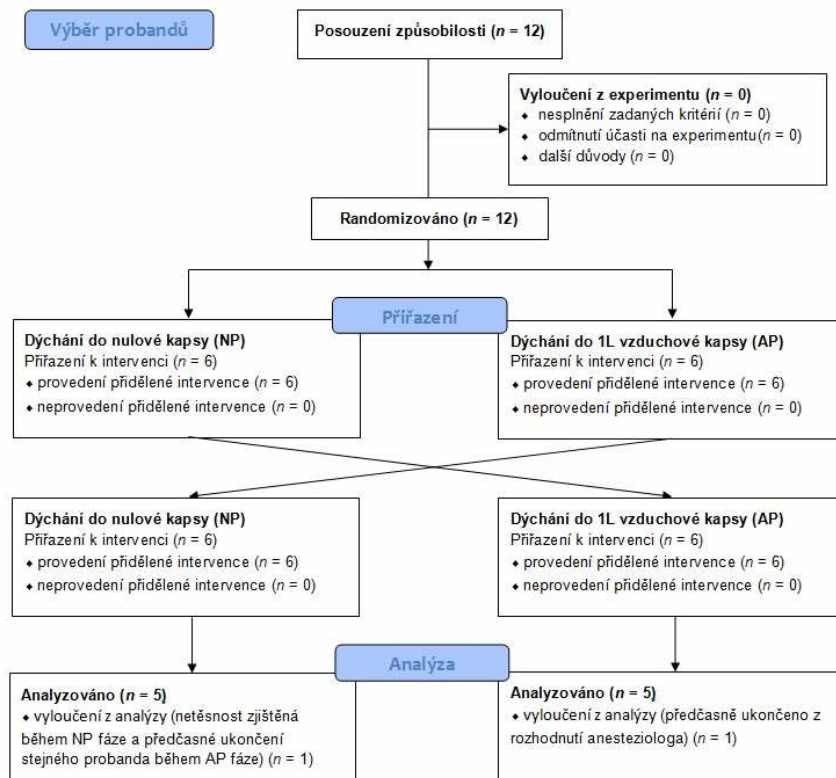
**H1 hypotéza** – Dýchání přímo do sněhu s postupným vytvořením malé vzduchové kapsy prodýcháním je po krátkou dobu možné.

**H2 hypotéza** – Velikost i malé vzduchové kapsy významně ovlivní dechovou práci a dechové úsilí a tím i závažnost vzniklé hypoxie a hyperkapnie.

Protokol studie byl schválen Etickou komisí Fakulty tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy v Praze č. 001/2013, vydané dne 3. ledna 2013 (příloha č. 2). Součástí schváleného výzkumu Etické komise byl i sylabus výzkumného projektu (příloha č. 1) a dále pak informovaný souhlas (příloha č. 3), se kterým byli dobrovolníci seznámeni před samotným měřením a který byl jimi podepsán. Z důvodu publikování studie v IF časopisu bylo nutné tuto studii ještě zaregistrovat v rejstříku ClinicalTrials.gov. Tato studie je zde uložena pod registračním číslem NCT02521272 (příloha č. 4).

Intervenční randomizovaná studie byla provedena jako dvojité zaslepená se zkříženým designem. Schéma experimentu je uvedeno na obr. č. 6 ve formátu standardu CONSORT 2010. Nábor probandů byl proveden v Praze na katedře vojenské tělovýchovy FTVS UK na základě dobrovolnosti a dle výsledků přezkoušení z tělesné výkonnosti, které se provádí u AČR jednou ročně.

Měření proběhlo ve Špindlerově Mlýně v Krkonoších, v nadmořské výšce 762 metrů nad mořem, v termínu 14. – 19. ledna 2013. K zajištění celého experimentu bylo využito ubytovacího zařízení AČR, které je provozováno Vojenským útvarům 8407 Praha – Kbely. Konkrétně se jednalo o horskou chatu Zlatá Vyhlídka. V této chatě byl vyčleněn prostor pro techniku, dále pak přípravná a vyšetřovací místnost a také zde bylo zajištěno ubytování probandů a členů realizačního týmu.



Obrázek 4 Diagram výzkumu podle standardu CONSORT 2010

## 4.1 ZAJIŠTĚNÍ BEZPEČNOSTI

Pro ochranu zdraví a zajištění bezpečnosti probandů, kteří se zúčastnili experimentu, bylo nezbytné především zdravotnické zabezpečení v celém průběhu samotného experimentu.

### 4.1.1 ZDRAVOTNÍ ZABEZPEČENÍ

Bezpečnost dobrovolníků v průběhu experimentu byla garantována moderními systémy sledování a průběžného vyhodnocování fyziologických parametrů. Tyto parametry byly neustále sledovány a vyhodnocovány anesteziologem z Ústřední vojenské nemocnice (ÚVN) v Praze a vyškoleným armádním zdravotníkem s šestiletou praxí ve zdravotnické záchranné službě. V průběhu celého experimentu bylo na místě k dispozici sanitní vozidlo LRD 130 Z. Na základě měření a vyhodnocení fyziologických parametrů měli možnost experiment kdykoli ukončit. Za účelem testování vědomí probandů v průběhu experimentu

anesteziolog neustále požadoval po probandovi výpočet jednoduchých matematických výpočtů, jejichž výsledky probandi sdělovali pomocí prstů na ruce.

---

#### 4.1.2 DŮVODY UKONČENÍ EXPERIMENTU

---

Experiment dýchání do simulované sněhové laviny mohl být ukončen kdykoli v důsledku jednoho nebo více následujících důvodů:

- žádost dobrovolníka;
- rozhodnutí ze strany anesteziologa nebo zdravotníka;
- parciální tlak ve vydechovaném plynu  $P_{Et}CO_2$  vyšší nebo roven 60 mm Hg [63];
- přítomnost  $N_2O$  v dýchacím okruhu;
- dýchání do sněhu delší jak 30 minut.

---

#### 4.2 VÝZKUMNÝ SOUBOR

---

Pro výzkum bylo využito dvanáct neplacených dobrovolníků mužského pohlaví, z nichž deset měření kompletně dokončilo, a byli tak zahrnuti do hodnocení. Parametry výzkumného souboru jsou uvedeny v Tab. 4. Počet dobrovolníků zařazených do studie byl vybrán jako maximální počet probandů zahrnutých do již publikovaných studií podobného výzkumu. Jednalo se o příslušníky Armády České republiky (AČR), kteří byli současně i studenty Vojenského oboru při Fakultě tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy (VO FTVS UK). Všichni probandi byli zdraví podle klasifikace American Society of Anesthesiologists (ASA) a byli hodnoceni stupněm ASA I [64]. Všichni zúčastnění dobrovolníci, nekuřáci, byli vysoce motivováni k účasti na experimentu. Před každým měřením (s výjimkou dříve zaznamenaných anamnestických dat a spirometrického vyšetření) absolvovali vstupní vyšetření, které prováděl přítomný anesteziolog a jednalo se o následující data:

- posouzení aktuálního zdravotního stavu
- záznam klidového EKG
- měření *TK*

Tato data se zaznamenávala do karet účastníků (příloha č. 5).

Vylučovacím kritériem byly jakékoli kardiovaskulární nebo respirační obtíže a Tiffeneau Index menší než 0,70.

Po úspěšné vstupní prohlídce byly elektrody pro EKG a manžeta pro měření *TK* ponechány na těle probanda a při zahájení experimentu byly připojeny k přístroji DATEX - Ohmeda S/5.

Experimentu se zúčastnili v období 14 – 19. ledna 2013.

*Tabulka 2 Charakteristika výzkumného souboru*

<b>Parametry</b>	<b>Všichni probandi (n=12)</b>	<b>Probandi absolvující kompletní měření (n=10)</b>
<i>Věk (roky)</i>	24,8 ± 3,4 (20 – 30)	24,6 ± 3,5 (20 – 30)
<i>Hmotnost (kg)</i>	77,7 ± 7,1 (64 – 90)	76,1 ± 6,4 (64 – 85)
<i>Výška (cm)</i>	180,0 ± 5,5 (173 – 192)	179,3 ± 5,8 (173 – 192)
<i>BMI (kg m<sup>-2</sup>)</i>	24,0 ± 1,7 (20 – 27)	23,7 ± 1,6 (20 – 25)
<i>FEV1 (L)</i>	4,5 ± 0,4 (4,0 – 5,1)	4,4 ± 0,4 (4,0 – 4,9)
<i>FVC (L)</i>	5,2 ± 0,5 (4,5 – 6,1)	5,2 ± 0,5 (4,5 – 6,1)

Výsledky jsou uvedeny jako průměr, hodnoty ± vyjadřují směrodatnou odchylku a hodnoty v závorce vyjadřují rozsah (minimální – maximální). Zkratky: *BMI* – Body Mass Index, *FEV1* – objem maximálního usilovného výdechu po dobu 1 sekundy, *FVC* – usilovná vitální kapacita plic

### 4.3 MĚŘÍCÍ TECHNIKA

K měření experimentu dýchání v simulované sněhové lavině byla použita měřicí technika, která je využívána v nemocnicích na odděleních JIP. Z tohoto důvodu bylo nutné tuto měřicí techniku zabezpečit tak, aby byla plně funkční při klimatických podmínkách, ve kterých se experiment prováděl. Hlavní poděkování za vyřešení všech problémů s tímto spojených patří především prof. Roubíkovi z FBMI ČVUT v Praze a Ing. Siegerovi z FEL ČVUT v Praze.

#### 4.3.1 DATEX – OHMEDA S/5

Jedná se o patientský anesteziologický přístroj, který je využíván na jednotkách intenzivní péče (JIP). Tento přístroj je vybaven monitorem životních funkcí včetně analýzy plynů. Přístroj byl využíván ke kontinuálnímu měření těchto parametrů:

- EKG - elektrokardiogram
- $HR$  - srdeční frekvence
- $SpO_2$  - periferní saturace krve kyslíkem
- $F_I O_2$  - inspirační frakce kyslíku
- $EtO_2$  - frakce kyslíku na konci výdechu
- $F_I CO_2$  - inspirační frakce oxidu uhličitého
- $EtCO_2$  - frakce oxidu uhličitého na konci výdechu
- $V_T$  - dechový objem
- $BF$  - frekvence dýchání
- $Paw$  - průběh tlaku v dýchacích cestách
- $Qaw$  - průběh průtoku vzduchu v dýchacích cestách
- $C_{N_2O}$  - koncentrace oxidu dusného v dýchacím okruhu
- $C_{CO_2}$  - koncentrace oxidu uhličitého
- $TK$  - měření krevního tlaku v minutových intervalech

Sledované respirační parametry, jako jsou  $Qaw$ ,  $BF$ ,  $Paw$  a  $V_T$ , byly měřeny za použití respiračního senzoru D-Lite (DATEX-Ohmeda, Madison, WI, USA) zapojeným mezi náustkem a pacientskou Y-spojku. Spirometrický snímač D-Lite měl také port pro vzorkovací plyn pro DATEX-Ohmeda S/5. Pomocí tohoto portu a anesteziologicko-respiračního modulu E-CAiOVX (DATEX-Ohmeda, Madison, WI, USA) byly sledovány koncentrace jednotlivých plynů  $F_I O_2$ ,  $EtO_2$ ,  $F_I CO_2$ ,  $EtCO_2$  a  $C_{N_2O}$ .

Datex byl umístěn ve stanu, jenž byl opatřen elektrickým vyhříváním. Teplota ve stanu byla udržována mezi 5 – 10 °C. Taková teplota byla nutná pro zajištění správné funkce monitoru životních funkcí a přenosného PC. Tyto přístroje byly dále udržovány na předepsané teplotě elektrickými topnými fóliemi s příkonem 25 W a dodatečnou tepelnou izolací z polyuretanové pěny. Pro snímání koncentrace a tlaků jednotlivých plynů bylo nutné hadičky, vedoucí od náustku k monitoru, chránit proti kondenzaci s následným zamrznutím. Tento problém byl vyřešen pomocí topného drátu a polyuretanovou izolací. V průhledném boxu před stanem byl umístěn externí plazmový monitor, který byl napojen na monitor životních funkcí Datex, aby anesteziolog, popř. zdravotník, mohli mít okamžitou kontrolu životních funkcí dobrovolníka.

Přesnost analýzy plynů přístroje Datex-Ohmeda S/5 byla kontrolována přímo na místě každý den před zahájením prvního experimentu, a to pomocí kalibračního plynu (5% CO<sub>2</sub>, 15% O<sub>2</sub>, dorovnaným N<sub>2</sub>) z vysokotlaké lahve.

---

#### 4.3.2 EDAN M3

---

Pro zajištění bezpečnosti probandů byl dále používán monitor životních funkcí Edan M3 (Edan Instruments, Nanshan Shenzhen, China), který kontinuálně měřil  $SpO_2$  a  $HR$  pro případ, že přístroj Datex-Ohmeda S/5 by údaje o  $SpO_2$  nebo  $HR$  nevyhodnocoval.

Tento monitor byl umístěn před stanem v malém plastovém boxu, který byl vybaven elektrickou topnou fólií.

Oba sensory  $SpO_2$  (Datex-Ohmeda S/5 a Edan M3) byly pomocí skřípce na prst umístěny na prostředníček a prsteníček pravé ruky. Tyto sensory byly společně s celou rukou tepelně izolovány od vnějšího prostředí pomocí rukavic. Manžeta pro měření  $TK$  byla umístěna na levou paži probanda, aby nemohla ovlivňovat výsledky měření  $SpO_2$ .

---

#### 4.3.3 SPIROMETR MSP1 MESIT

---

Spirometrický měřicí přístroj MSP1 MESIT, Uherské Hradiště, CZ, byl využíván k měření spirometrických údajů:  $FEV1$  – maximální usilovný výdech za 1 sekundu a  $FVC$  – vitální kapacita plic. Tyto spirometrické údaje byly měřeny vždy před každým měřením probanda v rámci vstupní prohlídky.

---

#### 4.3.4 MĚŘENÍ HUSTOTY SNĚHU

---

Hustota sněhu byla měřena pomocí ¼L dutého válce, který se zařídil do sněhové vrstvy s následným odebráním a zvážením tohoto vzorku sněhu. Sníh byl vždy odebírán přibližně 20 cm od vzduchové kapsy, takže jeho hustota nemohla být ovlivněna předchozím dýcháním. Hustota ( $\rho$ ) sněhu byla  $380 \text{ kg/m}^3 \pm 14 \text{ kg/m}^3$ . Tato hustota odpovídá střední prachové lavině [65]. Sníh byl tvořen z vloček o střední velikosti zrna 2 mm (od 1,5 do 2,5 mm).



---

### 4.3.5 MĚŘENÍ TEPLOTY SNĚHU A TLAKU VZDUCHU

---

Teplota sněhu byla měřena na výšku celé stěny po 10 cm a teplota vzduchu se měřila ve výšce 30 cm nad sněhovou pokrývkou. Průměrná teplota okolí při prováděném experimentu byla  $-4,4\text{ °C} \pm 1,3\text{ °C}$  (od  $-7,6$  do  $-1,6\text{ °C}$ ) a atmosférický tlak vzduchu byl  $91,6\text{ kPa} \pm 0,4\text{ kPa}$  (od 90,2 do 92,2 kPa). Průměrná teplota sněhu byla  $-5,1\text{ °C} \pm 0,7\text{ °C}$  (od  $-6,1$  do  $-4,2\text{ °C}$ ).

---

### 4.3.6 ZÁZNAMOVÁ TECHNIKA

---

Průběh měření byl zaznamenáván na tři nezávislé kamery. První kamera kontinuálně zaznamenávala obrazovku přístroje Datex-Ohmeda S/5, druhá zaznamenávala dýchání probanda a třetí celkovou situaci a dění při experimentu. Video a audio záznam byly vytvářeny především jako záloha dat zaznamenaných do PC a písemných protokolů. To umožnilo konzultovat situaci, která se odehrávala při experimentu s pozdějším zpracováním a vyhodnocováním dat. Data byla v průběhu experimentu nahrávána na HD notebooku z monitoru Datex-Ohmeda pomocí firemního softwaru Datex-Ohmeda S/5<sup>TM</sup> Collect po 1 sekundě a obrazové záznamy z kamer byly ukládány do PC výzkumníků provádějících experiment.

Současně byl pro fotodokumentaci používán digitální fotoaparát a pro zaznamenávání odpovědí probandů bezprostředně po měření byl využíván diktafon.

---

### 4.3.7 KOMUNIKAČNÍ TECHNIKA

---

Ke zjednodušení a usnadnění celého průběhu experimentu se používaly ke komunikaci vysílačky Motorola a mobilní telefony účastníků experimentu. Celý výzkumný tým komunikoval mezi sebou především pomocí vysílaček Motorola GP 388 UHF, přičemž bylo nezbytné striktně dodržovat design dvojité zaslepené studie. To bylo zajištěno předem dohodnutými kódovanými znaky pro přípravu jednotlivých měření.

Každý dobrovolník byl podroben dvěma fázím experimentu (viz obr. 13). Fáze „AP“ – dýchání do sněhu se vzduchovou kapsou o objemu 1 litr (1 L), viz obr. č. 14 a fáze „NP“ – dýchání do sněhu se vzduchovou kapsou o objemu 0 litrů (0 L), viz obr. č. 15. Probandi byli zařazeni do fází AP a NP v náhodném pořadí, které bylo randomizované pomocí losovacího bubnu, z něhož losoval pořadí a výběr fází nezávislý asistent. Jelikož se jednalo o dvojité zaslepenou studii, tak ani dobrovolníci a ani výzkumníci nevěděli, o jakou fázi se v průběhu experimentu jedná. Pouze hlavní řešitel a dva asistenti, kteří připravovali jednotlivé fáze ve sněhu, znali tyto informace.

Všichni probandi pobývali v nadmořské výšce, ve které byl experiment prováděn alespoň 48 hodin před vlastním měřením, a zůstávali ve stejném místě i po celý průběh samotného měření. Doba odpočinku mezi jednotlivými fázemi byla minimálně 20 hodin u každého z dobrovolníků.

Před zahájením měření byly na těla probandů připevněny senzory snímající životní funkce. Jednotlivé parametry byly kontinuálně monitorovány a zaznamenávány přístrojem životních funkcí DATEX – Ohmeda S/5.

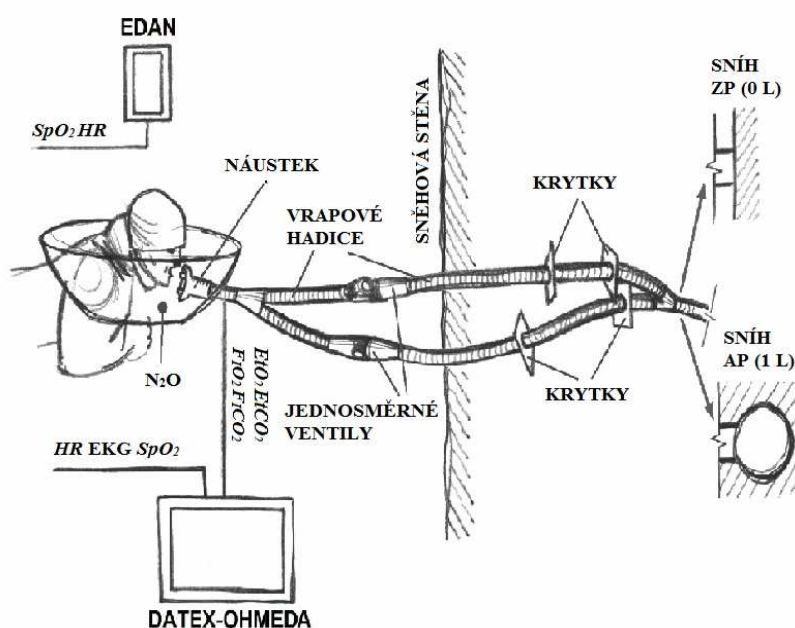
Sensory  $SpO_2$  (Datex-Ohmeda S/5 a Edan M3) byly pomocí prstového skřipce umístěny na prostředníček a prsteníček pravé ruky. Tyto senzory byly společně s celou rukou tepelně izolovány od vnějšího prostředí pomocí rukavic. Manžeta pro měření  $TK$  byla umístěna na levou paži probandů, aby nemohla ovlivňovat výsledky měření  $SpO_2$ .

Dobrovolníci v průběhu měření leželi v poloze na břiše na izolovaném lůžku proti sněhové stěně, ve které byl již připraven dýchací okruh s konfigurací AP nebo NP. Před zahájením dýchání do vzduchových kapes byl každý proband připojen pomocí náustku v ústech k přístroji Datex-Ohmeda S/5, který umožňuje měření dýchacích plynů a měření ventilačních parametrů. Dále byli probandi připojeni konektory pro snímání EKG a  $TK$ . Po dosažení stabilních ventilačních parametrů, zejména ustáleného dechového objemu a dechové frekvence (přibližně po 5 minutách), byl náustek vložený do úst probanda připojen k dýchacímu okruhu ve sněhu, který byl zakončen AP nebo NP. Tím byl experiment dýchání do simulované sněhové laviny zahájen.

Ve stejné době byl dodáván do okolí prostoru hlavy a dýchacího okruhu oxid dusný ( $N_2O$ ), viz obr. č. 13. Tento plyn byl použit pro detekci jakékoli netěsnosti dýchacího okruhu nebo v případě úmyslného či neúmyslného přísávání okolního vzduchu mimo

náustek, a to buď kolem náustku v ústech, nebo při netěsnosti nosního klipu. V případě výskytu jakékoli koncentrace  $N_2O$  v dýchacím okruhu by byl tento plyn detekován patientským přístrojem Datex-Ohmeda S/5 a měření by bylo ukončeno pro netěsnost soustavy.

Po odpojení od okruhu z některého z důvodů uvedených v kapitole 5.1.2 zůstával proband ve stejné pozici jako před připojením. Tato doba ustálení trvala do stavu stabilizace parametrů na hodnoty podobné těm, které byly zaznamenány v úvodní fázi před zahájením samotného dýchání do vzduchových kapes. Trvala opět přibližně 5 minut. Po tuto dobu měli dobrovolníci v ústech stále náustek, který umožňoval neustálé měření ventilačně-respiračních parametrů.



Obrázek 5 Náskres dýchacího okruhu a jeho instalace do sněhové stěny (ilustrace B. Kračmar)

---

#### 4.4.1 PŘÍPRAVA DÝCHACÍHO OKRUHU

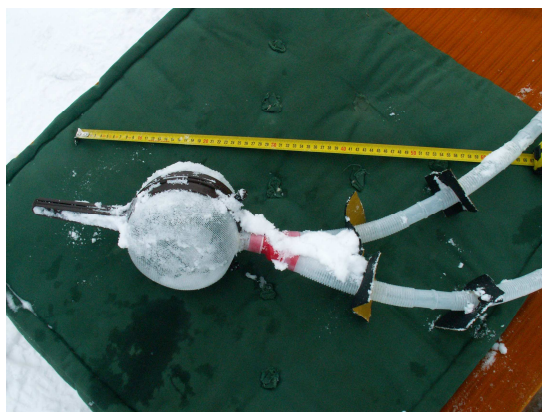
---

Probandi byli náustkem připojeni k dýchacímu okruhu, který končil ve sněhové stěně. Na jeho konci se nacházela dutina o objemu 1 L (fáze AP) nebo dýchací soustava končila přímo ve sněhu bez dutiny (fáze NP) - viz obrázky č. 15 a 16.

Soustava byla navržena tak, aby se minimalizoval její mrtvý prostor. Z tohoto důvodu soustavu tvořily dvě samostatné větve (inspirační a expirační), které byly vybaveny

jednosměrnými ventily s velmi nízkým odporem průtoku při otevřeném stavu, aby bylo co nejvíce zabráněno nárůstu dechové práce (Paedi, Ambu, Ballerup, Dánsko). Tyto ventily zajišťovaly jednosměrný tok plynu v průběhu nádechu či výdechu. Trubice, ze kterých se dýchací soustava sestávala, byly standardní lékařské, vrapové o průměru 22 mm. Na nich byly umístěny disky, které zabraňovaly případnému úniku plynů podél stěn těchto trubic.

Mrtvý objem prostoru celého dýchacího okruhu, to je částí, ve kterých docházelo k obousměrnému proudění plynů, činil 49 mL.



*Obrázek 6 Dýchací soustava s vytvořenou vzduchovou kapsou 1 L (fáze AP)*



*Obrázek 7 Dýchací soustava bez vzduchové kapsy 0 L (fáze NP)*

Dýchací okruh byl umístěn do sněhové stěny vysoké minimálně 1,5 m. Tato stěna byla vytvořena pomocí sněhové frézy (Proma PSF-6,5/620). Sněhová pokrývka byla dobře sesedlá a její hustota  $380 \text{ kg/m}^3 \pm 14 \text{ kg/m}^3$  odpovídala lavinovému sněhu [65]. Do této stěny byl vždy vytvořen zářez hluboký 1 m, 60 cm široký a dlouhý. Dýchací okruh byl poté do tohoto zářezu umístěn tak, aby distální konec okruhu, tj. distální patientská Y-spojka, byla alespoň 40 cm od předního okraje sněhové stěny.

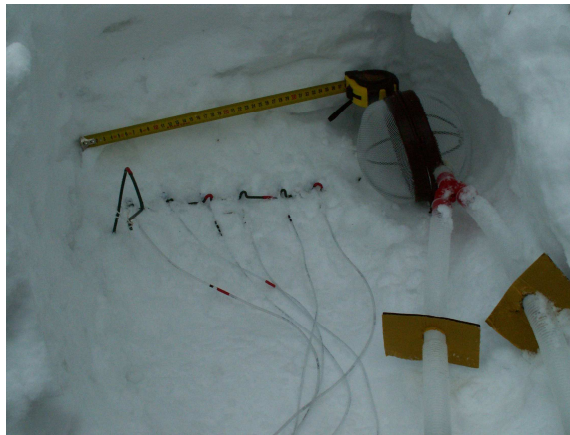
NP byla vytvořena odstraněním lepicí pásky od konce patientské Y-spojky poté, co byl pokryt přibližně 5 cm silnou vrstvou sněhu a bylo tak zabráněno vniknutí sněhu do dýchacího okruhu.

AP byla vytvořena pomocí dvou půlkulových plastových cedníků, jejichž zborcení při zasypávání bránila uvnitř umístěná tuhá, plastová kostra. Takto zhotovená kulovitá kapsa byla následně připojena na patientskou Y-spojku, kterou končila fáze NP.

Pro měření difuzivity sněhu jsme měřili koncentraci oxidu uhličitého ( $CCO_2$ ), k čemuž byly využity senzory napojené na přístroj Datex-Ohmeda S/5. Napojení bylo řešeno kapno hadičkami, které byly umístěny vždy po pěti centimetrech od hrany vzduchové kapsy, popř. patientské Y-spojky (fáze NP), a to na vzdálenost 30 cm (viz obr. č. 17 a 18). Tyto senzory byly vkládány do sněhu vždy při zhotovování každé fáze jednotlivých měření a koncentrace oxidu uhličitého byla vyhodnocována vždy po ukončení každého jednotlivého experimentu.

Za účelem kvantifikace charakteristiky odporu sněhu při dýchání byl použit standardní postup, který se používá u anesteziologických a respiračních okruhů, jejich částí, bakteriálních nebo chemických filtrů, pojistných ventilů apod. Toto vyhodnocení se provádí měřením poklesu tlaku při ustáleném konstantním průtoku vzduchu (60 L/min) [66]. Odpor sněhu jsme měřili vždy před začátkem každého experimentu a stejně tak i po jeho ukončení. Konstantní průtok vzduchu 60 L/min byl generován za použití bezolejového kompresoru (Orfi 201/24, Orlík, Praha, CZ), redukčního ventilu (IR1000, SMC, Tokyo, Japonsko) a nastavitelného pneumatického odporu (ASD230F, SMC, Tokyo, Japonsko). Systém byl před měřením udržován ve venkovním prostředí, aby měl použitý plyn pro měření okolní teplotu a zabránilo se tak tání sněhu a změnám vlastností vzduchových kapes.

Tlakový spád byl měřen pomocí přístroje měřícího diferenční tlak Testo 512 (Testo, Alton, Velká Británie).



*Obrázek 8 Příprava senzorů pro měření koncentrace CO<sub>2</sub> po ukončení experimentu fáze AP*



*Obrázek 9 Příprava senzorů pro měření koncentrace CO<sub>2</sub> po ukončení experimentu fáze NP*

#### 4.5 ANALÝZA DAT

---

Naměřená data byla zpracována a analyzována pomocí počítačového softwaru Microsoft Excel 2010 a Statistica 7 (StatSoft, Tulsa, OK, USA). Pro testování normality dat byl využit test Shapiro-Wilk a hladina statistické významnosti byla zvolena  $p \leq 0,05$ . Pro výpočet statistické významnosti u měření odporu sněhu byl využit Studentův párový  $t$ -test.

Z celkového počtu dvanácti probandů jich bylo do výpočtů zařazeno deset. Tito dobrovolníci, jejichž data byla použita ke konečné analýze dat, museli vydržet dýchat v obou fázích (AP i NP) minimálně 315 sekund. Z naměřených fyziologických parametrů ( $SpO_2$ ,  $F_I O_2$ ,  $EtO_2$ ,  $F_I CO_2$  a  $EtCO_2$ ) v průběhu fází AP a NP jsou hodnoty vyjádřeny jako průměr a jsou prezentovány ve formě grafů. Symbol  $\pm$  vyjadřuje SD (směrodatná odchylka). Statistická významnost byla testována pomocí testu ANOVA pro opakovaná měření s Bonferroniho post-hoc testy. Pro hodnocení normality dat byl využit Shapiro-Wilk test [67]. Hladina statistické významnosti byla zvolena  $p \leq 0,05$ .

K porovnání rozdílů dechového úsilí mezi dýcháním do AP a NP byla vypočítána hodnota  $iPTP$  (imposed pressure-time product). V takovém případě termín “imposed” vyjadřuje část celkové  $PTP$ , která je způsobena rychlou změnou a zvýšenými tlakovými spády způsobenými odporem sněhu. Celková  $iPTP$  byla vypočítána jako součet  $iPTP_{insp}$  (inspirační) a  $iPTP_{exp}$  (expirační) a je vyjádřena v Pa·s/min. Statistická významnost byla testována stejným způsobem jako předchozí fyziologické parametry.

---

## 5 VÝSLEDKY

---

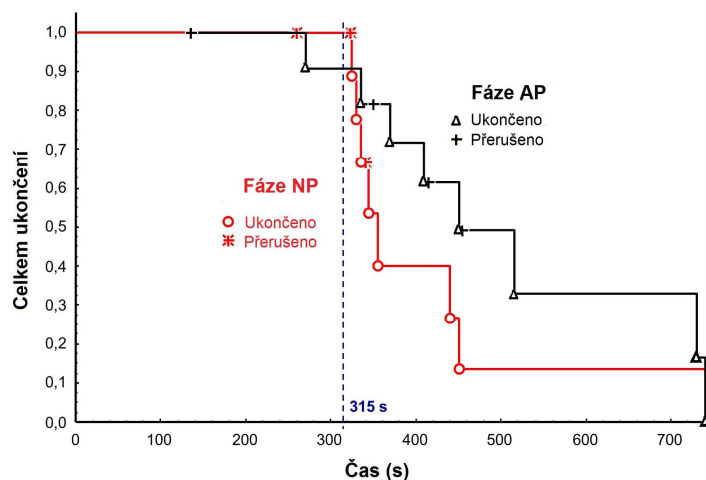
### 5.1 ČAS DÝCHÁNÍ DO SNĚHU

---

Pro vyhodnocení měření byly využity z celkového počtu 12 dobrovolníků výsledky 10 z nich. Dva probandi byli vyřazeni z následujících důvodů:

- dýchání prvního probanda bylo ukončeno už po 135 s trvání experimentu. Ukončení bylo na rozhodnutí anesteziologa z důvodu ventrikulárních extrasystol měřeného probanda;
- druhý proband byl vyřazen z důvodu netěsnosti dýchacího okruhu zjištěného v průběhu fáze NP (detekce nenulové  $C_{N_2O}$  v okruhu);
- ukončení stejného probanda na jeho žádost již po 270 s, tj. dříve než 315 s, které byly určeny jako minimální doba trvání pro vyhodnocení experimentu.

Doba trvání a ukončení experimentu dýchání do sněhu je znázorněna na grafu č. 1. Doba 315 s, která byla stanovena k jednotlivým výpočtům, je vyznačena modrou přerušovanou čarou.

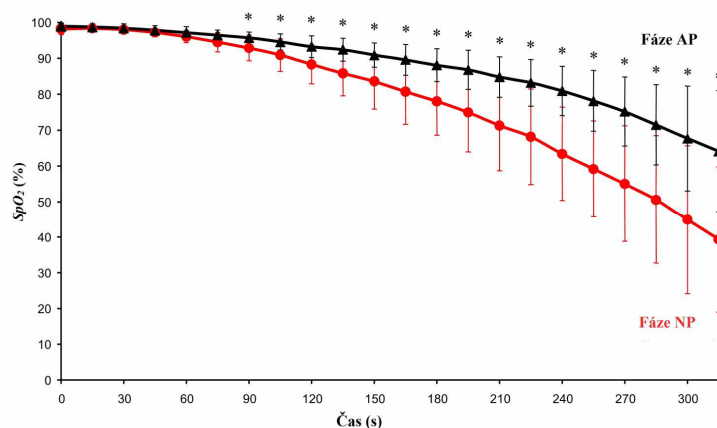


Graf 1 Doba dýchání jednotlivých probandů v obou fázích experimentu

Termín „ukončeno“ značí přerušení experimentu na žádost probanda a termín „přerušeno“ vyjadřuje ukončení experimentu pro jiné důvody – rozhodnutí anesteziologa, kritické fyziologické hodnoty nebo jiné technické problémy.

## 5.2 PERIFERNÍ SATURACE KRVE KYSLÍKEM ( $SpO_2$ )

Nedostatek vzduchu měl významný vliv na časový průběh  $SpO_2$ , což je názorně ukázáno na grafu č. 2. V úvodu se průběh jednotlivých fází nijak významně neprojevoval, avšak po 90 s experimentu se křivky začaly lišit na hladině statistické významnosti  $p \leq 0,05$ . Rozdíl mezi fází AP a NP v průběhu experimentu neustále narůstal.



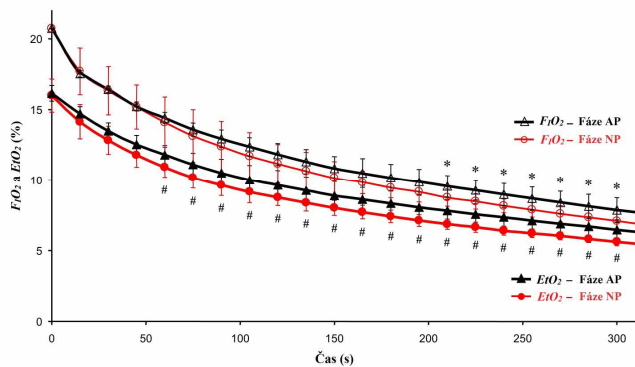
Graf 2 Rozdíl mezi hodnotami  $SpO_2$  v průběhu fází AP a NP

Hodnoty v grafu jsou průměry,  $\pm$  značí směrodatnou odchylku. Symbol \* vyjadřuje statistickou významnost rozdílů  $SpO_2$  mezi fázemi AP a NP,  $p \leq 0,05$ .



### 5.3 HODNOTY FRAKCE KYSLÍKU ( $O_2$ )

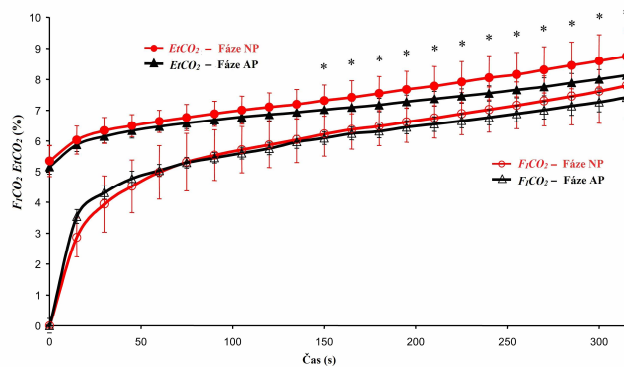
Stejný trend jako u  $SpO_2$  měly i inspirační a expirační frakce kyslíku a oxidu uhličitého. Nicméně rozdíl, který by byl statisticky významný na hladině statistické významnosti  $p \leq 0.05$ , se projevoval později než u  $SpO_2$ . U obou plynů nastal statisticky významný rozdíl mnohem dříve u expiračních frakcí, kde se jednalo o 60 s pro  $EtO_2$  a 150 s pro  $EtCO_2$ . U inspirační frakce kyslíku  $F_I O_2$  došlo ke statisticky významným rozdílům až po 210 s, zatímco inspirační frakce oxidu uhličitého  $F_I CO_2$  nevykazovala statistickou významnost po celou dobu experimentu  $F_I CO_2$ ,  $EtCO_2$  (%).



Graf 3 Hodnoty inspirovaného ( $F_I O_2$ ) a expirovaného ( $EtO_2$ ) kyslíku v průběhu fází AP a NP

Hodnoty v grafu jsou průměry,  $\pm$  značí směrodatnou odchylku. Symbol \* vyjadřuje statistickou významnost rozdílů  $F_I O_2$  mezi fázemi AP a NP na hladině statistické významnosti  $p \leq 0.05$ . Symbol # vyjadřuje statistickou významnost rozdílů  $EtO_2$  mezi fázemi AP a NP na hladině statistické významnosti  $p \leq 0,05$ .

### 5.4 HODNOTY FRAKCE OXIDU UHLIČITÉHO ( $CO_2$ )

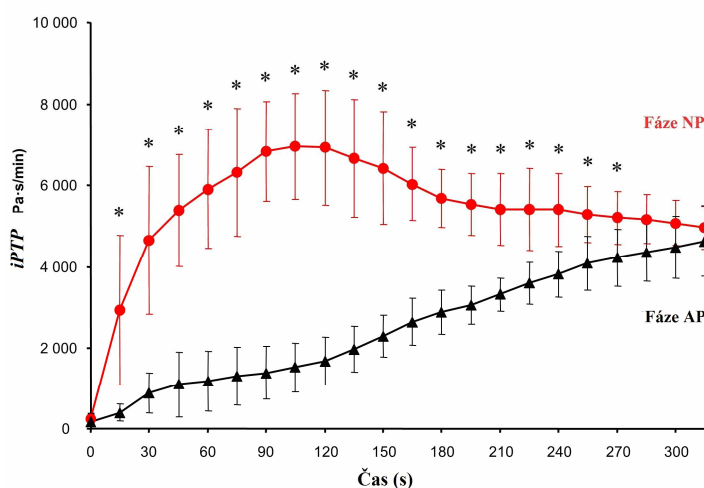


Graf 4 Hodnoty inspirovaného ( $F_I CO_2$ ) a expirovaného ( $EtCO_2$ ) oxidu uhličitého v průběhu fází AP a NP

Hodnoty v grafu jsou průměry,  $\pm$  značí směrodatnou odchylku. Symbol \* vyjadřuje statistickou významnost rozdílů  $EtCO_2$  mezi fázemi AP a NP na hladině statistické významnosti  $p \leq 0,05$ .

## 5.5 HODNOCENÍ DECHOVÉHO ÚSILÍ $iPTP$

Na grafu č. 5 můžeme sledovat rozdíly  $iPTP$  při dýchání během fází AP a NP. Z grafu je patrné, že rozdíl  $iPTP$  mezi jednotlivými fázemi AP a NP se projevil již bezprostředně po zahájení dýchání. Nárůst  $iPTP$  při fázi NP je v prvních počátcích experimentu enormní a neustále dochází ještě k jeho navyšování. Přibližně po 2 minutách křivka  $iPTP$  pro fázi NP začíná klesat a pomalu se v dalším průběhu přibližuje ke křivce  $iPTP$  pro fázi AP. Celková  $iPTP$  byla vypočítána jako součet  $iPTP_{insp}$  (inspirační) a  $iPTP_{exp}$  (exspirační) a je vyjádřena v Pa·s/min. Statistická významnost byla testována stejným způsobem jako předchozí fyziologické parametry.



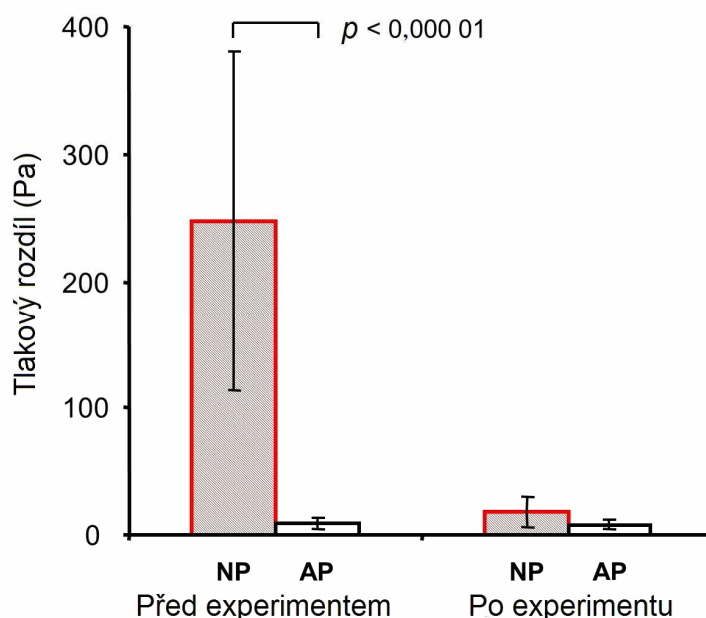
*Graf 5 Rozdíl v dechovém úsilí vyjádřený jako Pressure-Time Product ( $iPTP$ ) v průběhu fází AP a NP*

Hodnoty v grafu jsou průměry,  $\pm$  značí směrodatnou odchylku. Symbol \* vyjadřuje statistickou významnost rozdílů  $iPTP$  mezi fázemi AP a NP  $p \leq 0,05$ .

## 5.6 MĚŘENÍ ODPORU SNĚHU

Měření odporu sněhu se provádělo vždy před experimentem a po jeho ukončení. Odpor sněhu se měřil pomocí rozdílu tlaků v dýchacím okruhu a okolního tlaku při konstantní rychlosti průtoku vzduchu 60 L/min. Tyto hodnoty jsou vyjádřeny jako průměr, symbol  $\pm$  znázorňuje směrodatnou odchylku ( $SD$ ). Pro normalitu dat byl zvolen Shapiro-Wilk test a dvojitý párový Studentův  $t$ -test pro porovnání statistické významnosti mezi AP a NP. Z grafu je patrné, že odpor sněhu před experimentem u fáze NP byl 27krát větší než

u fáze NP. Nicméně odpor sněhu po experimentu už statisticky významný rozdíl mezi těmito dvěma fázemi nevykázal. Po fázi NP bylo prováděno měření dutiny, která byla dýcháním při experimentu vytvořena. Vytvořená dutina byla válcového tvaru, jejíž průměr měl hodnotu  $36 \text{ mm} \pm 9 \text{ mm}$  (od 24 do 52 mm) a délku  $59 \text{ mm} \pm 19 \text{ mm}$  (od 35 – 90 mm). Průměrný objem vytvořených dutin činil  $61 \text{ mL} \pm 34 \text{ mL}$  (od 29 do 127 mL). Sníh v okolí těchto dutin byl mokrý, avšak nebyly zde pozorovány žádné známky tvorby ledové krusty.



*Graf 6 Hodnoty odporu sněhu měřeného před a po experimentu fází AP a NP*

Hodnoty v grafu jsou průměry,  $\pm$  značí směrodatnou odchylku. Statistická významnost rozdílů tlaku mezi fázemi AP a NP před experimentem  $p < 0,000 01$ .

## 6 DISKUZE

### Historie výzkumného projektu

Tato studie je pokračováním společného výzkumného projektu Fakulty tělesné výchovy a sportu UK, Fakulty biomedicínckého inženýrství ČVUT a Fakulty elektrotechnické ČVUT. Na projektu spolupracovali studenti doktorského studia Kinantropologie s vědeckými pracovníky, odborníkem na ventilačně-respirační problematiku (prof. Ing. Karel Roubík, Ph.D.) a se specialistou na výzkumy přežití v extrémních podmínkách (Ing. Ladislav Sieger, CSc.).

K úspěšnému průběhu projektu přispěli i studenti Vojenského oboru Fakulty tělesné výchovy a sportu UK, kteří jako probandi měli pro tento typ výzkumu velmi dobré předpoklady, a to jak z hlediska svého zdravotního stavu a fyzické kondice, tak i psychické odolnosti. Psychickou odolnost prokázali především absolvováním extrémních kurzů přežití a komplexních cvičení v AČR. V průběhu náročného výzkumu prokázali příkladnou motivaci a soutěživost.

Realizaci projektu umožnily i specifické možnosti AČR (zajištění místa výzkumu v horských podmínkách s ubytovacím zařízením pro celý výzkumný tým, zapůjčení zdravotnické a komunikační techniky s vybavením záchranné služby, na čemž se podílela Letecká základna Praha – Kbely). Dalším nutným opatřením při experimentu byla přítomnost anesteziologa z ÚVN Praha.

Výzkum extrémní, i když jen simulované situace pobytu pod sněhovou lavinou, byl rizikový a vyžadoval pečlivé zabezpečení. Tomu odpovídala i vysoce odborná první pomoc (přítomnost zdravotnického pracovníka, anesteziologa a sanitního vozu a dále také spolupráce s odborníky z Horské služby ve Špindlerově Mlýně).

První fáze projektu byla zpracována a obhájena v r. 2013 jako disertační práce PhDr. Michala Maška, Ph.D. [68]. Tato práce byla pojata jako pilotní studie a jejím úkolem bylo nejen potvrdit difusibilitu respiračních plynů ve sněhové kapse, ale zároveň i vyzkoušet a případně vylepšit originální technické postupy navržené experty z ČVUT v Praze. Měření v přizpůsobených „laboratorních“ podmínkách horské chaty nepřinášelo žádné potíže. Problematictější bylo zvládnutí náročného měření v nepříliš příznivých podmínkách zevního prostředí. Zcela zásadní opatření pro správnou funkci měřících aparatur byla ochrana před působením chladu či mrazu a vlhka.

Nicméně prvním a základním problémem bylo bezpečné umístění probandů. Ihned z počátku byla zamítnuta možnost úplného zahrabání. Zvažoval se a vyzkoušel částečný záhrab s umístěním hlavy v závěji. Nakonec byla poloha probandů velmi uspokojivě vyřešena polohou vleže na tepelně izolované podložce. Probandi tak mohli být pod stálou kontrolou a současně byli chráněni proti výraznějšímu působení chladu (efekt hypotermie se zcela záměrně nesledoval). Dále se musela řešit tvorba a utěsnění sněhové kapsy, stejně jako utěsnění celého systému hadic a ventilů. Museli se zajistit podmínky pro správné funkce měřících aparatur (tzn. musel se minimalizovat vliv chladu umístěním citlivých přístrojů v částečně vyhříváném stanu). Musela být také zajištěna registrace měřených dat i vzájemná komunikace s probandem a s dalším personálem. Velmi důležité pro

charakteristiku experimentálních podmínek bylo i měření důležitých fyzikálních veličin jako jsou teplota vzduchu a sněhu, hustota sněhu a průtočný odpor sněhu.

Z důvodu rizika případných zdravotních komplikací, navozených extrémní experimentální situací, bylo třeba prostudovat příslušnou odbornou literaturu a přísně dodržovat bezpečnostní opatření podle doporučení Etické komise FTVS UK.

Při prvním výzkumu, který prováděl kolega Mašek a já jsem se ho také osobně účastnil, tvořilo experimentální skupinu 11 zdravých mladých mužů. Ti byli nejdříve otestováni na senzitivitu vůči hypoxii a hyperkapnii apnoickými testy a v předtestu ještě podrobeni testu usilovného výdechu *FVC*. Ve vlastním experimentu byly sledovány fyziologické parametry při dýchání jak do uzavřeného nepropustného vaku s objemem 8 L, tak do sněhové kapsy s objemem 0,4 L.

V těchto dvou experimentálních situacích byly vyhodnocovány oběhové parametry (kontinuálně měřený krevní tlak a srdeční frekvence vyhodnocovaná z EKG záznamu) a ventilačně-respirační parametry (minutová ventilace, dechový objem a frekvence, procentuální frakce  $O_2$  a  $CO_2$  ve vdechovaném a vydechovaném vzduchu a periferní kyslíková saturace krve). I když doba výdrže dýchání byla individuálně odlišná, pro vyhodnocení naměřených hodnot byla použita jednotná doba 5 a půl minuty. Na konci standardního měření byly ve vdechovaném vzduchu nalezeny výrazně vhodnější podmínky u dýchání do sněhu než při dýchání do 20krát většího, ale neprodyšného vaku ( $CO_2$  3,7 % proti 7,3 % a  $O_2$  14,1 % proti 8,7 %). Tento nálezní podpořil hypotézu o možnosti difuze respiračních plynů ve sněhu. Překvapivým nálezem byla (při jinak lepších výsledcích) výraznější redukce periferní saturace  $O_2$  při dýchání do sněhové kapsy (až na 64 %) než při dýchání do neprodyšného vaku (73 %). Vysvětlení se hledalo v možnosti nežádoucího ovlivnění výsledku měření chladovou vazokonstrikcí, což se již v podobných situacích několikrát prokázalo [44].

### **Diskuse k výsledkům předkládané práce**

---

Nejdůležitějším a navíc unikátním přínosem této studie bylo **potvrzení první hypotézy**, že **dýchání přímo do lavinového sněhu** je po dobu nejméně **5 minut možné**. Toto dýchání je však spojené s výrazně zvýšenou dechovou prací. Díky teplému a vlhkému

vydechovanému vzduchu se v průběhu experimentu vytvořila ve sněhu malá kapsa s objemem kolem 60 mL.

Výsledky vedly ke dvěma základním poznatkům.

1. Ihned na **začátku** experimentu se ve fázi NP (při **dýchání přímo do sněhu**) objevilo extrémní zvýšení dechové práce. Díky této několikanásobně zvýšené dechové práci došlo k **rychlým změnám** expiračních frakcí jak kyslíku a oxidu uhličitého, tak i periferní saturace krve kyslíkem  $SpO_2$ . Zvýšená práce dýchacích svalů vyvolala vyšší nároky na metabolismus, tzn. i zvýšenou spotřebu kyslíku spolu se zvýšenou produkcí oxidu uhličitého. To byly faktory, které rychle zhoršovaly již narušenou homeostázu a aktuální stav probandů.
2. Nálezy menších rozdílů u inspirovaných frakcí kyslíku a oxidu uhličitého v obou experimentálních situacích naznačily, že **sněh je porézní prostředí**, které je schopno dodávat omezené množství kyslíku a zároveň je také schopné omezené množství oxidu uhličitého odvádět.

Po ukončení každého jednotlivého měření jsme měřili difuzivitu  $CO_2$  ve sněhu. Zvýšená koncentrace oxidu uhličitého ( $C_{CO_2}$ ) byla nejdále naměřena ve vzdálenosti 20 cm od hrany vzduchové kapsy, příp. konce patientské Y-spojky. Rozdíl mezi fázemi AP a NP nebyl pozorován. Toto zjištění jen potvrzuje velmi malou schopnost rozpouštění  $CO_2$  ve sněhu, což je zcela zásadní z hlediska rychle narůstající hyperkapnie při zasypání sněhovou lavinou.

**Významné rozdíly** mezi fázemi **NP a AP** byly pozorovány v **expiračních frakcích** kyslíku i oxidu uhličitého a v periferní **saturaci krve kyslíkem**  $SpO_2$ . U inspiračních frakcí se významné rozdíly objevily mnohem později ( $F_I O_2$ ) nebo k nim nedošlo vůbec ( $F_I CO_2$ ).

Významným nálezem byly také rozdíly mezi dvěma experimentálními fázemi v dechové práci. Při dýchání **přímo do sněhu** byl pozorován náhlý a výrazný **nárůst dechového úsilí**, vyjádřený jako  $iPTP$ , a to **bezprostředně po zahájení** experimentu. Při dýchání do vzduchové kapsy s objemem 1 L nebyla zaznamenána výrazná změna  $iPTP$ . Dechová práce naopak narůstala pomalu a plynule a odpovídala v souvislosti s rozvojem hyperkapnie, vyvolané opětovným vdechováním vydechovaného vzduchu, postupnému zvyšování dechových objemů a dechové frekvence. Bezprostřední výrazné zvýšení dechového úsilí ( $iPTP$ ) **korelovalo s velkým odporem sněhu** (viz graf č. 6). Uplatnil se tu známý fyzikální vztah, podle kterého se odpor zvyšuje s poklesem průřezové plochy průtoku a naopak. Podle Hagen-Poiseuille rovnice je objemový tok (množství protékajícího plynu) přímo úměrný rozdílu tlaku na začátku a na konci trubice. Podle rovnice však není vztah mezi

odporem sněhu a velikostí kapsy lineární. I malá změna ve velikosti kapsy vedla ke značným změnám v odporu protékajícího vzduchu, a to i v případě, že původní kapsa byla velmi malá. I přes velmi významný rozdíl v odporu sněhu mezi fázemi AP a NP, zjištěnými na začátku experimentu, **nebyl po ukončení** experimentu zjištěn v odporu statisticky **významný rozdíl**.

Toto zjištění dokazuje, že **vytvoření** byť **jen malé vzduchové kapsy** ( $61 \text{ mL} \pm 34 \text{ mL}$ ) výrazně **snižuje odpor** proudění vzduchu a tím i vykonávanou **dechovou práci**.

**Potvrdila se tedy i druhá hypotéza**, která predikovala možnost dosáhnout reálného snížení dechového úsilí (*iPTP*) i u velmi malých vzduchových kapes.

Přes všechna poučení a snahy o předcházení problémů z minulé studie se patrně nezabránilo chladovému ovlivnění hodnot periferní kyslíkové saturace krve. I při dostatečném zateplení teplou palčákovou rukavicí byly na konci experimentu nalezeny nízké až **kritické hodnoty periferní kyslíkové saturace krve**. Opakovaně se ukazuje, jak uvádí specialista na leteckou medicínu Dr. Melechovský [44], že nevýhodou pro měření pulzními oxymetry jsou nízké teploty. Chladem vyvolaná vazokonstrikce v prstech ruky totiž snižuje průtok potřebného množství okysličené krve a oxymetry podávají falešně nízké hodnoty. S hodnotami nízké saturace nekorespondovaly obtíže, typické pro výskyt takto nízkých hodnot.

### **Srovnání našich výsledků s výsledky podobných studií**

---

Brugger et al. [22] popsali nevýznamný rozdíl mezi hodnotami  $EtCO_2$  u probandů, kteří dýchali do vzduchových kapes o objemu 1 L a 2 L. Exspirovaný  $PaCO_2$  vystoupil u jejich probandů na 51 mm Hg (6,8 kPa) a arteriální saturace kyslíku klesla ve 4. min na 88 %. Redukce  $SpO_2$  byla nižší u větší kapsy a korelovala s hustotou sněhu. Experiment ukončilo 21 % účastníků pro subjektivní potíže (dušení, mráкотné stavy, panika), u 61 % probandů byl experiment přerušen při poklesu  $SpO_2 < 75 \%$  a 18 % osob ( $n = 5$ ) ukončilo experiment až po 30 min. Podle Bruggera se na stupni asfyxie podílejí nejen velikost kapsy a hustota sněhu, ale také individuální charakteristiky jedince (asi 22% podíl). Příčinou může být podle Bruggera různá psychická odolnost a senzitivita vůči hypoxii a hyperkapnii. Srovnání se nabízí především u saturace kyslíkem. U našich probandů byly

nalezeny hodnoty podstatně nižší a s výjimkou 2 osob byl experiment individuálně ukončen mezi 5. až 11. min (graf 1). Je třeba upozornit, že v přípravě našeho experimentu byl únik vydechovaného či nasávaného vzduchu mimo sněhové prostředí pečlivě ošetřen pomocí  $N_2O$  (viz metodika).

Použití zařízení AvaLung, jehož výrobcem je firma Black Diamond, představuje výrazné prodloužení doby přežití. Analytická studie, publikovaná Grissomem CK et al. [12], objasnila princip zařízení, zamezující zpětné vdechování vydechovaného plynu pomocí jednosměrných ventilů s rozdílným umístěním inspiračního (na hrudníku) a expiračního výstupu (na zádech). Již konstrukce samotného zařízení usnadňuje dýchání. Vstupní otvor má velkou povrchovou plochu a snižuje tak odpor proudění vzduchu při dýchání ze sněhu. Problémem používání tohoto zařízení je především schopnost zasaženého vložit náustek zařízení do úst a tam jej i po celou dobu při zasažení lavinou udržet.

Použití Avalungu a dalších podobných pomůcek ve sněhovém závalu prověřovali autoři Radwin, Grissom, Windsor a další [11 – 14]. Jejich probandi dokázali vydržet ve sněhovém závalu 73-93 min bez výraznějších odchylek od fyziologických norem.

V naší práci jsme vyhodnotili dechové úsilí pomocí parametru Pressure-Time Product (*PTP*), který byl vhodnější než dechová práce (Work of Breathing - *WoB*). *PTP* je vhodným indikátorem dechové práce a práce metabolické [69]. Field et al. [70] prokázali, že spotřeba kyslíku z dýchacího svalstva jen velmi slabě koreluje s mechanickou dechovou prací (*WoB*), která je výsledkem  $\Delta P \cdot \Delta V$ . Ve vyjádření *PTP* je však korelace velmi dobrá. Bere v úvahu izometrickou fázi kontrakce dýchacích svalů [71] a je zároveň dobrým ukazatelem výdeje energie [72].

Paal et al. [23] zaměřili svoji velice zajímavou studii mimo jiné i na hypotermii. U zasypaných anestetizovaných zvířat sledovali proto i jiné parametry, jako např. tělesnou teplotu, *pH* krve a některé oběhové ukazatele, které v naší studii sloužily jen jako bezpečnostní markery.

### **Faktory limitující výsledky práce**

---

Práce byla limitována několika faktory, které se do jisté míry mohly promítnout do výsledků studie.

1. Experiment byl zaměřený pouze na vybrané parametry. Opomíjel vlivy dalších proměnných, jako jsou například hypotermie, útlak hrudníku způsobený váhou sněhu,



psychické aspekty, trauma a další. Toto jsou však vlivy, které není možné z etických důvodů experimentálně zkoumat na lidech (viz Helsinská deklarace). Na druhou stranu byla studie navržena tak, aby eliminovala zkreslení výsledků vstupem dalších negativních faktorů a proměnných. Zabývala se frakcemi respiračních plynů, periferní saturací kyslíkem a dechovým úsilím při přítomnosti nebo absenci vzduchových kapes ve sněhu při zasypání oběti sněhovou lavinou.

2. Výběr probandů nebyl náhodný. Tato homogenní skupina byla vybrána ze zdravých, dobře trénovaných a vysoce motivovaných studentů Vojenského oboru při FTVS UK. K tomuto výběru bylo přistoupeno záměrně tak, aby byla odstraněna možná zdravotní rizika, která by mohla studii ovlivnit. Dobrovolníci museli být také vysoce odolní proti diskomfortu, který byl v průběhu experimentu značný. Svoji odolnost prokázali absolvováním několika extrémních armádních kurzů ve speciální tělesné přípravě (STP). Velikost souboru jsme zvolili na základě předchozích podobných studií v této oblasti [11 – 14, 21 – 23].

3. Celý experiment probíhal v poměrně stabilních klimatických a povětrnostních podmínkách, které zajišťovaly určité fyzikální vlastnosti sněhu (druh sněhu, hustota sněhu, teplota sněhu, teplota vzduchu apod.). Výzkum byl realizován v nadmořské výšce (762 m n.m.) s vyšším parciálním tlakem kyslíku ( $PaO_2$ ) než v ostatních dříve citovaných studiích. To by mohlo ovlivnit publikované hodnoty  $F_I O_2$ ,  $EtO_2$  a  $SpO_2$  a jejich porovnávání s experimenty, prováděnými ve vyšších nadmořských výškách. Jsme však přesvědčeni, že trendy těchto parametrů společně s efekty účinků jednotlivých fází výzkumu tím nebyly významně ovlivněny.

4. Vzhledem k používání měřicí techniky, která je využívána na nemocničních jednotkách JIP, nebylo možné vyhodnotit některé parametry (především dechové objemy). Tyto údaje jsme sice po celou dobu zaznamenávaly, ale v některých případech dosahovaly natolik extrémní hodnoty, že přesahovaly technické možnosti měřicí techniky.

5. Zvolená problematika byla náročná nejen svou přípravou, ale i samotnou realizací. Byla vázána mimo organizačních a technických záležitostí především na vhodné klimatické podmínky a dostatek sněhu. Další předpokládaný výzkum, který by řešil situaci v rozdílných klimatických a sněhových podmínkách s návazností na tvorbu matematicko-fyzikálního modelu, se již nerealizoval, a to jak pro sněhu nepříznivý rok, tak i pro časový limit, ukončení mého doktorského studia.

Náš výzkum pomáhá lépe pochopit patofyziologii oběti při zasypání sněhovou lavinou během prvních pěti minut v případě absence vzduchové kapsy v bezprostřední blízkosti před dýchacími cestami a v případě přítomnosti této vzduchové kapsy o objemu 1 L.

Tato první studie dokládá, že dýchání ve sněhu je možné i bez sněhové kapsy vytvořené před dýchacími cestami. Z tohoto hlediska byla potvrzena hypotéza H1.

Limitujícím faktorem za námi měřených podmínek byl vysoký nárůst dechové práce, která způsobuje vyšší nároky na metabolismus. Tyto vyšší nároky následně zapříčiňují vyšší spotřebu kyslíku a zároveň vyšší produkci oxidu uhličitého. Hypotéza H2 potvrdila, že přítomnost vzduchové kapsy o objemu 1 L významně snižuje dechový odpor a tím i dechovou práci ve srovnání s absencí vzduchové kapsy před dýchacími cestami zasypaného.

Na základě těchto výsledků je patrné, že vytvoření, popř. udržení si byť jen malé vzduchové kapsy před dýchacími cestami, snižuje dechovou práci a tím i nároky na metabolismus. To v konečné podobě vede k prodloužení doby přežití pod sněhovou lavinou a tím i k větší šanci pro záchranu zasypané oběti lavinového neštěstí. Je třeba ale také zmínit, že ani ten nejlepší technický prostředek nemůže nahradit zkušenosti a znalosti, jejichž nedostatek vede právě k vyšší pravděpodobnosti lavinové nehody.

Další výzkum ventilačně-respiračních změn by mohl pokračovat právě tímto směrem, kdy by komplexní zkoumání této problematiky mohlo být prováděno na animálních modelech (např. selata), jako tomu bylo při výzkumu v rakouském Ventu [23]. Takový výzkum je však časově, organizačně a finančně velmi náročný a pro jeho realizaci je nutné využít vhodný grant, který by tyto problémy dokázal pokrýt.

Studie je prvním výzkumem svého druhu zabývajícím se dýcháním bez dutiny před dýchacími cestami při zasypání lavinou.

Studie byla přijata a publikována v časopise Plos One (USA) [73].

1. Brugger H, Durrer B, Adler-Kastner L, Falk M, Tschirky F. Field management of avalanche victims. *Resuscitation* 2001; 51: 7–15.
2. Boyd J, Haegeli P, Abu-Laban RB., Shuster M, Butt JC. Patterns of death among avalanche fatalities: a 21-year review. *Canadian Medical Association Journal* 2009; 180:5: 507-512.
3. Hohlrieder M, Brugger H, Schubert HM Pavlic M, Ellerton J, Mair P. Pattern and severity of injury in avalanche victims. *High Altitude Medicine & Biology* 2007; 8:1: 56-61.
4. Falk M, Brugger H, Adler-Kastner L. Avalanche survival chances. *Nature* 1994; 368:21.
5. Brugger H, Falk M, Adler-Kastner L. Der Lawinennotfall. Eine aktuelle Übersicht. *Wiener Klinische Wochenschrift* 2003; 9:8:691-701.
6. Stalsberg H, Albretsen C, Gilbert M, Kearney M, Moestue E, Nordrum I et al. Mechanism of death in avalanche victims. *Virchows archiv a pathological anatomy and histopathology* 1989; 414: 415-422.
7. Logan N, Atkins D. The snowy torrents: Avalanche accidents in the United States 1980-1986. *Colorado geological survey* 1996; 240-243.
8. Grossman MD, Saffle, JR, Thomas F, Tremper B. Avalanche trauma. *Trauma* 1989; 29: 1705-1709
9. McIntosh SE, Grisom CK, Olivares CR., Kim HS, Tremper B. Cause of death in avalanche fatalities. *Wilderness & Environmental Medicine* 2007; 18:4: 293-297.
10. Haegeli P, Falk M, Brugger H, Etter HJ, Boyd J. Comparison of avalanche survival patterns in Canada and Switzerland. *Canadian Medical Association Journal* 2011; 183(7), 789-795.

11. Grissom CK, McAlpine JC, Harmston CH, Radwin MI, Giesbrecht GG, Sholand MB et al. Hypercapnia Effect on Core Cooling and Shivering Threshold During Snow Burial. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 2008; 79:8: 735-742.
12. Grissom CK, Radwin MI, Harmston CH, Hirshberg EL, Crowley TJ. Respiration during snow burial using an artificial air pocket. *Jama* 2000; 283:17: 2261-2271.
13. Windsor JS, Hamilton E, Grocott MP, O'Dwyer MJ, Milledge JS. The snow snorkel: A proof of concept study. *Wilderness & Environmental Medicine* 2009; 20: 61-65.
14. Radwin IM, Grissom CK, Sholand MB, Harmston CH. Normal Oxygenation and Ventilation during Snow Burial by the Exclusion of Exhaled Carbon Dioxide. *Wilderness Environmental & Medicine* 2001; 12: 256-262.
15. Chardon G, Bonnetere V, Bernadet C, De Gaudemaris R. Intérêt du sac à dos airbag lors des accidents d'avalanche comme moyen de secours supplémentaire en complément de l'appareil de recherche des victimes en avalanche (ARVA). *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement* 2007; 68:3: 297-287.
16. Haegeli P, Falk M, Procter E, Zweifel B, Jarry F, Logan S et al. The effectiveness of avalanche airbags. *Resuscitation* 2014; 85:1197-1203.
17. Haegeli P, Falk M, Procter E, Zweifel B, Jarry F, Logan S et al. An up-to-date perspective on the effectiveness of avalanche airbags. *Snow Science* 2014; 33:1: 9-11
18. Brugger H, Etter HJ, Zweifel B, Mair P, Hohlrieder M, Ellerton J et al. The impact of avalanche rescue devices on survival. *Resuscitation*, 2007; 75:3: 476-483.
19. Sýkora K, Michalička V, Dlouhý R. Airbag backpacks – Active avalanche protection. *Journal of Outdoor Activities* 2015; 9:1: 32-39.
20. Burtcher M. Avalanche survival chances - related comment. *Nature* 1994; 371(6497):482-482.

21. Brugger H, Oberhammer R, Adler-Kastner L, Beikircher W. The rate of cooling during avalanche burial; a „Core“ issue. *Resuscitation* 2009; 80: 956-958.
22. Brugger H, Sumann G, Meister R, Adler-Kastner L, Mair P, Gunga HC. Hypoxia and hypercapnia during respiration into an artificial air pocket in the snow: implications for avalanche survival. *Resuscitation* 2003; 58: 81-88.
23. Paal P, Strapazzon G, Braun P, Ellmauer PP, Schroeder DC, Suman G et al. Factors affecting survival from avalanche burial – A randomised prospective porcine pilot study. *Resuscitation* 2013; 84:2: 239-243.
24. Seok B, Helmig D, Williams MW, Liptzin D, Chowanski K, Hueber J. An automated system for continuous measurements of trace gas fluxes through snow: an evaluation of the gas diffusion method at a subalpine forest site, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry* 2009; 95: 95-113.
25. Brugger H, Paal P, Boyd J. Prehospital resuscitation of the buried avalanche victim. *High Altitude Medicine & Biology* 2011; 12(3): 199 – 205.
26. Pastucha D, Bartůňková S, Filipčíková R, Gallo J, Havlíček P, Hyjánek J et al. *Tělovýchovné lékařství. Vybrané kapitoly*. Praha: Grada. 2014; 288. ISBN 978-80-247-4837-5.
27. Woods DR, Boos C, Roberts PR. Cardiac arrhythmia at high altitude. *J R Army Med Corps*. 2011; 157:1:59 – 62.
28. Alexander JK. Cardiac arrhythmia at high altitude: the progressive effect of aging. *Heart Inst. J.* 1999; 26:4:258 – 263.
29. Widimský J. *Hypertenze: 24hodinové monitorování krevního tlaku (AMTK)*. Praha: Triton 2002; 51 – 56.
30. Zeman V. *Tělesná aktivita v chladu*. In Máček M, Radvanský J. *Fyziologie a klinické aspekty pohybové activity*. Praha: Galen, 2011. ISBN 978-80-7262-695-3.
31. Sieger L. *Hiblerův zábal v praxi*. *Med Sport Boh Slov*. 2008; 17:2:90 – 93.

32. Hampl V. Fyziologie extrémních stavů [online]. Praha: Karlova Univerzita , [cit.2011-11-18]. Dostupné z  
WWW:<[http://fyziologie.lf2.cuni.cz/hampl/teach\\_mat/extremy/index.htm](http://fyziologie.lf2.cuni.cz/hampl/teach_mat/extremy/index.htm)
33. Vránová J. Metabolismus při fyzickém zatížení. In: Bartůňková S. Fyziologie pohybové zátěže. Praha: Univerzita Karlova, 2013. ISBN 978-80-87647-06-6.
34. Trojan S. Lékařská fyziologie. 4. vydání. Praha: Grada, 2003; 179 – 319. ISBN 8024705125.
35. Bartůňková, S. et al. Fyziologie pohybové zátěže. Praha: Univerzita Karlova, 2013; 246. ISBN 978-80-87647-06-6.
36. Otis AB. The Work of Breathing. J Physiological Reviews 1954; 34:3: 449-458.
37. Otis AB, Fenn WO, Rahn H. Mechanics of breathing in man. J Appl Physiol 1950; 2: 592-607.
38. Paleček F, Feitová S, Herget J, Kandus J, Novák M, Pokorný J et al. Patofyziologie dýchání. 2. vydání. Praha: Academia, 1999. ISBN 80-200-0723-7.
39. Havlíčková L. et al. Fyziologie tělesné zátěže I - Obecná část. 2. vydání. Praha: Karolinum, 2008; 203. ISBN 978-80-7184-875-2.
40. Wilmore JH, Costill DL. Physiology of Sport and Exercise. Champaign: Human Kinetics. 2004: 726 p. ISBN 0-7360-4489-2.
41. Rokyta R. Fyziologie pro bakalářská studia v medicíně, přírodovědných a tělovýchovných oborech. Praha: ISV nakladatelství. 2000; 359. ISBN 80-85866-45-5.
42. Bartůňková S. Fyziologie člověka a tělesných cvičení. Učební texty pro studenty fyzioterapie a studia tělesná a pracovní výchova zdravotně postižených. 2. vydání. Praha: Karolinum, 2010; 285. ISB 978-80-246-1817-3.
43. Wilmore JH, Costill DL. Physiology of Sport and Exercise. Champaign: Human Kinetics. 2004: 726. ISBN 0-7360-4489-2.
44. Melechovský, D. Kapitoly z letecké medicíny [cit. 2016-03-11]. Dostupné z:  
<http://www.leteckylekar.cz/kapitoly-z-letecke-mediciny/72-pulzni-oxymetr.html>

45. Vilikus Z. Tělovýchovné lékařství. Praha: Karolinum. 2004; ISBN 80-246-0821-9.
46. Cinglová L. Vybrané kapitoly z tělovýchovného lékařství. Praha: Karolinum: 2010; 114 ISBN 9788024617787.
47. Slavíková J, Švíglerová J. Fyziologie dýchání. Praha: Univerzita Karlova, 2014; 94. ISBN 9788024620657.
48. Rotman I. Fyziologické a zdravotní aspekty pohybové aktivity v extrémních výškách. In Máček M, Radvanský J. Fyziologie a klinické aspekty pohybové activity. Praha: Galen, 2011. ISBN 978-80-7262-695-3.
49. Bultas J. Výšková nemoc – praktické aspekty léčby. Med pro praxi, 2008; 5:6:251 – 253.
50. Webb JT, Balldin UI, Pilmanis AA. Prevention of decompression sickness in current and future fighter aircraft. Aviat Space Environ Med. 1993; 64:11:1048-50.
51. Šulc J. Zdravotní rizika v letecké dopravě. Interní medicína pro praxi. 2005; 7 – 8: 371 – 72.
52. Máčková J. Pohybová aktivita a sport ve vysokohorském prostředí. In Máček M, Radvanský J. Fyziologie a klinické aspekty pohybové activity. Praha: Galen, 2011. ISBN 978-80-7262-695-3.
53. Heller J. Vyšetřovací metody u sportujícího jedince. In Bartůňková S at al. Fyziologie pohybové zátěže. Praha: Univerzita Karlova, 2013; 246. ISBN 978-80-87647-06-6.
54. Hampl V, Herget J. Role of Nitric Oxide in the Pathogenesis of Chronic Pulmonary of Hypertension. Physiol Rev. 2000; 80:4:1337 – 1372.
55. Busch T, Bärtsch P, Pappert D, Grünig E, Hildebrandt W, Elser H. et al. Hypoxia Decreases Exhaled Nitric Oxide in Mountaineers Susceptible to High-Altitude Pulmonary Edema. Am J Respir Critical Care Med 2001; 163:2:368 – 73.
56. Berger MM, Hesse C, Dehnert C, Fiedler H, Kleinbongart P, Bardenheuer HJ et al. Hypoxia impairs systemic endothelial function in individuals. Am J Respir Critical Care Med, 2005; 172:6:763 – 767.

57. Gassmann M. Lessons from Tibet. In: Rotman: Zpráva z kongresu „High Altitude Tolerance.“ Heidelberg, 25 – 26. 1. 2013.
58. Novomeský F. Potápěčská medicína. Martin: Osveta, 2013; 415. ISBN-13: 978-80-8063-397-4.
59. Fölsch UR, Kochisiek K, Schmidt RF. Patologická fyziologie. Praha: Grada. 2003; 588. ISBN 80-247-0319-X.
60. McArdle WD, Katch FI, Katch VL. Exercise Physiology. Energy, Nutrition, and Human Performance. 6<sup>th</sup> edition. Lippincott Williams & Wilkins, 2007; 1068. ISBN: 0781749905
61. Guyton AC, Hall JE. Textbook of Medical Physiology. 11th. edition. Elsevier, 2006; 782–784. ISBN 987-0-7216-0240-0.
62. Bellani G, Patroniti N, Weismann D, Galbiati L, Curto F, Foti G et al. Measurement of Pressure-Time Product during Spontaneous Assisted Breathing by Rapid Interrupter Technique. *Anesthesiology* 2007; 106: 484–90.
63. Lumb AB. Nunn's Applied Respiratory Physiology. 7<sup>th</sup> edition. Elsevier, 2012.
64. American Society of Anesthesiologists, INC. New Classification of Physical Status, *Anesthesiology*, 1963; 24: 111.
65. McClung D, Schaerer PA. The Avalanche Handbook; Mountainers: Seattle, WA, 1993.
66. EN ISO 8835–2. Inhalational anesthesia systems—Part 2: Anaesthetic breathing systems. Brussel:European Comitee for Standardization, 2009.
67. Shapiro SS, Wilk MB. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 1965; 52:3–4: 591–611.
68. Mašek, M. Změny funkčních parametrů u jedince v krizové situaci (Hyperkapnie a difuze plynů pod sněhovou lavinou). FTVS UK, 2013; Diserační práce. Školitelka: doc. Bartůňková.



69. Bellani G, Patroniti N, Weismann D, Galbiati L, Curto F, Foti G et al. Measurement of Pressure-Time Product during Spontaneous Assisted Breathing by Rapid Interrupter Technique. *Anesthesiology* 2007; 106: 484–90.
70. Field S, Sanci S, Grassino A. Respiratory muscle oxygen consumption estimated by the diaphragm pressure-time index. *J Appl Physiol* 1984; 57: 44–51.
71. Sassoon CS, Mahutte CK. Work of breathing during mechanical ventilation, *Physiological Basis of Ventilatory Support*. Edited by Marini JJ, Slutsky A. New York, Marcel Dekker, 1998. pp. 261–310.
72. Collett PW, Perry C, Engel LA. Pressure-time product, flow and oxygen cost of resistive breathing in humans. *J Appl Physiol* 1985; 58: 1263–72.
73. 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* 2015; 10:12: e0144332. doi:10.1371/journal.pone.0144332.