



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ**

**Katedra biomedicínské techniky**

**Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru**

**Variability of SpO<sub>2</sub> measurements depending on the choice of finger for sensor placement**

Diplomová práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský inženýr

Vedoucí práce: Ing. Veronika Ráfl Huttová

**Bc. Šimon Walzel**

---

**Kladno 2021**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Walzel** Jméno: **Šimon** Osobní číslo: **465297**  
Fakulta: **Fakulta biomedicínského inženýrství**  
Garantující katedra: **Katedra biomedicínské techniky**  
Studijní program: **Biomedicínská a klinická technika**  
Studijní obor: **Biomedicínský inženýr**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru**

Název diplomové práce anglicky:

**Variability of SpO<sub>2</sub> measurements depending on the choice of finger for sensor placement**

Pokyny pro vypracování:

Na skupině zdravých dobrovolníků experimentálně stanovte variabilitu měření periferní saturace krve kyslíkem (SpO<sub>2</sub>) a perfuzního indexu v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru. Variabilitu měření uvedených parametrů zjistíte nejen při fyziologických hodnotách SpO<sub>2</sub>, ale i po navození krátkodobé hypoxie a hyperkapnie. Pro měření využijte pulzní oxymetry, které umožní porovnat jednotlivé naměřené výsledky mezi sebou. Výsledky studie zhodnoťte s ohledem na využívání metody pulzní oxymetrie v klinické praxi.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Amal Jubran, Pulse oximetry, Critical Care, ročník 19, číslo 1, 2015
- [2] John G. Webster, Encyclopedia of medical devices and instrumentation, ed. 6, Wiley, 2006, ISBN 978-0-471-26358-6
- [3] Michael T. Petterson, Valerie L. Begnoche a John M. Graybeal, The Effect of Motion on Pulse Oximetry and Its Clinical Significance, Anesthesia & Analgesia, ročník 105, číslo S78-84, 2007

Jméno a příjmení vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Veronika Ráfl Huttová**

Jméno a příjmení konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Jakub Ráfl, Ph.D., Thomas E. Bachman, M.Sc.**

Datum zadání diplomové práce: **15.02.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **18.09.2022**

Doc. Ing.  
Martin  
Rožánek, Ph.D.  
Digitálně podepsal  
Doc. Ing. Martin  
Rožánek, Ph.D.  
Datum: 2021.03.03  
22:08:52 +01'00'  
doc. Ing. Martin Rožánek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) katedry


prof. MUDr.  
Jozef Rosina,  
Ph.D., MBA  
Digitálně podepsal prof.  
MUDr. Jozef Rosina, Ph.D.,  
MBA  
Datum: 2021.03.04 11:56:24  
+01'00'  
prof. MUDr. Jozef Rosina, Ph.D., MBA  
podpis děkana(ky)

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru“ vypracoval samostatně a použil k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

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

V Kladně dne 10. 5. 2021

  
.....  
Bc. Šimon Walzel

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucí mé diplomové práce Ing. Veronice Ráfl Huttové, která mi věnovala značné množství cenného času v průběhu celého roku. Dále bych chtěl poděkovat MUDr. Lence Horákové za lékařský dozor při provádění experimentu, Ing. Jakubu Ráflovi Ph.D. za cenné rady se zpracováním dat, Ing. Petru Kudrnovi Ph.D. za zapůjčení přístrojové techniky a dále celému Nekonvenčnímu ventilačnímu týmu za umožnění měření experimentu zpracovaného v této diplomové práci a za konzultace při přípravě i zpracování experimentu. V poslední řadě bych chtěl poděkovat všem dobrovolníkům, kteří obětovali několik hodin svého času v můj prospěch. Tato diplomová práce byla podpořena z grantů SGS19/202/OHK4/3T/17 a SGS20/202/OHK4/3T/17.

## ABSTRAKT

### Variabilita měření $SpO_2$ v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru

Měření periferní saturace krve kyslíkem ( $SpO_2$ ) pulzními oxymetry s využitím prstových senzorů je běžně využívanou metodou pro monitorování zdravotního stavu pacientů. Sensory jsou obvykle umístovány na jeden ze tří prostředních prstů, ale některé studie poukázaly na možnost, že se měřené hodnoty  $SpO_2$  liší mezi jednotlivými prsty. Tato měření však probíhala pouze za fyziologických hodnot  $SpO_2$ . Cílem této práce bylo stanovit vliv volby prstu pro umístění senzoru pulzního oxymetru na výsledky měření  $SpO_2$  u zdravého člověka při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii. Dvě části měření v náhodném pořadí (hypoxická část a hypoxicko-hyperkapnická část) podstoupilo 24 zdravých dobrovolníků. Před začátkem každé části byly simultánně připojeny senzory pulzních oxymetrů k prstům obou rukou. Na levé ruce měli dobrovolníci nasazené senzory pulzních oxymetrů Masimo (Masimo Corporation, Irvine, CA, USA) a na pravé ruce multikanálový monitor oxygenace Nonin SenSmart Model X-100 (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA). Po minutové ustalovací fázi následovala pětiminutová desaturační fáze, při které dobrovolníci vdechovali předpřipravenou směs plynů. Obě směsi obsahovaly shodné množství kyslíku (12 %), směs hypoxicko-hyperkapnická byla navíc doplněna pěti procenty oxidu uhličitého, zbytek obsahu směsi byl tvořen dusíkem. Měřené hodnoty  $SpO_2$  se mezi jednotlivými prsty lišily, rozdíly byly nižší, než je udávaná přesnost pulzních oxymetrů výrobcem, při ustalovací fázi i ve fázi desaturační. Při dostatečné perfuzi by náhodná volba prstu pro umístění senzoru pulzního oxymetru neměla způsobit chybnou interpretaci výsledků hodnot  $SpO_2$  při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii.

### Klíčová slova

$SpO_2$ , prstový senzor, hypoxie, hyperkapnie, perfuzní index

## ABSTRACT

### **Variability of $SpO_2$ measurements depending on the choice of finger for sensor placement**

Measurement of peripheral oxygen saturation ( $SpO_2$ ) by pulse oximeters using finger sensors is a commonly used method for monitoring the condition of patients. Sensors are usually placed on one of the three middle fingers, but some studies have pointed to the possibility that  $SpO_2$  differ between fingers. However, these measurements were performed only at normal  $SpO_2$  values. The aim of this work was to determine the effect of finger selection for the placement of a pulse oximeter sensor on the results of  $SpO_2$  measurements in a healthy person with short-term hypoxia and hypercapnia. Twenty-four healthy volunteers underwent two parts of the measurement in random order (hypoxic part and hypoxic-hypercapnic part). Before the start of each part, pulse oximeter sensors were connected simultaneously to the fingers of both hands. Masimo pulse oximeter (Masimo Corporation, Irvine, CA, USA) were attached on their left hand and Nonin SenSmart Model X-100 multichannel monitor of oxygenation (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA) on their right hand. The one-minute stabilization phase was followed by a five-minute desaturation phase, in which the volunteers inhaled a pre-prepared gas mixture. Both mixtures contained the same amount of oxygen (12 %), the hypoxic-hypercapnic mixture was additionally supplemented with five percent of carbon dioxide, the rest of the content of both mixtures was nitrogen. The measured values of  $SpO_2$  differed between the individual fingers, the differences were lower than the stated accuracy of pulse oximeters by the manufacturer, during the stabilization phase and in the desaturation phase. With sufficient perfusion, random selection of a finger to position the pulse oximeter sensor should not cause misinterpretation of  $SpO_2$  results in short-term hypoxia and hypercapnia.

### **Keywords**

$SpO_2$ , finger sensor, hypoxia, hypercapnia, perfusion index

# Obsah

<b>Seznam symbolů a zkratek .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>2 Přehled současného stavu .....</b>	<b>10</b>
2.1    Vhodná místa pro měření $SpO_2$ .....	11
2.2    Vlivy na přesnost prstové pulzní oxymetrie .....	12
2.3    Cévní zásobení prstů .....	13
2.4    Porovnání hodnot $SpO_2$ mezi jednotlivými prsty.....	13
<b>3 Cíle práce .....</b>	<b>16</b>
<b>4 Metody.....</b>	<b>17</b>
4.1    Demografická charakteristika skupiny.....	17
4.2    Protokol měření.....	17
4.3    Záznam dat.....	18
4.3.1 Prstové senzory $SpO_2$ .....	19
4.4    Dýchací okruh.....	20
4.5    Dýchací směs .....	21
4.6    Zpracování dat a statistické vyhodnocení .....	22
<b>5 Výsledky .....</b>	<b>24</b>
5.1 Periferní saturace hemoglobinu kyslíkem .....	24
5.1.1 Levá ruka – pulzní oxymetry Masimo.....	26
5.1.2 Pravá ruka – pulzní oxymetr Nonin.....	27
5.1.3 Porovnání dynamických vlastností podle měřeného $SpO_2$ .....	29
5.1.4 Srovnání přístrojů podle měřeného $SpO_2$ .....	30
5.1.5 Ověření senzorů $SpO_2$ .....	31
5.2 Perfuzní index.....	32
5.3 Vývoj dalších fyziologických parametrů dobrovolníků v průběhu experimentu.....	33
<b>6 Diskuse.....</b>	<b>37</b>
6.1 Periferní saturace hemoglobinu kyslíkem .....	37
6.1.1 Ověření senzorů $SpO_2$ a porovnání přístrojů .....	39
6.2 Perfuzní index.....	40
6.3 Další fyziologické parametry v průběhu experimentu .....	41
<b>7 Závěr.....</b>	<b>42</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>43</b>
<b>Příloha A: Syllabus výzkumného projektu .....</b>	<b>47</b>
<b>Příloha B: Žádost o projednání výzkumného projektu v EK FBMI ČVUT .....</b>	<b>51</b>
<b>Příloha C: Protokol měření .....</b>	<b>52</b>
<b>Příloha D: Karta probanda .....</b>	<b>55</b>
<b>Příloha E: Informovaný souhlas .....</b>	<b>56</b>

# Seznam symbolů a zkratk

## Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
$E_tCO_2$	%	Koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu
$F_eO_2$	%	Expirační frakce kyslíku
$F_iCO_2$	%	Inspirační frakce oxidu uhličitého
$F_iO_2$	%	Inspirační frakce kyslíku
$HR$	$\text{min}^{-1}$	Tepová frekvence
$MV$	L/min	Minutová ventilace
$p$	-	Hladina statistické významnosti
$PI$	%	Perfuzní index
$RR$	$\text{min}^{-1}$	Dechová frekvence
$rSO_2$	%	Regionální saturace krve kyslíkem ve tkáni
$SaO_2$	%	Saturace arteriální krve kyslíkem
$SpO_2$	%	Saturace hemoglobinu kyslíkem v periferní části arteriálního krevního řečiště
$TV$	L	Dechový objem

Pozn.: Podle zvyklostí v anglosaské odborné literatuře v oblasti respirační péče je pro litr používán symbol L.

## Seznam zkratk

Zkratka	Význam
ABG	Laboratorní vyšetření acidobazické rovnováhy
ANOVA	Analýza rozptylu
ARO	Anesteziologicko-resuscitační oddělení
BMI	Body mass index
$CO_2$	Oxid uhličitý
ECG	Elektrokardiografie
Hb	Hemoglobin
$HbO_2$	Oxyhemoglobin
JIP	Jednotka intenzivní péče
$N_2$	Dusík
$O_2$	Kyslík



# 1 Úvod

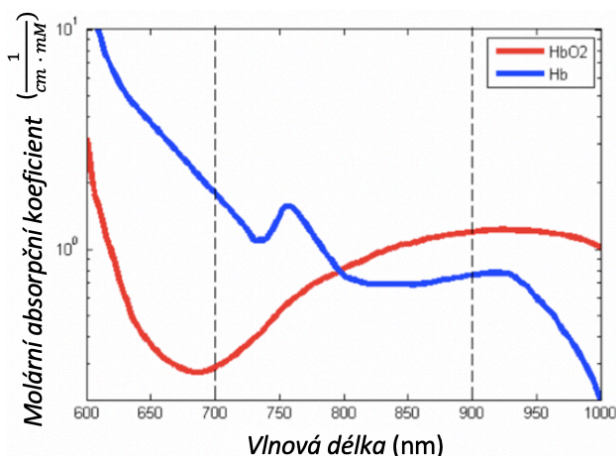
Měření periferní saturace krve kyslíkem ( $SpO_2$ ) pulzními oxymetry s využitím prstových senzorů je běžně využívanou metodou pro kontinuální monitorování zdravotního stavu pacientů. V klinické praxi jsou senzory obvykle umístovány na jeden ze tří prostředních prstů bez ohledu na dominantní ruku pacienta [1–4]. Autoři některých studií se domnívají, že naměřené hodnoty  $SpO_2$  na dominantní a nedominantní ruce pacienta se mírně liší, a poukázali na možnost, že se měřené hodnoty  $SpO_2$  budou lišit i mezi jednotlivými prsty [4–6]. Tyto hypotézy ale nebyly doposud dostatečně ověřeny, protože měření probíhala pouze za fyziologických hodnot  $SpO_2$  a zároveň hodnoty z jednotlivých prstů nebyly snímány simultánně a identickými přístroji na obou rukou. Některé studie také prokázaly vliv perfuzního indexu na měřené hodnoty  $SpO_2$  z hlediska kvality signálu i přesnosti měření [4,5,7–9], což by mohlo způsobovat případné rozdíly mezi prsty z hlediska měřeného  $SpO_2$ .

Tato diplomová práce by mohla objasnit vliv zvoleného prstu na přesnost měření  $SpO_2$  při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii a zároveň poukázat na možné odchylky, které by mohly být následně zohledněny při interpretaci naměřených hodnot. Přesnost měření a zjištěné odchylky mezi jednotlivými prsty by také mohly pomoci při experimentech, kde snížená hodnota  $SpO_2$  slouží jako koncový bod pro ukončení experimentu a může tak výrazně ovlivnit délku trvání experimentu [10].

## 2 Přehled současného stavu

Pulzní oxymetrie je diagnostická metoda měřící saturaci hemoglobinu kyslíkem v periferní části arteriálního krevního řečiště ( $SpO_2$ ). Tato metoda je vhodná zejména pro její neinvazivnost, nízké náklady a možnost kontinuálního snímání.  $SpO_2$  je jeden ze základních parametrů sledovaných na monitorech vitálních funkcí, který poskytuje informaci o množství okysličené krve v periferním krevním řečišti. Parametr  $SpO_2$  měřený pulzní oxymetrií je odhadem oxygenace arteriální krve ( $SaO_2$ ), ale ne vždy jsou tyto parametry totožné [11,12].

Vhodným místem pro umístění senzoru pulzního oxymetru jsou periferní oblasti těla, na kterých se dají vyhodnotit změny absorpce světelného záření při průchodu okysličené a odkysličené krve. Tato metoda funguje na dvou principech: na rozpoznání oxyhemoglobinu a deoxyhemoglobinu a na výpočtu pouze z pulsující části protékající krve. Oxyhemoglobin je od deoxyhemoglobinu rozpoznáván na základě rozdílné schopnosti absorpce červeného a infračerveného záření, proto je při pulzní oxymetrii využíváno diod emitujících záření o vlnové délce okolo 700 nm a 900 nm, což je znázorněno na Obr. 2.1. Některé pulzní oxymetry využívají i více vlnových délek, které umožňují detekovat další deriváty hemoglobinu, čímž dochází ke zpřesnění záznamu  $SpO_2$ . Při průchodu záření prstem dochází k absorpci záření obou vlnových délek v různém poměru, z kterého je pak určeno množství hemoglobinu, který má navázaný kyslík [13,14].

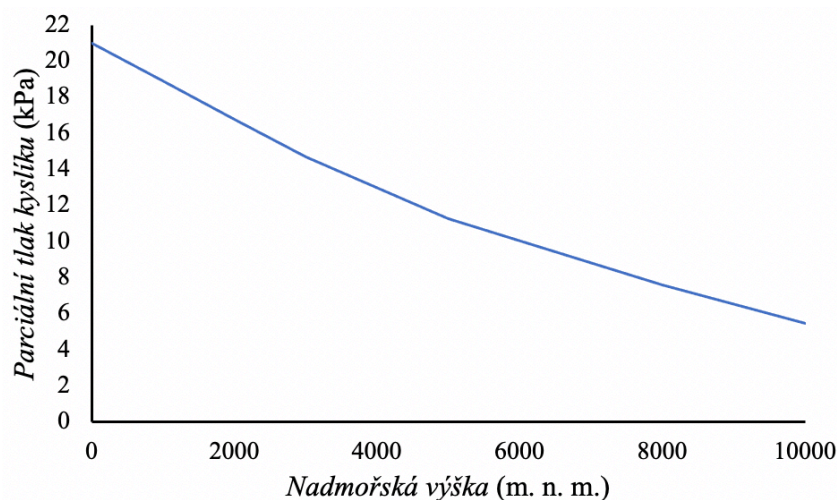


**Obr. 2.1:** Absorpční spektrum hemoglobinu. Převzato a upraveno dle [13].

Množství absorbovaného záření kolísá se srdeční revolucí, proto je pro výpočet  $SpO_2$  měřena pouze arteriální, pulsující krev, která mění svůj objem. Ostatní tkáň, jako kůže, kost, tuk a krev v žilách a kapilárách, svůj objem nemění, a jejich absorpce je považována za konstantní [14]. Poměr mezi střídavou a stejnosměrnou složkou absorpce záření je vyjádřen v procentech a nazývá se periferní perfuzní index ( $PI$ ) a jeho typický rozsah je 0,02 % až 20 % [15]. Nízký  $PI$  může být způsoben např. vazokonstrikcí periferních částí těla, což nastává zejména při podchlazení či při ztrátě krve, kdy se tělo snaží ochránit nezbytně důležité orgány.

Pokud dojde ke snížení koncentrace kyslíku v jedné z fází kyslíkové kaskády, celkové množství kyslíku dodané do tkáň může být nedostatečné. Při nedostatečné dodávce kyslíku do alveolů nebo při snížené alveolární ventilaci dochází postupně k hypoxémii (snížená koncentrace kyslíku v krvi) a následně i k hypoxii (snížená

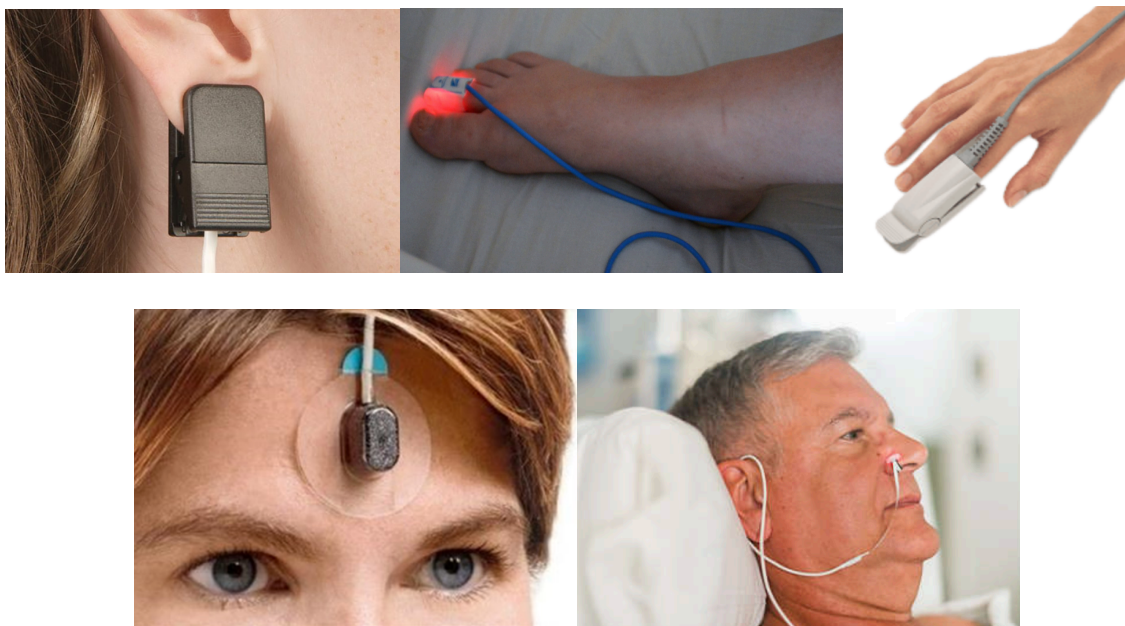
koncentrace kyslíku v tkáni). Nízká hladina kyslíku v krvi, respektive v tkáních se projeví poklesem hodnot  $SpO_2$  [16,17]. K poklesu hodnot  $SpO_2$  dochází také při pohybu ve vysokých nadmořských výškách. Koncentrace kyslíku a dalších plynů v atmosféře je konstantní, ale atmosférický tlak klesá s rostoucí nadmořskou výškou, což ukazuje obr. 2.2. Parciální tlak kyslíku na hladině moře odpovídá 21,3 kPa (21 % z 101,3 kPa). V nadmořské výšce 5500 m je tlak kyslíku poloviční a odpovídá tedy 10,6 kPa. Takové změny tlaku nejsou v České republice možné, ale pro cestovatele a horolezce mohou být z hlediska zdraví a bezpečnosti zásadní.



**Obr. 2.2:** Závislost parciálního tlaku kyslíku na nadmořské výšce.

## 2.1 Vhodná místa pro měření $SpO_2$

Snímání hodnot periferní saturace hemoglobinu kyslíkem je možné na více místech po celém těle, která jsou zobrazena na obr. 2.3 a vhodnost výběru záleží především na stavu pacienta. V závislosti na místě měření se senzory liší i principem, na kterém fungují. Snímání hodnot  $SpO_2$  na čele je založené na odrazu červeného a infračerveného světla tkání, na ostatních místech je obvykle využíváno průchodu červeného a infračerveného světla tkání. Existuje mnoho studií, které se problematikou vhodného místa pro měření  $SpO_2$  zabývají [18–23], a jejich výsledky se často rozcházejí a navzájem si odporují. Autoři Yönt a kol. [18] a Blaylock a kol. [19] se domnívají, že nejvhodnějším místem pro měření  $SpO_2$  je čelo z hlediska síly signálu i z hlediska hodnot při porovnání s analýzou krevních plynů (ABG). Studie Bilan a kol. [20] uvádí, že pulzní oxymetrie je nepřesnější na ušních lalůčkách ve srovnání s pulzní oximetrií na prstech rukou i nohou při detekci hypoxémie u dětí. Ke stejnému výsledku došla i studie Seifi a kol. [21], která porovnávala senzory na prstech, čele a uších pacientů se srdečními problémy na jednotce intenzivní péče. Určením nejvhodnějšího místa pro měření  $SpO_2$  při nízké perfuzi se zabývala studie Clayton a kol. [22]. Nejlépe se chovaly prstové senzory, po nich následovaly ušní a nejhůře se chovaly senzory na čele a nose. Studie Hinkelbein a kol. [23] porovnávala ušní senzory se senzory na prstech rukou a nohou u kriticky nemocných pacientů. Na základě měření doporučují jako nejvhodnější místo pro měření prsty rukou. Hodnoty z ušních senzorů mají nižší přesnost, avšak ne klinicky významnou.



Obr. 2.3: Senzory  $SpO_2$  na různých částech těla [24–28].

## 2.2 Vlivy na přesnost prstové pulzní oxymetrie

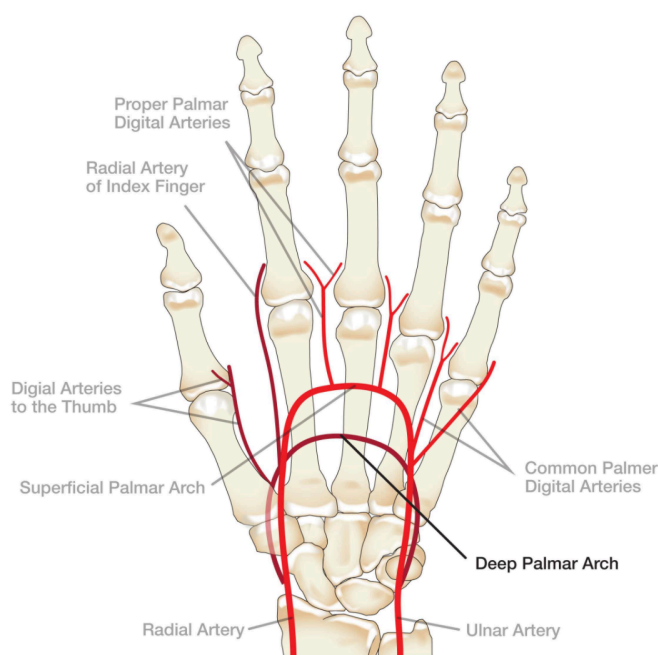
Dle normy ČSN ISO 80601-2-61 musí být přesnost přístroje pro pulzní oxymetrii v rozsahu od 70 % do 100 %  $SaO_2$  lepší nebo rovnající se kvadratické odchylce 4,0. Rozsahy  $SpO_2$  a přesnost  $SpO_2$  v těchto rozsazích musí být uvedeny v návodu k použití. Snímané hodnoty  $SpO_2$  musí být zobrazovány jako funkční saturace hemoglobinu kyslíkem [29].

Přesnost pulzních oxymetrů může být snížena mnoha vlivy. Nejčastějšími vlivy jsou nesprávné nasazení senzoru, vlhkost snímače či nesprávný typ senzoru. Snížení přesnosti dále může být ovlivněno umělými či lakovanými nehty [30,31], pigmentem [32,33], osvětlením a pohybovými artefakty [34]. Dle návodu k použití pro pulzní oxymetr Radical 7 (Masimo Corporation, Irvine, CA) může ovlivnit přesnost i zvýšená hladina karboxyhemoglobinu nebo methemoglobinu, přítomnost intravaskulárních barviv, zvýšená hladina bilirubinu, závažná anémie a žilní pulzace [35]. Aby byly tyto vlivy minimalizovány, je nutné se řídit návody k použití od výrobců a provádět tak vhodná opatření pro omezení jakýchkoli nepřesností.

Problémy s přesností i se silou signálu mohou nastat i při nízkém perfuzním indexu [7–9]. Ve studii Leuenberger a kol. [36] bylo zjištěno, že hypoxie při spontánním dýchání způsobuje vazodilataci cév a vazokonstrikce se objeví při apnoei. Oxid uhličitý v dýchané směsi má opačný efekt než kyslík. Hyperkapnie má za následek vazodilataci mozkových arterií a zvýšení průtoku krve cévami [36]. Silný vazodilatační účinek  $CO_2$  je prokázán zjištěním, že u lidí způsobuje inhalace 5 %  $CO_2$  v dýchané směsi s 21 % kyslíku a doplněné dusíkem zvýšení průtoku krve mozkem o 50 % a inhalace 7 %  $CO_2$  v dýchané směsi způsobuje 100% zvýšení průtoku krve mozkem [37]. Na základě tohoto zjištění by bylo vhodné zjistit, zda se projeví růst perfuzního indexu na senzorech  $SpO_2$  při dýchání hypoxické směsi a také zjistit, zda má vliv hyperkapnie na perfuzní index.

## 2.3 Cévní zásobení prstů

Zdrojem kyslíku pro prsty rukou jsou loketní a vřetenní tepny, jak je zobrazeno na obr. 2.4. Vřetenní tepna tvoří *deep palmar arch* (*arcus palmaris profundus*), který je zdrojem kyslíku zejména pro palec a ukazovák. Obvykle je propojena se *superficial palmar arch* (*arcus palmaris superficialis*), který je pokračováním loketní tepny. Z této cévy se oddělují důležité větve se zdrojem okysličené krve pro prsty, které jsou zvané *common digital arteries* (*arteriae digitales palmares communes*), což jsou malé cévy, které se obvykle ještě dále dělí a zásobují dva různé prsty. Každý prst má tedy dvě tepénky, které vedou podél opačných stran prstů [38]. Loketní tepna dominuje na ukazováku a prostředníku a vřetenní tepna má téměř vždy větší dominanci na prsteníku a malíku [39]. Ve studii Mizukoshi a kol. [4] je uváděna dominance loketní tepny na ukazováku. Prostředník je stejnoměrně cévně zásoben z loketní a vřetenní tepny podle studie Besaranoğlu a kol. [5].



Obr. 2.4: Cévní zásobení prstů ruky [36].

## 2.4 Porovnání hodnot $SpO_2$ mezi jednotlivými prsty

V současné literatuře není jednoznačný závěr, který prst by mohl poskytnout nejspolehlivější záznam  $SpO_2$ . Většina pulzních oxymetrů nemá v návodu k použití uvedený konkrétní prst pro měření saturace krve kyslíkem, pouze dochází k uvedení minimální a maximální tloušťky prstu, na který lze senzor ve formě klipu použít. V návodu k prstovému senzoru Nonin 8000  $SpO_2$  soft sensor (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA) pro pulzní oxymetrii doporučují měření na ukazováku, prostředníku či prsteníku [2], což potvrzuje i studie LaPier a kol [1]. Studie Mizukoshi a kol. [4] doporučuje měření na prostředníku vzhledem k nejvyššímu perfuznímu indexu. Nejvyšší měřené hodnoty  $SpO_2$  byly ve studii Besaranoğlu a kol. [5] na pravém palci a prostředníku, a proto tyto dva prsty doporučují pro měření. Podle výukového portálu Respiratory Therapy Zone [3] je pro měření doporučený pravý prostředníček. Dle návodu k použití pro přístroj Radical 7 (Masimo Corporation, Irvine, CA, USA) [31] by měl být pro měření zvolen nedominantní prsteník nebo prostředník.

Ve studii LaPier a kol. [1] byly porovnávány tři pulzní oxymetry Crucial CMS50DL (AccuMed, Houston, USA), MD 300C12 (ChoiceMMed, Beijing, China) a Onyx Vantage (Nonin, Minnesota, USA) na všech pěti prstech jedné ruky z hlediska naměřených hodnot. Také byly porovnány naměřené hodnoty  $SpO_2$  mezi jednotlivými prsty. Studie proběhla na 32 zdravých lidech ve věku 21 až 75 let. Měření probíhalo po 10minutové ustalovací fázi a snímání hodnoty  $SpO_2$  proběhlo vždy 30 sekund po umístění senzoru. Nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl mezi jednotlivými prsty z hlediska naměřeného  $SpO_2$ . Odečítání hodnot  $SpO_2$  na palci a malíku bylo neproblematičtější, a proto doporučují měření na ostatních třech prstech. Při porovnávání přístrojů mezi sebou byly zjištěny rozdíly do 2,2 %  $SpO_2$ , což je ve studii považováno za klinicky nevýznamné.

Cílem studie Mizukoshiho a kol. [4] bylo zjistit, jaký prst je nejvíce odolný k hypoperfuzi a tedy je nejvhodnější k měření pulzní oxymetrií. Pro studii bylo vybráno 20 zdravých dobrovolníků, na kterých probíhalo měření v supinační poloze. Na každý prst byl nasazen pulzní oxymetr ve stejný okamžik. Měření  $SpO_2$  a perfuzního indexu probíhalo pomocí monitoru Radical (Masimo Corporation, Irvine, CA). Hypoperfuze byla způsobena zaškrcením arteriální tepny v předloktí pomocí manžety. Hodnoty perfuzního indexu byly statisticky rozdílné pro jednotlivé prsty ve skupině hypoperfuzní i kontrolní. Prostředníček měl nejvyšší hodnotu perfuzního indexu v obou skupinách. Měření hodnot  $SpO_2$  nebyly zjištěny žádné statistické rozdíly mezi jednotlivými prsty. Měření však probíhala pouze za fyziologických hodnot  $SpO_2$  mezi 94–99 %.

Porovnáváním naměřených hodnot  $SpO_2$  mezi jednotlivými prsty se zabývala také studie Basaranogla a kol. [5]. Pro studii bylo vybráno 37 zdravých jedinců, z toho bylo 35 praváků a 2 leváci. Měření probíhalo v sedě na lačno po 5minutové ustalovací fázi pro všechny za stejných okolních podmínek a pomocí jednoho monitoru vitálních funkcí (GE B30, Freiberg, Germany). Odečtení hodnot proběhlo vždy minimálně po jedné minutě snímání. Průměrné hodnoty  $SpO_2$  jednotlivých prstů byly seřazeny od nejvyššího po nejnižší:  $R3 > R1 > R2 > R4 > L4 > L1 > L5 > R5 > L2 > L3$  (R značí pravou ruku, L označuje levou ruku, čísla od 1 do 5 označují prsty ruky v pořadí od palce po malík). Nejvyšší průměrná hodnota  $SpO_2$  byla naměřena na prostředníčku pravé ruky ( $98,2 \% \pm 1,2$ ), což byla také statisticky významně vyšší hodnota při porovnání s pravým malíkem a levým prostředníčkem. Podle výsledků naměřených u 35 dobrovolníků s dominantní pravou rukou měl pravý prostředníček nejvyšší průměrnou hodnotu  $SpO_2$ , zatímco u dvou dobrovolníků s dominancí levé ruky měl nejvyšší hodnotu  $SpO_2$  levý prostředníček. Autoři se domnívají, že vysvětlením pro nejvyšší naměřené hodnoty  $SpO_2$  na pravém prostředníčku je cévní zásobením ze dvou tepen a také dominance pravé ruky nad levou. Autorům není jasné, proč levý prostředníček má celkově průměrnou hodnotu  $SpO_2$  nejnižší. Měření na jednotlivých prstech daného dobrovolníka neprobíhalo současně.

Studie Juliana a kol. [6] měla za cíl určit nejvhodnější místo pro měření saturace hemoglobinu kyslíkem použitím pulzního oxymetru. Studie se zúčastnilo 23 zdravých dobrovolníků ve věku mezi 20 a 40 lety. Změřené jednotlivé hodnoty  $SpO_2$  na všech prstech obou rukou a na ušním laloku jsou uvedeny v tabulce 2.1:

**Tabulka 2.1:** Průměrné hodnoty  $SpO_2$  (%) měřené pulzním oxymetrem na různých místech těla. Výsledky jsou prezentovány jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka. Převzato a upraveno dle [6].

Místo měření	Hodnota $SpO_2$ (%)
Ucho	98,6 $\pm$ 1,3
Pravý palec (R1)	96,9 $\pm$ 2,1
Pravý ukazovák (R2)	96,8 $\pm$ 2,0
Pravý prostředník (R3)	97,3 $\pm$ 2,0
Pravý prsteník (R4)	97,3 $\pm$ 1,9
Pravý malík (R5)	96,7 $\pm$ 2,2
Levý palec (L1)	97,0 $\pm$ 1,9
Levý ukazovák (L2)	96,8 $\pm$ 1,7
Levý prostředník (L3)	96,9 $\pm$ 1,6
Levý prsteník (L4)	97,1 $\pm$ 1,6
Levý malík (L5)	96,6 $\pm$ 1,5

Průměrné hodnoty  $SpO_2$  ze všech míst snímání byly seřazeny od nejvyšší po nejnižší: Ucho > R4 > R3 > L4 > L1 > R1 > L3 > R2 > L2 > R5 > L5. Nejvyšší hodnoty  $SpO_2$  byly naměřeny na ušním laloku a dále pak na pravém prsteníku a prostředníku. Hodnoty  $SpO_2$  naměřené na prstech nebyly mezi sebou statisticky významně rozdílné. Měření však probíhalo pouze za fyziologických hodnot  $SpO_2$  mezi 96–99 %.

Ve všech studiích, které se doposud zabývaly porovnáváním hodnot  $SpO_2$  mezi jednotlivými prsty, probíhala měření pouze za fyziologických hodnot  $SpO_2$  a zároveň hodnoty z jednotlivých prstů nebyly snímány simultánně a identickými přístroji na obou rukou. Podle dostupné literatury nebyla provedena studie, která by porovnávala hodnoty periferní saturace hemoglobinu kyslíkem mezi jednotlivými prsty při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii.

### 3 Cíle práce

Cílem této práce bylo experimentálně stanovit vliv volby prstu pro umístění senzoru pulzního oxymetru na výsledky měření periferní saturace krve kyslíkem ( $SpO_2$ ) u zdravého člověka při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii. Záměrem studie bylo tedy zjistit, zda při umístění prstového senzoru na kterýkoli prst obou rukou budou měřeny v průběhu celého experimentu stejné hodnoty  $SpO_2$ . Dalším cílem práce bylo zjistit vliv krátkodobé hypoxie a hyperkapnie na perfuzní index a vliv perfuzního indexu na měřené hodnoty  $SpO_2$ .

Dalšími dílčími cíli bylo ověření senzorů pulzních oxymetrů z hlediska měřených hodnot  $SpO_2$  a porovnání hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu mezi sebou z hlediska  $SpO_2$ ,  $PI$  a dalších fyziologických funkcí.



## 4 Metody

Tato prospektivní intervenční randomizovaná jednou zaslepená studie se zkříženým designem probíhala na zdravých dobrovolnících na Fakultě biomedicínského inženýrství v Kladně v laboratoři speciálních přístrojů pro ARO a JIP (A-108). Studie byla schválena etickou komisí na Fakultě biomedicínského inženýrství Českého vysokého učení technického v Praze dne 4. 11. 2020 pod číslem C15/2020. Syllabus výzkumného projektu, vyjádření souhlasu etické komise a protokol měření jsou dostupné v příloze A, B a C. Informovaný souhlas (Příloha D) s kartou probanda (Příloha E) byly vyplněny a podepsány dobrovolníkem před zahájením experimentu. Tento experiment byl také registrován v databázi klinických studií (ClinicalTrials.gov) pod číslem NCT04771663.

### 4.1 Demografická charakteristika skupiny

Experimentu se zúčastnilo 24 dobrovolníků (19 mužů a 5 žen) ve věku  $24 \pm 2$  let. Všichni dobrovolníci dokončili protokol měření a byli zařazeni k statistickému vyhodnocení. Detailní demografické charakteristiky jsou uvedeny v tabulce č. 4.1.

**Tabulka 4.1:** Demografická charakteristika skupiny dobrovolníků zařazených do studie.

Parametry	Dobrovolníci
Věk (roky)	$24 \pm 2$ (20–28)
Hmotnost (kg)	$77 \pm 11$ (58–100)
Výška (cm)	$181 \pm 8$ (165–197)
Body mass index ( $\text{kg m}^{-2}$ )	$24 \pm 2$ (19–29)
Střední tlak (mmHg)	$90 \pm 10$ (70–114)

Hodnoty jsou uváděné jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka a rozsah (minimum–maximum). BMI—Body Mass Index

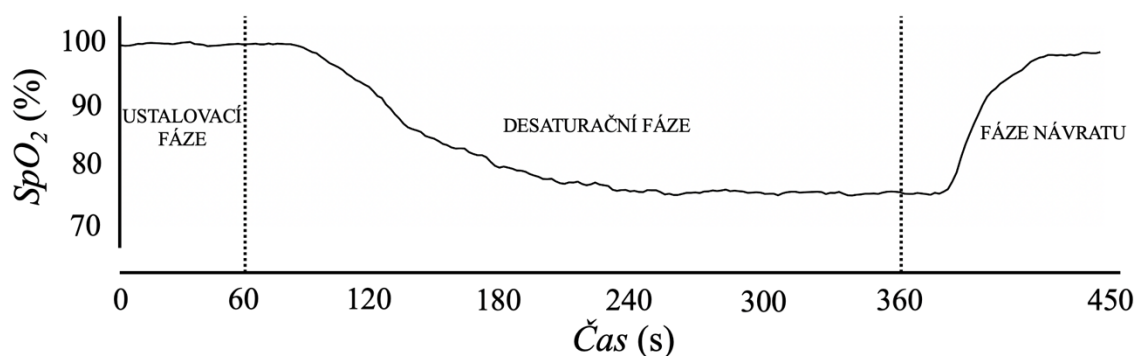
Každý dobrovolník po příchodu na experimentální pracoviště podstoupil vstupní vyšetření (změření tepové frekvence, neinvazní měření tlaku, změření rozměrů prstů) a vyplnil dotazník o jeho zdravotním stavu (zdravotní obtíže, zranění, četnost sportovních aktivit, kuřácká historie). Měření tlaku bylo provedeno přístrojem OMRON HEM-907 (OMRON, Japan). Žádný z dobrovolníků nebyl z experimentu vyloučen z důvodu nemoci respirační soustavy, těhotenství či jiných důvodů uvedených v informovaném souhlase.

### 4.2 Protokol měření

Každé měření na dobrovolníkovi bylo rozděleno na dvě části v náhodném pořadí (hypoxická část a hypoxicko-hyperkapnická část), které od sebe byly odděleny minimálně 2hodinovou pauzou. Jednotlivé části měření se lišily obsahem směsí plynů, které dobrovolníci vdechovali. Obě směsi obsahovaly shodné množství kyslíku (12 %), směs hypoxicko-hyperkapnická byla navíc doplněna pěti procenty oxidu uhličitého, zbytek obsahu směsí byl tvořen dusíkem. V každé části měření byl dobrovolník v poloze v sedě a ruce měl položené volně na stole před ním jako ve studii Besaranoğlu a kol. [5]. Před začátkem každé části experimentu byly připojeny senzory jednotlivých pulzních

oxymetrů k prstům obou rukou. Na levé ruce měli dobrovolníci nasazené senzory pulzních oxymetrů Masimo (Masimo Corporation, Irvine, CA) a na pravé ruce senzory multikanálového monitoru oxygenace Nonin SenSmart Model X-100 (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA). Na čelo byl nasazen senzor  $rSO_2$  (regionální saturace krve kyslíkem) multikanálového monitoru oxygenace Nonin SenSmart Model X-100 (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA).

Na začátku obou částí měření dobrovolník podstoupil jednodominutovou ustalovací fázi, při které dohlížející lékař kontroloval jeho vitální funkce. Pro snížení měřeného  $SpO_2$  dobrovolníci vdechovali předpřipravenou hypoxickou směs nebo směs hypoxicko-hyperkapnickou podle části měření. Dobrovolník vdechoval předpřipravenou dýchací směs po dobu pěti minut. Následně bylo vdechování hypoxické či hypoxicko-hyperkapnické směsi ukončeno a dobrovolník vdechoval okolní vzduch. Vitální parametry dobrovolníka byly monitorovány až do návratu měřených hodnot do výchozích hodnot. Na obr. 4.1 jsou znázorněny jednotlivé fáze měření na průběhu  $SpO_2$  v závislosti na čase. Přerušované čáry na obr. 4.1 značí fáze přechodu. V případě, že  $SpO_2$  v průběhu desaturační fáze pokleslo pod 75 %, experiment byl ukončen.



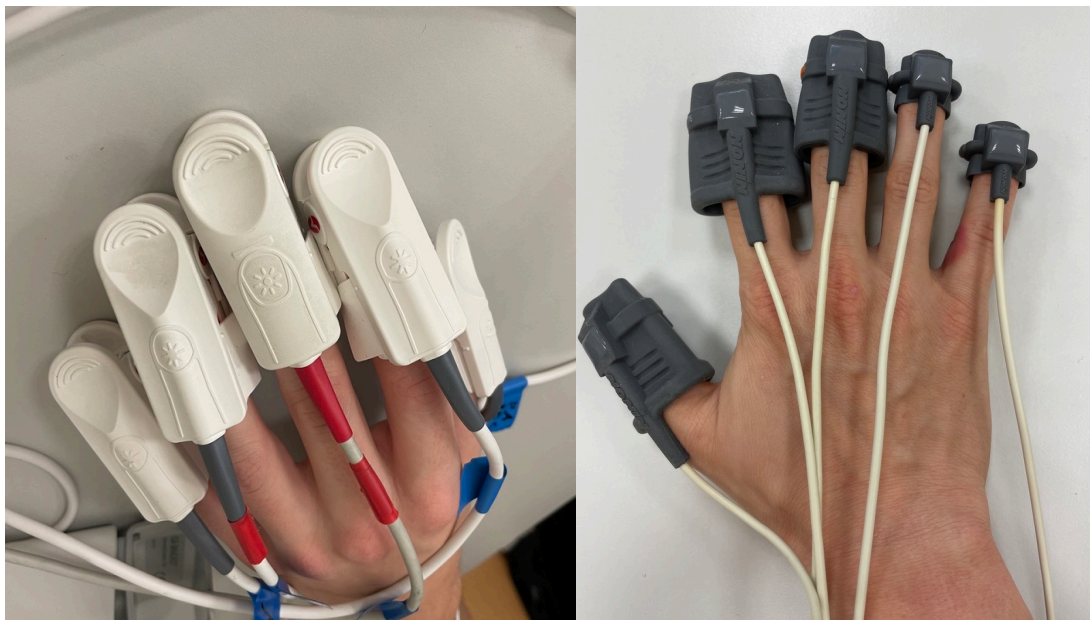
Obr. 4.1: Typický průběh experimentu znázorněný na poklesu  $SpO_2$ .

### 4.3 Záznam dat

V průběhu obou částí experimentu bylo kontinuálně prováděno neinvazivní měření  $SpO_2$  na jednotlivých prstech obou rukou dobrovolníka, jak je zobrazeno na obr. 4.2. Dále byly sledovány tyto parametry:  $HR$  (srdeční frekvence),  $PI$  (perfuzní index),  $rSO_2$  (regionální saturace krve kyslíkem),  $FiO_2$  (inspirovaná frakce kyslíku),  $FeO_2$  (exspirovaná frakce kyslíku),  $EtCO_2$  (koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu),  $FiCO_2$  (inspirovaná frakce oxidu uhličitého),  $RR$  (dechová frekvence),  $TV$  (dechový objem) a  $MV$  (minutová ventilace).

K záznamu parametrů  $SpO_2$ ,  $PI$  a  $HR$  na levé ruce bylo využito přístrojů Root (Masimo Corporation, Irvine, CA) a jednoho přístroje Radical-7 (Masimo Corporation, Irvine, CA) na malíku. K záznamu  $SpO_2$  všech prstů na pravé ruce bylo využito 6kanálového přístroje SenSmart Model X-100 (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA), ze kterého je možné nahrávat  $SpO_2$  a  $rSO_2$  simultánně. Během experimentu bylo současně monitorováno  $rSO_2$  čela dobrovolníka pomocí nalepovacího senzoru přístrojem SenSmart Model X-100 (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA). Analýza respiračních plynů a respirační parametry ( $FiO_2$ ,  $FeO_2$ ,  $FiCO_2$ ,  $EtCO_2$ ,  $RR$ ,  $TV$ ,  $MV$ ) byly zaznamenávány monitorem vitálních funkcí Datex S/5 (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA) vložení spirometrické sondy D-Lite do patientského okruhu.

Po celou dobu experimentu probíhal kamerový záznam dobrovolníka, všech přístrojů a celého experimentálního pracoviště (obr. 4.3), který sloužil jako záloha k zaznamenaným datům a protokolům měření. Synchronizace přístrojů byla zajištěna nastavením stejného času přístrojů a následná kontrola synchronizace byla provedena skrze tepovou frekvenci a kamerové záznamy.



Obr. 4.2: Prstové senzory přístrojů Masimo (vlevo) a přístroje Nonin (vpravo).



Obr. 4.3: Experimentální pracoviště s využívanými přístroji Root, Radical 7, SenSmart Model X-100 a Datex Ohmeda S/5.

### 4.3.1 Prstové senzory $SpO_2$

Pro správné naměření hodnot a následné interpretování výsledků bylo nutné znát udávané technické specifikace měřených parametrů výrobcem. Z návodu k použití byly získány technické specifikace měření parametru  $SpO_2$ , které jsou uvedeny v tabulce 4.2.

**Tabulka 4.2:** Specifikace měřených parametrů jednotlivých přístrojů použitých v experimentu k měření  $SpO_2$ .

Parametr	Přístroj	Rozsah měření (%)	Přesnost v intervalu 70–100 % (běžné podmínky – dospělý) (%)	Rozlišení (%)	Interval měření (s)
$SpO_2$	Root	0–100	±2	1	2
$SpO_2$	Radical 7	0–100	±2	1	2
$SpO_2$	SenSmart X-100	0–100	±2	1	1,8

U prstových senzorů pulzních oxymetrů je předepsána velikost prstu pro danou velikost senzoru. U přístrojů Root a Radical 7 bylo využito senzorů určených pro dospělou populaci. U přístroje SenSmart Model X-100 byly vybrány nejvhodnější velikosti senzorů podle velikosti prstů na základě tabulky 4.3. Doporučení velikosti snímače jsou založena na výšce a tloušťce prstu.

**Tabulka 4.3:** Velikost senzoru podle rozměrů prstu přístroje SenSmart Model X-100.

Model	Vhodné rozměry prstů (mm)
Model 8100SL (velký)	12,5 – 25,5
Model 8100SM (střední)	10,0 – 19,0
Model 8100SS (malý)	7,5 – 12,5

Každému dobrovolníkovi byly změřeny rozměry (výška, šířka) jednotlivých prstů. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.4.

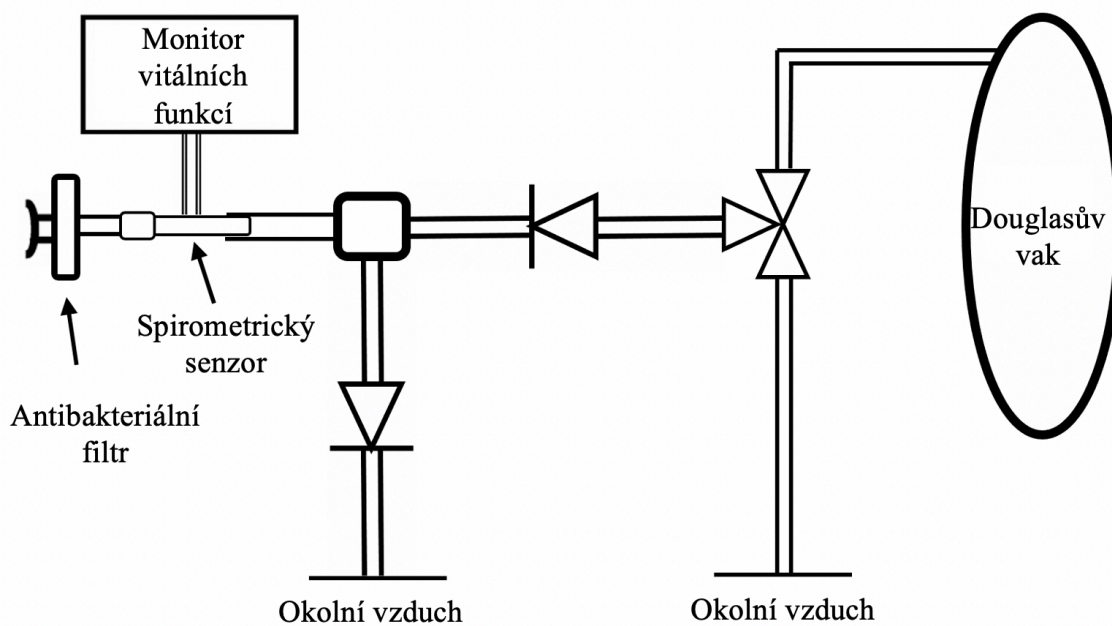
**Tabulka 4.4:** Průměrné rozměry prstů dobrovolníků.

	Palec (mm) Senzor L	Ukazovák (mm) Senzor L	Prostředník (mm) Senzor M	Prsteník (mm) Senzor S	Malík (mm) Senzor S
<b>Šířka prstu</b>	19,2 ± 1,9 (16 – 22)	14,8 ± 2,2 (10 – 19)	14,7 ± 2,0 (10 – 19)	13,9 ± 1,8 (10 – 17)	12,2 ± 1,9 (9 – 16)
<b>Výška prstu</b>	12,4 ± 2,9 (9 – 18)	10,3 ± 2,4 (8 – 18)	11,0 ± 2,4 (8 – 15)	10,5 ± 2,3 (8 – 14)	9,4 ± 2,2 (7 – 14)

Hodnoty jsou uváděné jako průměr ± směrodatná odchylka a rozsah (minimum–maximum).

## 4.4 Dýchací okruh

Aparatura umožňující inhalaci předpřipravené směsi plynů byla složena z dýchacího okruhu a vaku obsahující dýchanou směs plynů. Dýchací okruh byl sestaven ze dvou jednosměrných ventilů, které umožňovaly nadechovat směs plynů z vaku a vydechovat směs do okolí (obr. 4.4). Dýchací okruh byl dále vybaven spirometrickým senzorem D-lite (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA), pomocí kterého byly zaznamenávány parametry  $FiO_2$ ,  $FeO_2$ ,  $EtCO_2$ ,  $FiCO_2$ ,  $RR$ ,  $TV$  a  $MV$ , a jednorázovým antibakteriálním filtrem, který měl předepsanou účinnost záchytu 99,999 %.



Obr. 4.4: Dýchací okruh s jednosměrnými ventily.

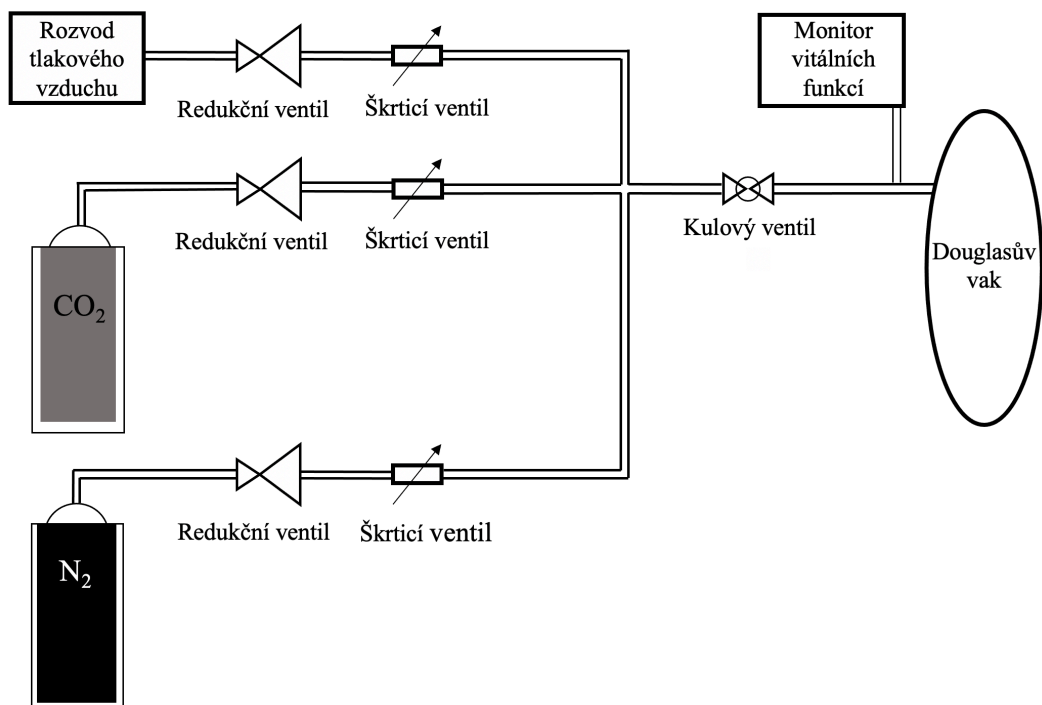
## 4.5 Dýchací směs

Pro realizaci experimentu bylo využito dvou různých směsí plynů. Hypoxická směs byla složena z dusíku (88 %) a kyslíku (12 %). Složení směsi bylo zvoleno na základě pilotního experimentu tak, aby došlo k poklesu hodnot  $SpO_2$ , ale aby pokles standardně nepřesáhl 75 %, což byla hranice pro ukončení experimentu. Tato směs byla vytvořena obohacením vzduchu dusíkem pomocí sady zobrazené na obr. 4.5. Směs hypoxicko-hyperkapnická byla složena z dusíku (83 %), kyslíku (12 %) a oxidu uhličitého (5 %). Zvolení této směsi vychází ze studie Seymour a kol. [37], kde byl studován vliv průtoku krve mozkem při hyperkapnii. Směs byla vytvořena obohacením vzduchu dusíkem a oxidem uhličitým z tlakových lahví. Správné namíchání směsi bylo zajištěno pomocí redukčních ventilů a škrticích ventilů, kde kontrola tlaku byla prováděna manometry (obr. 4.6) a kontrola složení dýchací směsi byla prováděna monitorem vitálních funkcí Datex S/5 (Datex-Ohmeda, Madison, WI, USA). Ověřené složení plynů v dané směsi bylo následně napuštěno do vaku, ve kterém byla směs uchována. Kompletní složení jednotlivých směsí je uvedeno v tabulce 4.5.

Tabulka 4.5: Složení jednotlivých směsí plynů.

Směs	Dusík (%)	Kyslík (%)	Oxid uhličitý (%)
Hypoxická	88 ± 0,2	12 ± 0,2	0
Hypoxicko-Hyperkapnická	83 ± 0,4	12 ± 0,2	5 ± 0,2

Hodnoty jsou uváděné jako průměr ± směrodatná odchylka.



Obr. 4.5: Schéma směšovací aparatury.



Obr. 4.6: Kontrola tlaku přívodního vzduchu.

## 4.6 Zpracování dat a statistické vyhodnocení

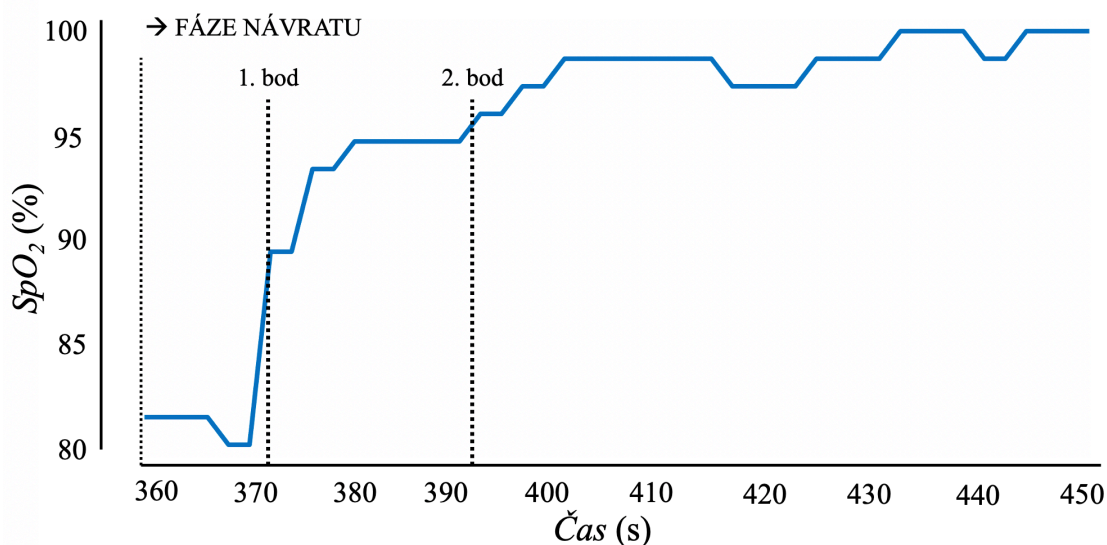
Všech 24 dobrovolníků dokončilo celý protokol měření. Ke sběru respiračních parametrů bylo využito softwaru S5 collect (Datex-Ohmeda, GE Healthcare, Chicago, USA) se vzorkovací frekvencí trendových hodnot 1 Hz (TV, MV a RR) a se vzorkovací frekvencí 25 Hz analýzy koncentrací kyslíku a oxidu uhličitého ve vdechované a vydechované směsi ( $FiO_2$ ,  $FeO_2$ ,  $EiCO_2$  a  $FiCO_2$ ). Hodnoty těchto parametrů v grafech jsou uváděné jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka.

Ke snímání hodnot ( $SpO_2$  a  $PI$ ) z levé ruky byl použit software Masimo Instrument Configuration Tool (Masimo Corporation, Irvine, CA) se vzorkovací frekvencí 0,5 Hz.

Ke snímání hodnot z pravé ruky ( $SpO_2$ ) a z čela ( $rSO_2$ ) byl využit program X-100 SenSmart (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA) se vzorkovací frekvencí 0,6 Hz a s frekvencí ukládání hodnot 0,25 Hz. Hodnoty  $rSO_2$  byly sledovány v průběhu experimentů, ale nebyly následně vyhodnocovány. Porovnání průměrných hodnot  $SpO_2$  pro jednotlivé části experimentu a použité přístroje je uvedené v grafech jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka. Graficky znázorněné měřené hodnoty  $SpO_2$  na jednotlivých prstech jsou uváděné jako diference daného prstu od průměru všech prstů na dané ruce pro daného dobrovolníka.

Hodnoty diferencí  $SpO_2$  od průměru a hodnoty perfuzních indexů jsou graficky znázorněny formou krabicových grafů, kde křížek značí průměr, horizontální čára uvnitř boxu značí medián, horizontální ohraničení boxu značí horní a dolní kvartil. Okrajové čárky značí maximum (3. kvartil + 1,5násobek mezikvartilového rozpětí) a minimum (1. kvartil - 1,5násobek mezikvartilového rozpětí). Odlehlý bod je znázorněný na grafu, pokud překročí vzdálenost 1,5násobku mezikvartilového rozpětí pod 1. kvartilem nebo 1,5násobku mezikvartilového rozpětí nad 3. kvartilem.

Měřené hodnoty  $SpO_2$  na jednotlivých prstech byly srovnávány i z hlediska dynamických vlastností, kde byly hodnoceny tři dynamické parametry. Po ukončení desaturace dochází k růstu  $SpO_2$  do původních hodnot. „1. bod“ na obrázku 4.7 značí čas, kdy došlo k nárůstu  $SpO_2$  o minimálně 20 % rozdílu maximální a minimální hodnoty  $SpO_2$  od nejnižší hodnoty  $SpO_2$  v návratové fázi. „2. bod“ značí čas, kdy došlo k nárůstu  $SpO_2$  o minimálně 80 % rozdílu maximální a minimální hodnoty  $SpO_2$  od nejnižší hodnoty  $SpO_2$  v návratové fázi. Třetím hodnoceným parametrem byl čas mezi bodem 1 a 2.



**Obr. 4.7:** Statistické zpracování dynamických vlastností měřených hodnot  $SpO_2$  na jednotlivých prstech ve fázi návratu.

Následné statistické vyhodnocení dat probíhalo v prostředí Microsoft Excel (Microsoft, USA) a MATLAB (MathWorks, MA, USA). U respiračních parametrů, tepové frekvence a při porovnávání vývoje  $SpO_2$  byly provedeny párové T-testy, kde normalita byla ověřena Lillieforsovým testem. Při porovnávání prstů z hlediska měřeného  $SpO_2$  byla použita ANOVA s Bonferroniho post-hoc testem po ověření normality Lillieforsovým testem. Při porovnávání prstů z hlediska perfuzního indexu byl proveden Kruskal-Wallisův test. Za statisticky významnou byla považována hodnota  $p < 0,05$ .

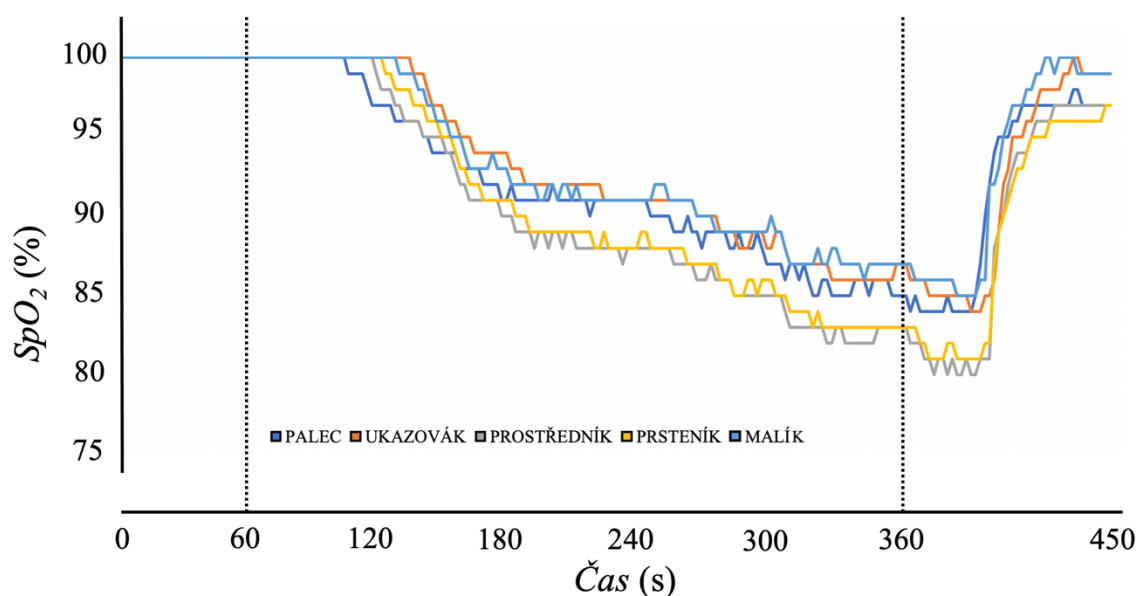
## 5 Výsledky

Všech 24 dobrovolníků dokončilo celý protokol měření a bylo zahrnuto do následného statistického zpracování dat. V kapitole 5.1 jsou nejprve zobrazené průběhy  $SpO_2$  v závislosti na čase jako porovnání mezi hypoxickou a hypoxicko-hyperkapnickou částí experimentu, v dalších podkapitolách následuje porovnání jednotlivých prstů mezi sebou na obou rukách z hlediska měřeného  $SpO_2$ , dynamické srovnání jednotlivých prstů a ověření senzorů  $SpO_2$ . Porovnání perfuzních indexů mezi jednotlivými prsty je uvedené v kapitole 5.2. Dále bylo provedeno srovnání jednotlivých částí měření z hlediska ventilačních parametrů v kapitole 5.3.

### 5.1 Periferní saturace hemoglobinu kyslíkem

V této kapitole je nejprve zobrazen jeden typický průběh  $SpO_2$  na jednotlivých prstech v závislosti na čase a následně porovnání vlivu směsí plynů jednotlivých částí experimentu na měřené hodnoty  $SpO_2$ . V následujících podkapitolách jsou porovnány jednotlivé prsty mezi sebou z hlediska měřeného  $SpO_2$  v průběhu experimentu (5.1.1 a 5.1.2) a dynamických vlastností v průběhu návratové fáze (5.1.3). Následně je provedeno i grafické srovnání měřeného  $SpO_2$  dle použitého přístroje. Podkapitola 5.1.5 je věnována ověření jednotlivých senzorů  $SpO_2$ .

Na obrázku 5.1 je zobrazen typický průběh měřeného  $SpO_2$  na jednotlivých prstech dané ruky v závislosti na čase. V ustalovací fázi je na všech prstech měřena stejná hodnota  $SpO_2$ . V desaturační fázi dochází k postupnému poklesu hodnot na všech prstech. V návratové fázi se všechny prsty vracejí do původních hodnot  $SpO_2$ .

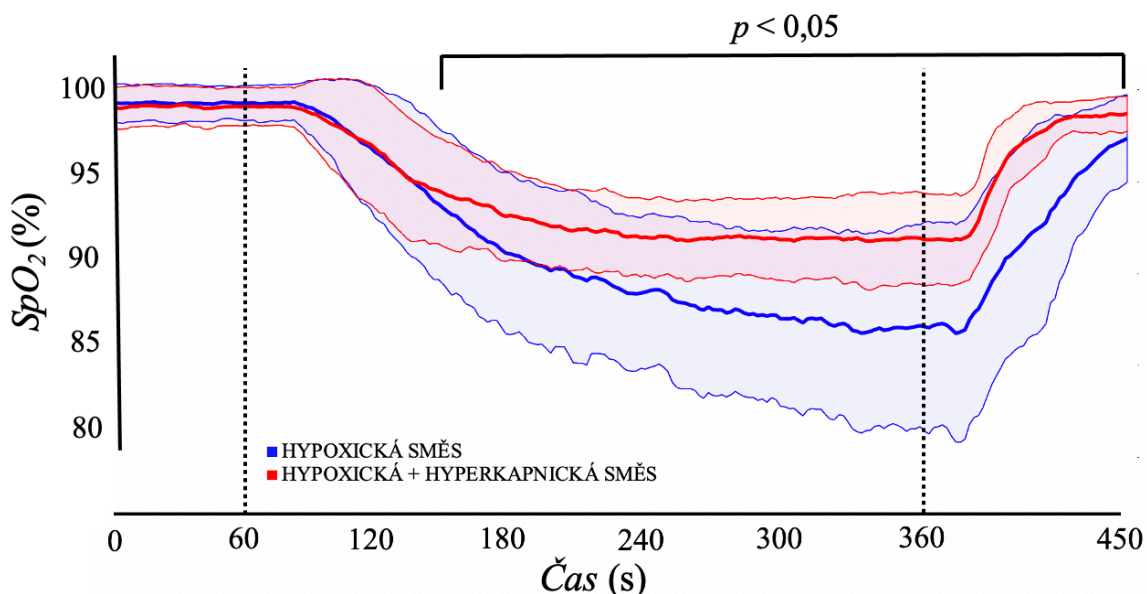


**Obr. 5.1:** Typický vývoj měřeného  $SpO_2$  na jednotlivých prstech v závislosti na čase.

Na obr. 5.2 je znázorněn vývoj  $SpO_2$  na levé ruce měřený přístroji Masimo (Masimo Corporation, Irvine, CA) při dýchání hypoxické směsi označené modře a hypoxicko-hyperkapnické směsi označené červeně. Průměrná hodnota  $SpO_2$  byla určena jako průměr hodnot  $SpO_2$  všech prstů na dané ruce a z vypočítaného průměru byl následně vypočítán průměr všech 24 dobrovolníků dané části experimentu. V ustalovací fázi se

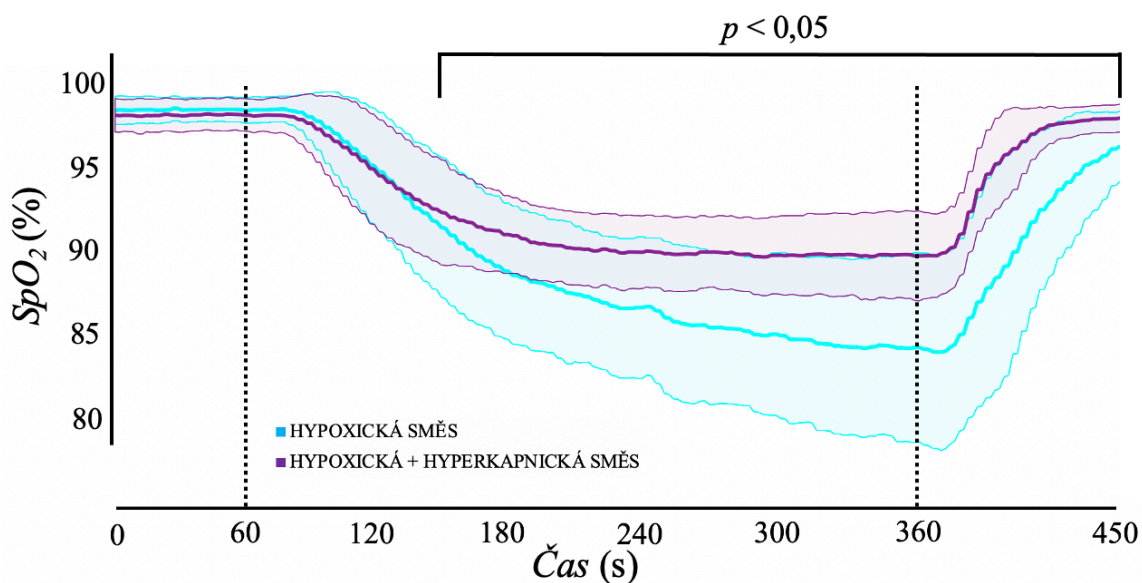


křivky překrývají, ale od 154. sekundy je statisticky významný rozdíl mezi těmito směsmi, kde maximální průměrný pokles  $SpO_2$  u hypoxicko-hyperkapnické směsi byl na 91 %, u směsi hypoxické to bylo průměrně na 86 %. Z obr. 5.2 i 5.3 je patrné, že u hypoxické směsi byl celkový pokles  $SpO_2$  větší. V ustalovací fázi se k sobě opět křivky přibližují.



**Obr. 5.2:** Porovnání vývoje průměrného  $SpO_2$  na levé ruce v závislosti na čase hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu u přístroje Masimo.

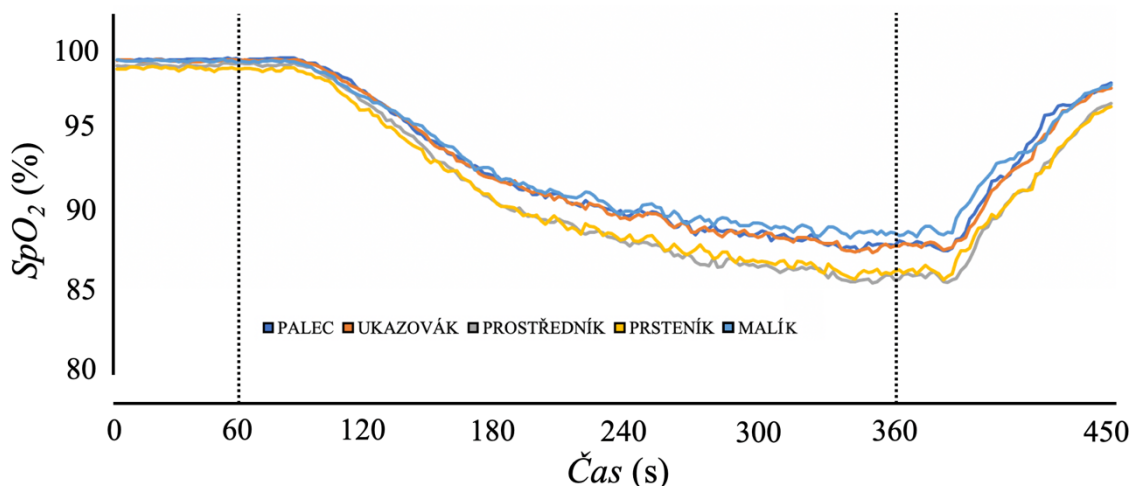
Na obr. 5.3 je znázorněn vývoj  $SpO_2$  na pravé ruce měřený přístrojem Nonin (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA) při dýchání hypoxické směsi označené světle modře a hypoxicko-hyperkapnické směsi označené fialově. V ustalovací fázi se křivky překrývají, ale od 146. sekundy je statisticky významný rozdíl mezi těmito směsmi, kde maximální průměrný pokles  $SpO_2$  byl u hypoxicko-hyperkapnické na 90 %, u směsi hypoxické to bylo průměrně na 85 %. V ustalovací fázi dochází opět k návratu do původních hodnot  $SpO_2$ .



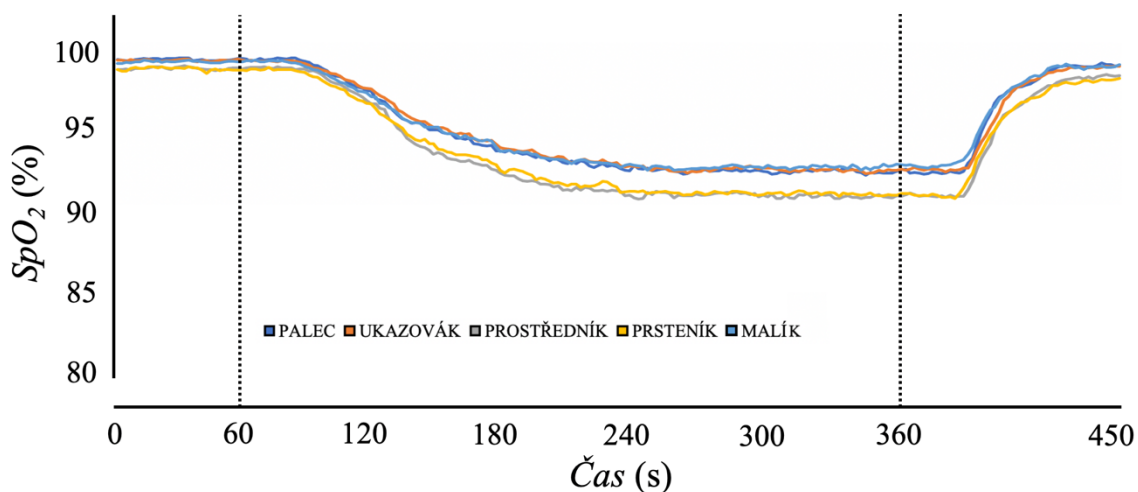
**Obr. 5.3:** Porovnání vývoje průměrného  $SpO_2$  na pravé ruce v závislosti na čase hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu u přístroje Nonin.

## 5.1.1 Levá ruka – pulzní oxymetry Masimo

Na obrázcích 5.4 a 5.5 jsou zobrazené průměrné hodnoty  $SpO_2$  jednotlivých prstů v závislosti na čase pro jednotlivé části experimentu. U hypoxické směsi (obr. 5.4) byl celkový pokles  $SpO_2$  větší než u směsi hypoxicko-hyperkapnické (obr. 5.5). U obou směsí v desaturační fázi byly hodnoty  $SpO_2$  vyšší u palce, ukazováku a malíku než u prostředníku a prsteníku. Ve fázi návratu došlo po 90 sekundách k úplnému návratu hodnot  $SpO_2$  k původním hodnotám pouze u části hypoxicko-hyperkapnické.



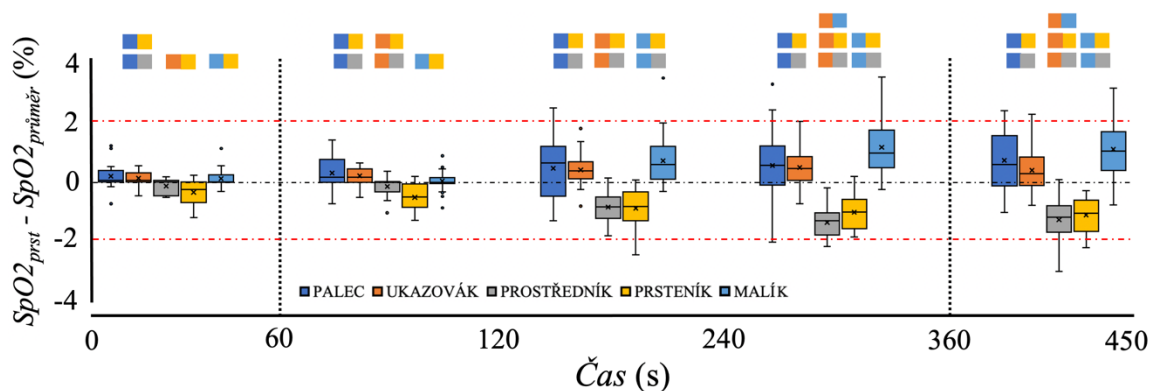
**Obr. 5.4:** Časový průběh průměrného  $SpO_2$  na jednotlivých prstech levé ruky hypoxické části experimentu.



**Obr. 5.5:** Časový průběh průměrného  $SpO_2$  na jednotlivých prstech levé ruky hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

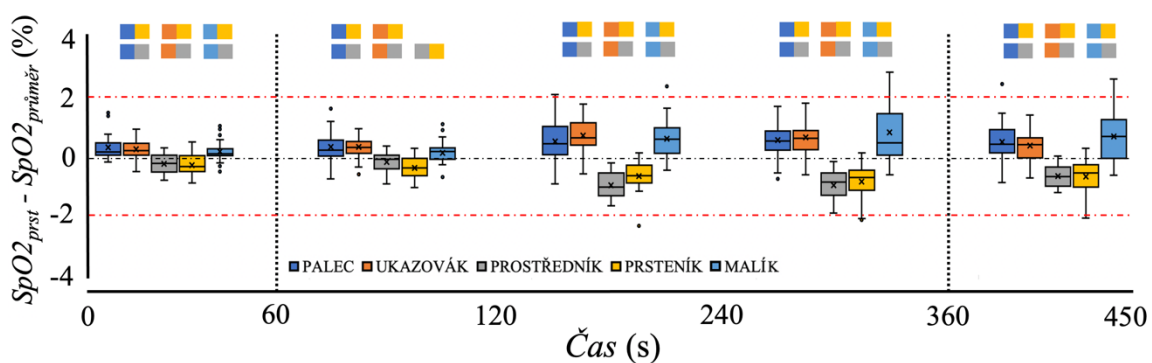
Rozdíly  $SpO_2$  jednotlivých prstů na levé ruce od průměrného  $SpO_2$  z jednotlivých úseků hypoxické části experimentu jsou zobrazeny včetně statistického zpracování na obr. 5.6, na obr. 5.7 jsou tyto rozdíly zobrazeny pro hypoxicko-hyperkapnickou část.

Palec, ukazovák a malík od ustalovací fáze vykazovaly vyšší hodnoty  $SpO_2$ , než byla průměrná hodnota  $SpO_2$ . Tento trend se v desaturační fázi zvyrazňoval. Maximální průměrný rozdíl  $SpO_2$  byl mezi malíkem a prostředníkem, který dosahoval rozdílu až 2,5 %. Horní i dolní kvartil rozdílů  $SpO_2$  všech prstů od průměru v průběhu celého experimentu byl do 2 %.



**Obr. 5.6:** Průměrné rozdíly  $SpO_2$  jednotlivých prstů od průměrného  $SpO_2$  na levé ruce z pěti úseků hypoxické části experimentu. Horizontální červené přerušované čáry značí udávanou přesnost měření  $SpO_2$  výrobcem. Horizontální černá přerušovaná čára značí průměr. Statistická významnost je označena barevnými obdélníky nad grafy. Barvy obdélníku značí statistickou významnost mezi prsty s příslušnými barvami.

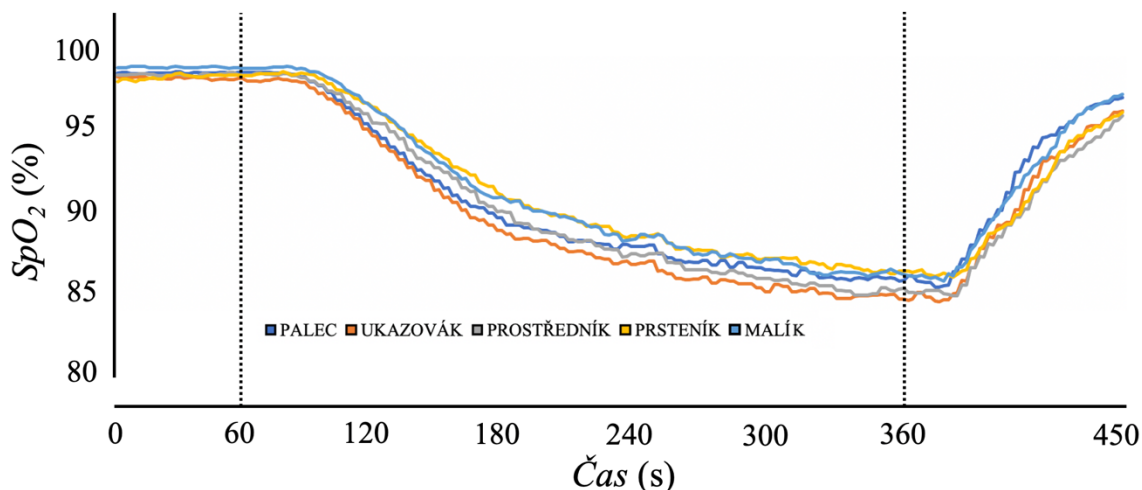
Stejný trend rozdílů  $SpO_2$  jednotlivých prstů na levé ruce od průměru byl i při hypoxicko-hyperkapnické části experimentu. Mezi palcem, ukazovákem a malíkem nebyl žádný statisticky významný rozdíl. Maximální průměrný rozdíl  $SpO_2$  byl opět mezi malíkem a prostředníkem, který dosahoval rozdílu až 2 %. Horní i dolní kvartil rozdílů  $SpO_2$  všech prstů od průměru v průběhu celého experimentu byl do 1,5 %.



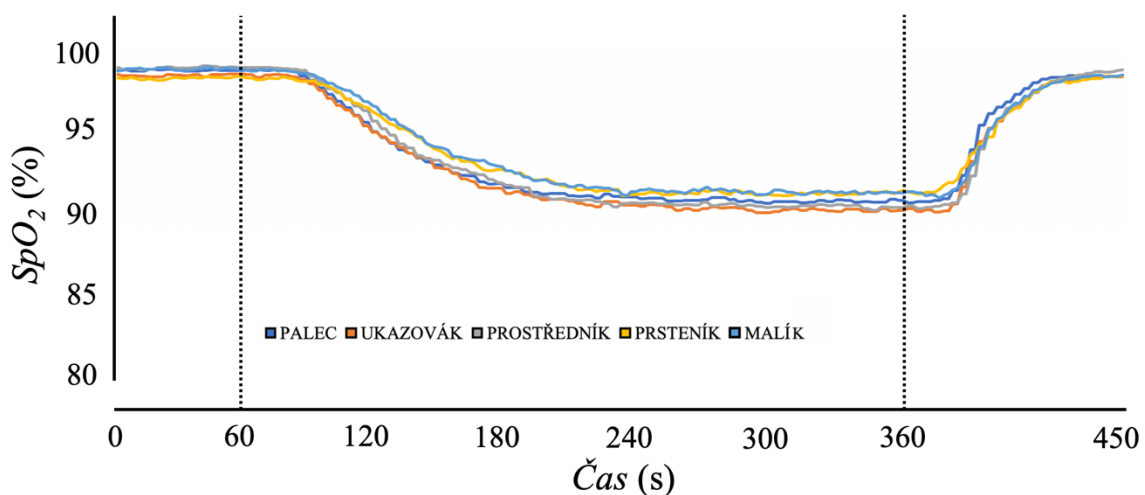
**Obr. 5.7:** Průměrné rozdíly  $SpO_2$  jednotlivých prstů od průměrného  $SpO_2$  na levé ruce z pěti úseků hypoxicko-hyperkapnické části experimentu. Horizontální červené přerušované čáry značí udávanou přesnost měření  $SpO_2$  výrobcem. Horizontální černá přerušovaná čára značí průměr. Statistická významnost je označena barevnými obdélníky nad grafy. Barvy obdélníku značí statistickou významnost mezi prsty s příslušnými barvami.

## 5.1.2 Pravá ruka – pulzní oxymetr Nonin

Následující grafy zobrazují hodnoty  $SpO_2$  naměřené 6kanálovým monitorem oxygenace Nonin (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA). Na obrázcích 5.8 a 5.9 jsou zobrazené průměrné hodnoty  $SpO_2$  jednotlivých prstů v závislosti na čase hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu. U hypoxické části byly rozdíly mezi prsty větší než u části hypoxicko-hyperkapnické. U obou částí experimentu byly nejnižší měřené průměrné hodnoty  $SpO_2$  v desaturační fázi na ukazováku.



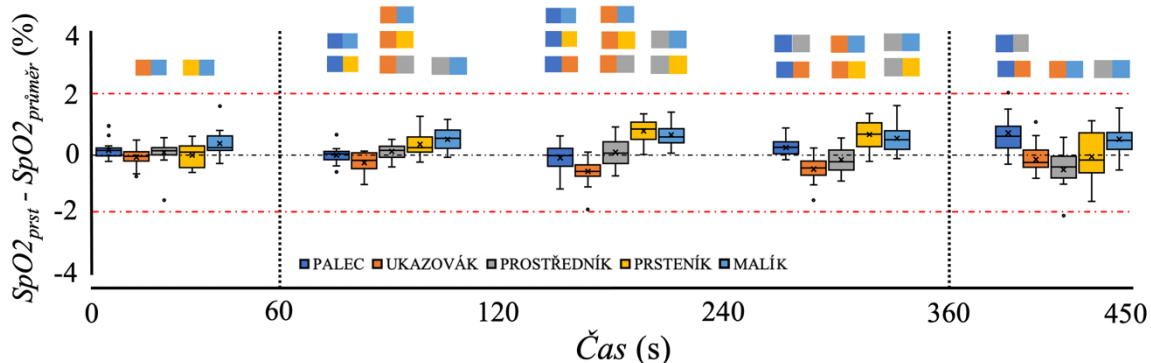
**Obr. 5.8:** Časový průběh průměrného  $SpO_2$  na jednotlivých prstech pravé ruky hypoxické části experimentu.



**Obr. 5.9:** Časový průběh průměrného  $SpO_2$  na jednotlivých prstech pravé ruky hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

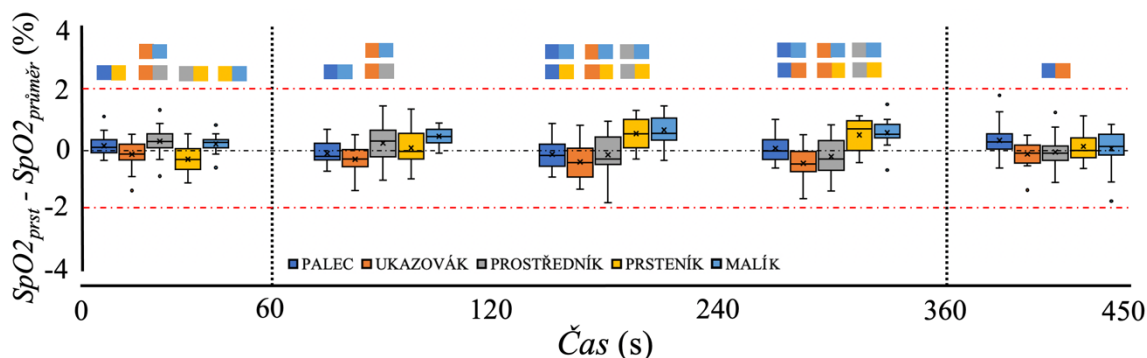
Rozdíly  $SpO_2$  jednotlivých prstů na pravé ruce od průměrného  $SpO_2$  z jednotlivých úseků hypoxické části experimentu jsou zobrazeny včetně statistického zpracování na obr. 5.10, na obr. 5.11 jsou tyto rozdíly zobrazeny pro hypoxicko-hyperkapnickou část.

Během ustalovací fáze měly všechny prsty téměř shodnou průměrnou hodnotu  $SpO_2$ . V desaturací fázi došlo ke zvýraznění rozdílů mezi prsty z hlediska měřeného  $SpO_2$ , kde prsteník a malík měly kladnou odchylku od průměrné hodnoty  $SpO_2$  a ukazovák zápornou odchylku. Maximální průměrný rozdíl  $SpO_2$  byl mezi ukazovákem a prsteníkem, který dosahoval 1 %.



**Obr. 5.10:** Průměrné rozdíly  $SpO_2$  jednotlivých prstů od průměrného  $SpO_2$  na pravé ruce z pěti úseků hypoxické části experimentu. Horizontální červené přerušované čáry značí udávanou přesnost měření  $SpO_2$  výrobcem. Horizontální černá přerušovaná čára značí průměr. Statistická významnost je označena barevnými obdélníky nad grafy. Barvy obdélníku značí statistickou významnost mezi prsty s příslušnými barvami.

Při dýchání hypoxicko-hyperkapnické směsi byl trend podobný jako u hypoxické směsi. Odchylka palce od průměrné hodnoty  $SpO_2$  celé ruky byla v celé délce experimentu nulová, prsteník a malík měly kladnou odchylku od průměru a ukazovák zápornou. Ve fázi návratu došlo ke srovnání rozdílů mezi prsty.



**Obr. 5.11:** Průměrné rozdíly  $SpO_2$  jednotlivých prstů od průměrného  $SpO_2$  na pravé ruce z pěti úseků hypoxicko-hyperkapnické části experimentu. Horizontální červené přerušované čáry značí udávanou přesnost měření  $SpO_2$  výrobcem. Horizontální černá přerušovaná čára značí průměr. Statistická významnost je označena barevnými obdélníky nad grafy. Barvy obdélníku značí statistickou významnost mezi prsty s příslušnými barvami.

### 5.1.3 Porovnání dynamických vlastností podle měřeného $SpO_2$

V této kapitole je v tabulce 5.1 znázorněno dynamické chování periferní saturace hemoglobinu kyslíkem na jednotlivých prstech při přechodu z desaturační fáze do fáze návratu hypoxické části experimentu. Byly hodnoceny tři dynamické parametry, kde způsob jejich zpracování je detailně popsán v kapitole 4.6. Nárůst o minimálně 20 % rozdílu maximální a minimální hodnoty  $SpO_2$  od nejnižší hodnoty  $SpO_2$  v návratové fázi se na levé ruce pohyboval v rozmezí 38–43 s, na pravé ruce byl nárůst rychlejší (29–39 s). Nárůst o 80 % byl na levé ruce v rozmezí 52–56 sekund a na pravé ruce 48–57 s.

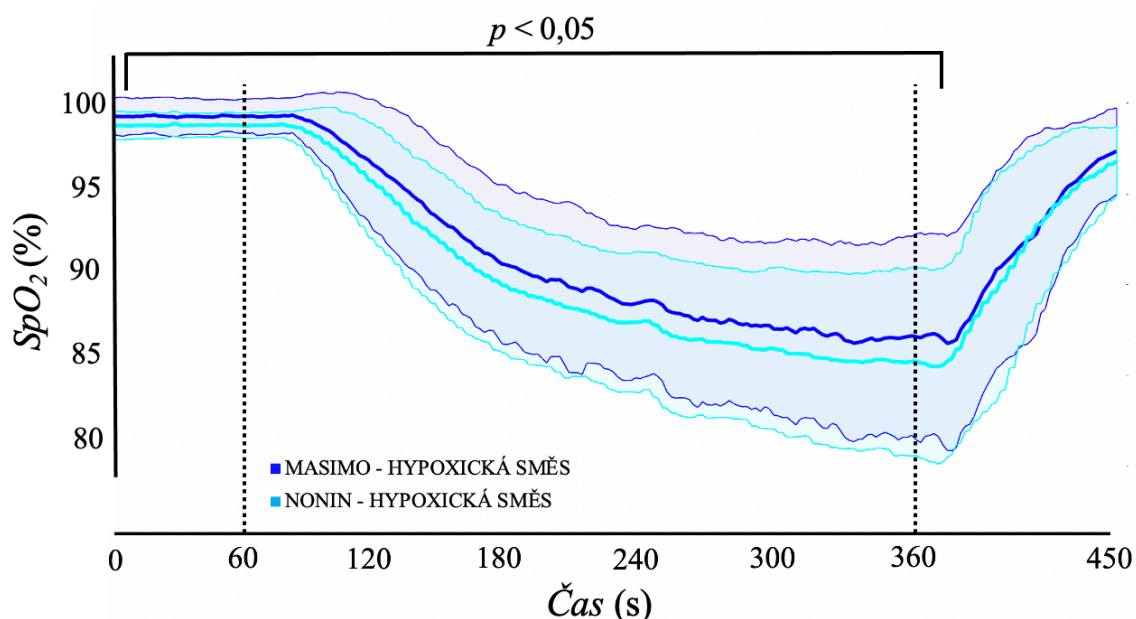
**Tabulka 5.1:** Dynamické chování  $SpO_2$  na jednotlivých prstech po přechodu z desaturační fáze do fáze návratu hypoxické části experimentu.

Přístroj	Senzor	Časový nárůst o 20 % (s)	Časový nárůst o 80 % (s)	Rozdíl času nárůstu o 20 % a o 80 % (s)
Masimo	Palec	38,4 ± 12,5	51,5 ± 15,4	13,0 ± 7,0
Masimo	Ukazovák	41,2 ± 15,6	53,8 ± 15,3	12,6 ± 7,0
Masimo	Prostředník	43,2 ± 18,2	56,2 ± 17,2	13,0 ± 6,4
Masimo	Prsteník	40,3 ± 17,0	54,2 ± 16,7	13,9 ± 6,0
Masimo	Malík	42,0 ± 18,7	51,9 ± 19,0	9,9 ± 5,8
Nonin	Palec	29,2 ± 11,9	47,6 ± 14,1	17,9 ± 6,1
Nonin	Ukazovák	33,9 ± 16,4	53,1 ± 15,4	19,2 ± 7,3
Nonin	Prostředník	39,0 ± 19,5	57,1 ± 17,8	18,1 ± 7,3
Nonin	Prsteník	27,7 ± 11,6	49,8 ± 15,8	22,2 ± 9,0
Nonin	Malík	27,3 ± 13,0	48,3 ± 15,3	20,9 ± 8,2

Hodnoty jsou uváděné jako průměr ± směrodatná odchylka. Detailní popis zpracování hodnot je popsán v kapitole 4.6.

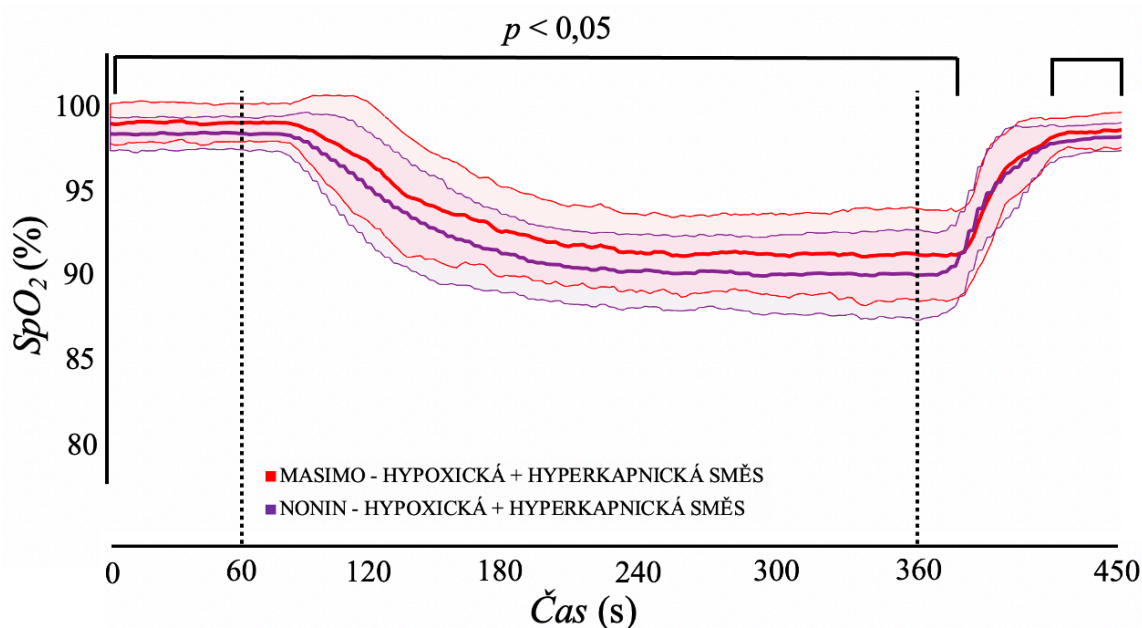
### 5.1.4 Srovnání přístrojů podle měřeného $SpO_2$

Porovnáním vývoje  $SpO_2$  mezi přístroji Masimo (levá ruka) a přístrojem Nonin (pravá ruka) u hypoxické části experimentu byl zjištěn statisticky významný rozdíl od začátku ustalovací fáze až do začátku návratové fáze, což je zobrazeno na obr. 5.12. V ustalovací fázi byl rozdíl 0,5 %  $SpO_2$ , v desaturační fázi rozdíl mezi přístroji Masimo a Nonin vzrostl k 1,5 %  $SpO_2$ . Ve fázi návratu se křivky překrývají.



**Obr. 5.12:** Porovnání vývoje průměrného  $SpO_2$  mezi přístroji Masimo (levá ruka) a přístrojem Nonin (pravá ruka) u hypoxické části experimentu.

Porovnáním vývoje  $SpO_2$  mezi přístroji Masimo (levá ruka) a přístrojem Nonin (pravá ruka) u hypoxicko-hyperkapnické části experimentu byl také zjištěn statisticky významný rozdíl od začátku ustalovací fáze, což je znázorněno na obr. 5.13. V ustalovací fázi byl rozdíl 0,5 %  $SpO_2$ , v desaturační fázi rozdíl mezi přístroji vzrostl k 1 %  $SpO_2$ . Ve fázi návratu se křivky překrývají, ale po ustálení rozdíl mezi rukami vzrostl opět k 0,5 %  $SpO_2$ .



**Obr. 5.13:** Porovnání vývoje průměrného  $SpO_2$  mezi přístroji Masimo (levá ruka) a přístrojem Nonin (pravá ruka) u hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

### 5.1.5 Ověření senzorů $SpO_2$

Používané senzory všech pulzních oxymetrů byly jednotlivě ověřeny na simulátoru ProSim 8 Vital Sign and ECG Patient Simulator (Fluke corporation, Everett, Washington, USA), zda nevykazují nějaké známky poškození či odchylky vůči ostatním sensorům. Naměřené hodnoty na simulátoru jsou uvedené v tabulce 5.2.

**Tabulka 5.2:** Ověření senzorů na simulátoru ProSim 8 Vital Sign and ECG Patient Simulator.

Přístroj	Nastavená hodnota (%)	Senzor palce (%)	Senzor ukazováku (%)	Senzor prostředníku (%)	Senzor prsteníku (%)	Senzor malíku (%)
Masimo	97	97	97	97	97	97
Masimo	90	90	90	90	90	90
Masimo	80	80	80	80	80	80
Nonin	97	98	98	98	98	98
Nonin	90	92	92	93	92	92
Nonin	80	82	83	82	83	82

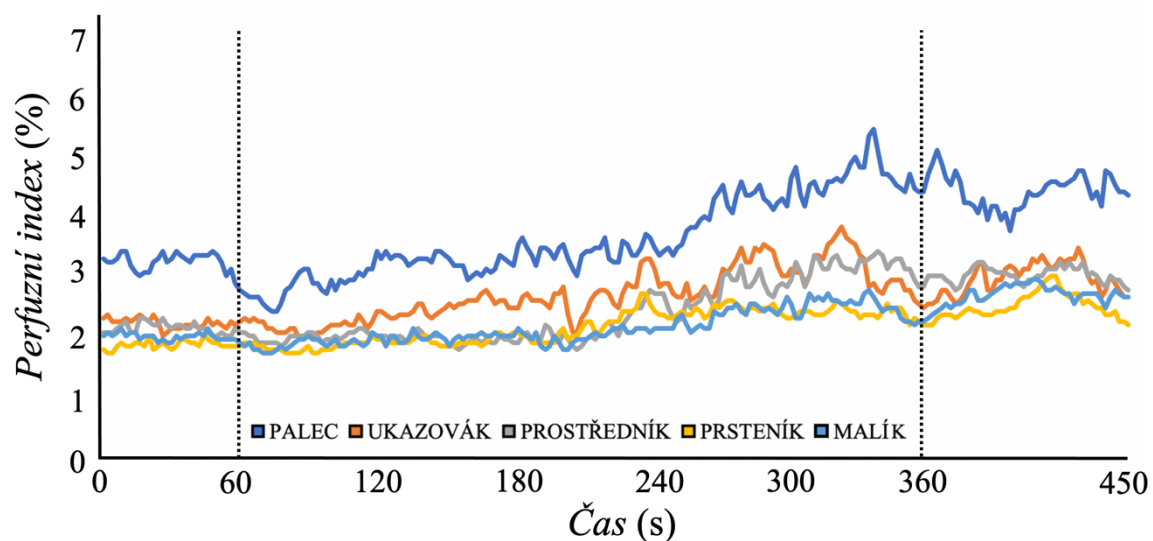
Senzory byly dále ověřeny na levých prostřednících dvou subjektů. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 5.3.

**Tabulka 5.3:** Ověření senzorů pulzních oxymetrů na levém prostředníku dobrovolníka č. 1 a 2.

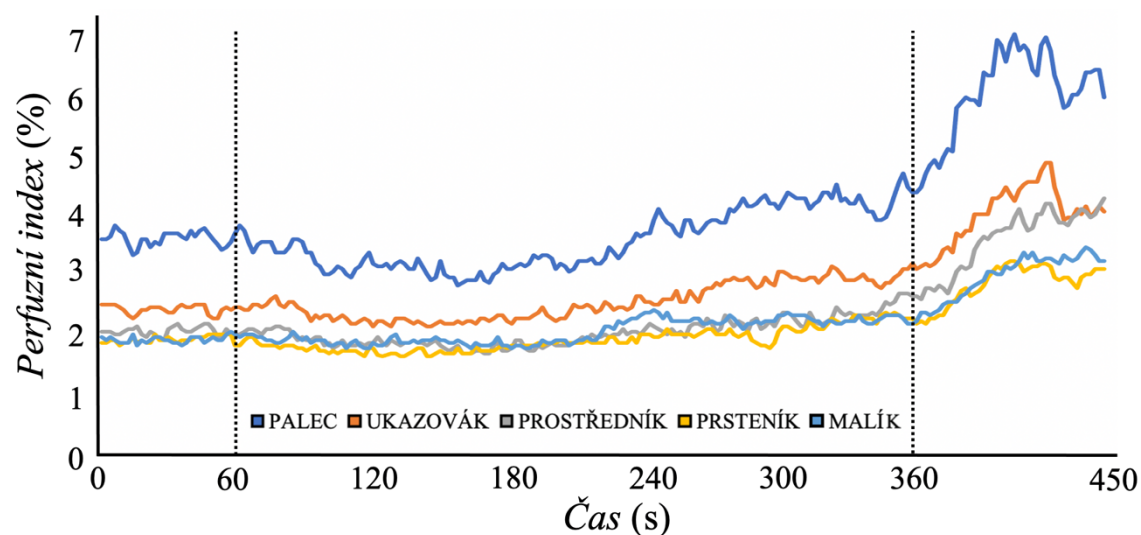
Dobrovolník	Přístroj	Senzor palce (%)	Senzor ukazováku (%)	Senzor prostředníku (%)	Senzor prsteníku (%)	Senzor malíku (%)
1	Masimo	100	99	99	99	100
1	Nonin	98	98	98	98	98
2	Masimo	98	98	98	98	98
2	Nonin	98	98	98	99	99

## 5.2 Perfuzní index

Současně s měřením hodnot  $SpO_2$  na levé ruce probíhalo i měření perfuzního indexu přístroji Masimo (Masimo Corporation, Irvine, CA). Z obr. 5.14 a 5.15 je patrné, že v průběhu celého experimentu dochází k mírnému rostoucímu trendu perfuzních indexů na všech prstech. Po ukončení dýchání hypoxicko-hyperkapnické směsi docházelo v návratové fázi k typickému nárůstu perfuzního indexu minimálně o 40 % původní hodnoty. U hypoxické části experimentu nedošlo ke změně  $PI$  po přechodu do návratové fáze. Grafy jsou zpracované jako časové průběhy mediánů jednotlivých prstů všech dobrovolníků.



**Obr. 5.14:** Medián perfuzních indexů všech dobrovolníků na jednotlivých prstech levé ruky v závislosti na čase hypoxické části experimentu.

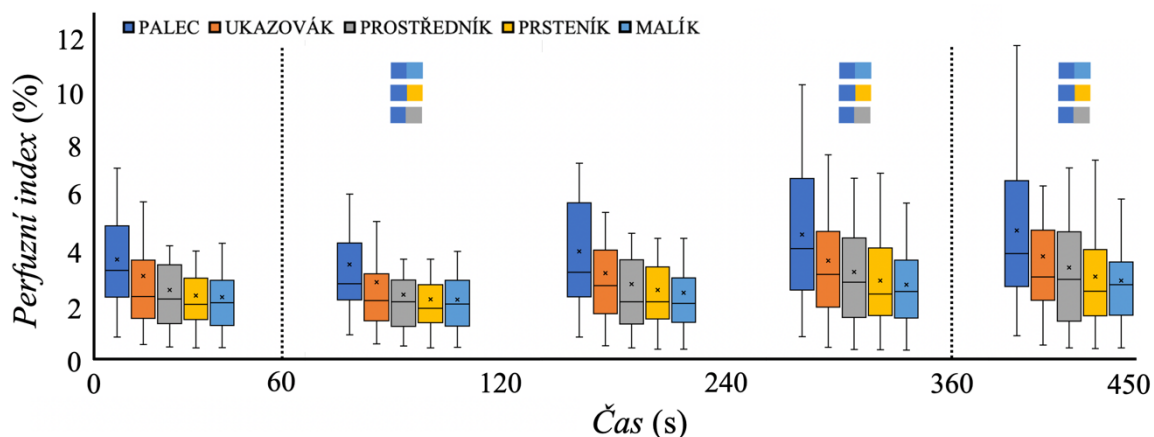


**Obr. 5.15:** Medián perfuzních indexů všech dobrovolníků na jednotlivých prstech levé ruky v závislosti na čase hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

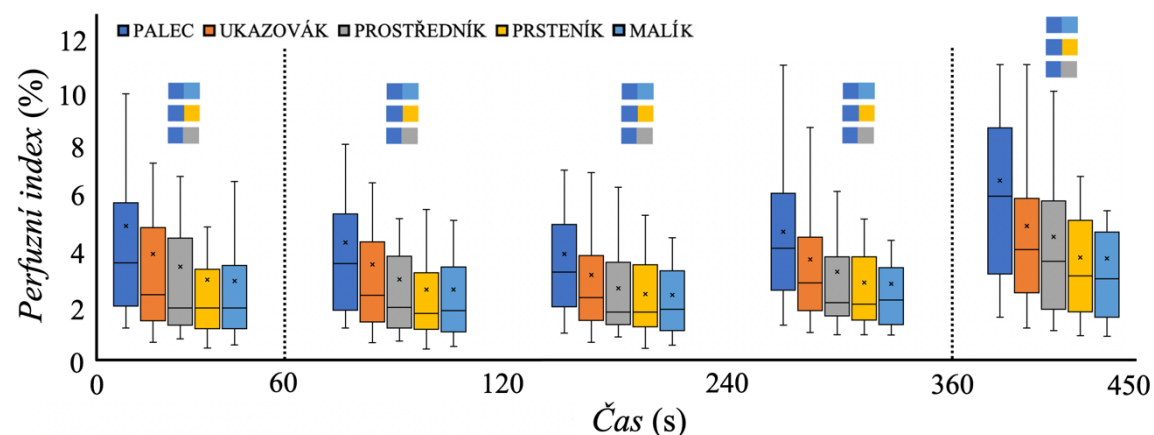
Statistické vyhodnocení naměřených perfuzních indexů na jednotlivých prstech je zpracováno na následujících grafech. Na obr. 5.16 jsou znázorněny krabicové grafy perfuzních indexů na jednotlivých prstech levé ruky v závislosti na čase hypoxické části experimentu, na obr. 5.17 jsou znázorněny krabicové grafy perfuzních indexů



na jednotlivých prstech levé ruky v závislosti na čase hypoxicko-hyperkapnické části experimentu. Nejvyšší průměrná hodnota i medián perfuzního indexu byl měřen na palci. Perfuzní index měřený na palci byl statisticky významně vyšší od prostředníku, prsteníku a malíku u obou částí experimentu. K nejvýznamnějšímu nárůstu perfuzního indexu v průběhu experimentu docházelo u palce, kde medián perfuzního indexu v návratové fázi hypoxicko-hyperkapnické části byl až dvakrát vyšší než na počátku experimentu.



**Obr. 5.16:** Krabicový graf perfuzních indexů jednotlivých prstů levé ruky z pěti úseků hypoxické části experimentu. Statistická významnost je označena barevnými obdélníky nad grafy. Barvy obdélníku značí statistickou významnost mezi prsty s příslušnými barvami.



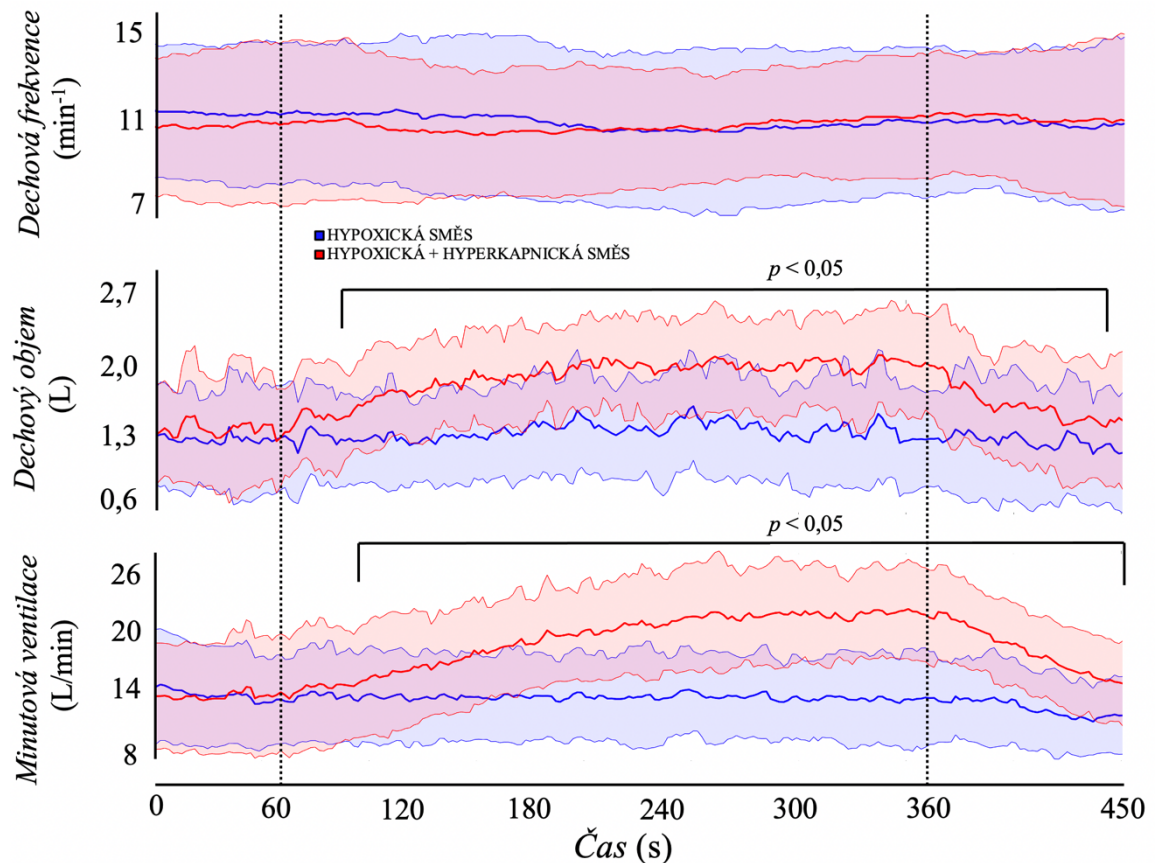
**Obr. 5.17:** Krabicový graf perfuzních indexů jednotlivých prstů levé ruky z pěti úseků hypoxicko-hyperkapnické části experimentu. Statistická významnost je označena barevnými obdélníky nad grafy. Barvy obdélníku značí statistickou významnost mezi prsty s příslušnými barvami.

### 5.3 Vývoj dalších fyziologických parametrů dobrovolníků v průběhu experimentu

Složení směsi plynů v jednotlivých částech experimentu mělo významný vliv i na další vitální funkce dobrovolníků. Grafy v této kapitole jsou uváděné jako průměr  $\pm$  směrodatná odchylka. Na obr. 5.18 jsou zobrazeny časové průběhy dechové frekvence, dechového objemu a minutové ventilace při dýchání hypoxické směsi a hypoxicko-hyperkapnické směsi. Průměrná klidová minutová ventilace dobrovolníků se

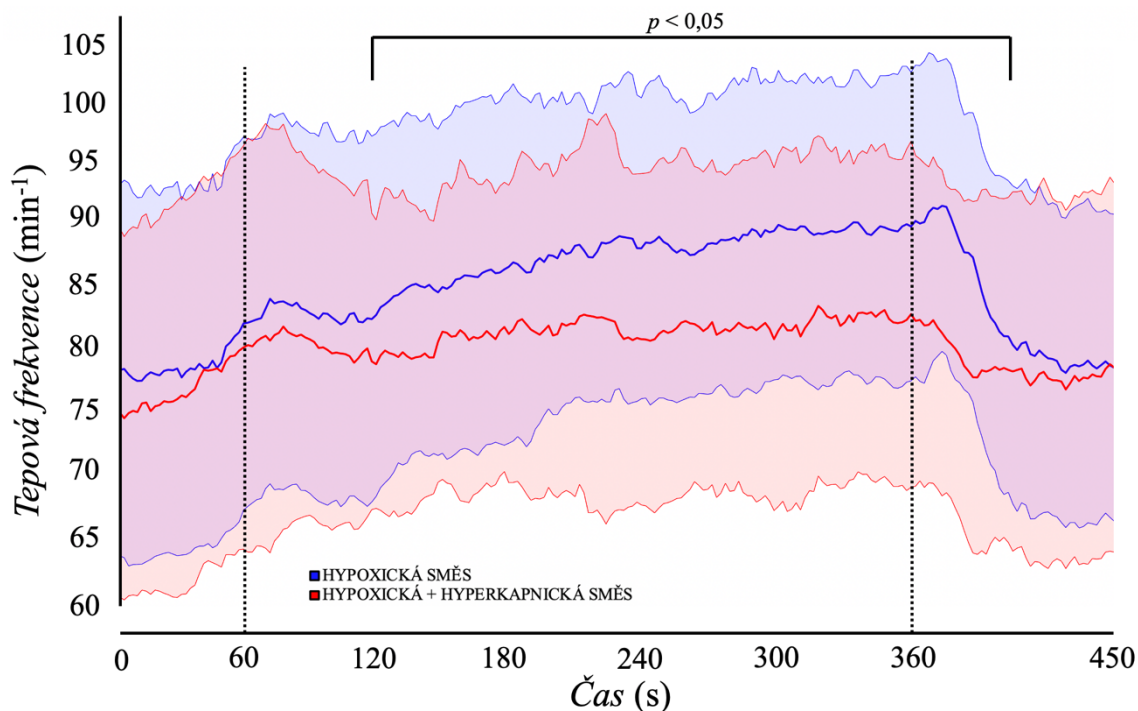
pohybovala okolo 14 L/min. Z grafu je patrný statistický významný nárůst minutové ventilace při dýchání hypoxicko-hyperkapnické směsi oproti směsi hypoxické až na průměrných 20 L/min. Při návratové fázi došlo k poklesu minutové ventilace na počáteční hodnoty.

Dále je patrné, že dechová frekvence dobrovolníků se v průběhu ani jedné z fází experimentu neměnila, a tedy nárůst minutové ventilace u směsi hypoxicko-hyperkapnické byl způsoben prohloubením dechu. Průměrný klidový dechový objem se pohyboval okolo 1,3 L. V desaturační fázi vzrostl dechový objem u hypoxicko-hyperkapnické směsi průměrně na 2 L.



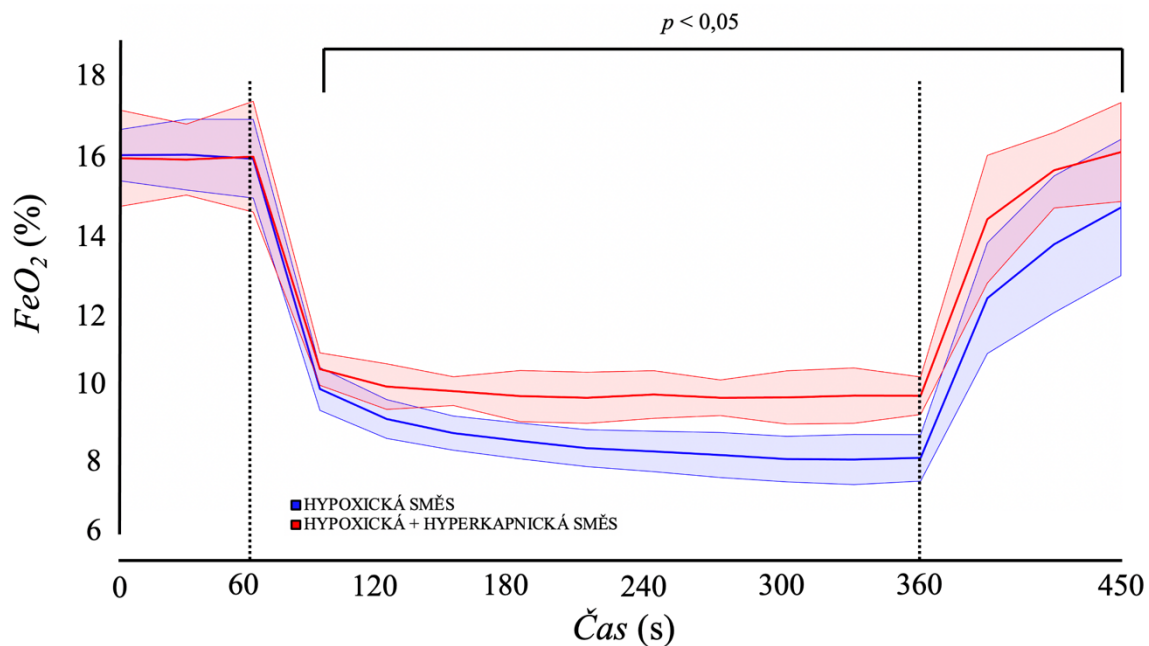
**Obr. 5.18:** Porovnání vývoje dechové frekvence, dechového objemu a minutové ventilace v závislosti na čase hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

Tepová frekvence (obr. 5.19) se zvyšovala při přechodu z ustalovací fáze na fázi desaturační u obou částí experimentu. Při dýchání hypoxické směsi růst tepové frekvence pokračoval až do konce desaturační fáze, kde následně ve fázi návratu došlo k poklesu tepové frekvence průměrně o 15 úderů za minutu zpět do původních hodnot. U směsi hypoxicko-hyperkapnické byla tepová frekvence v celé délce desaturační fáze neměnná.



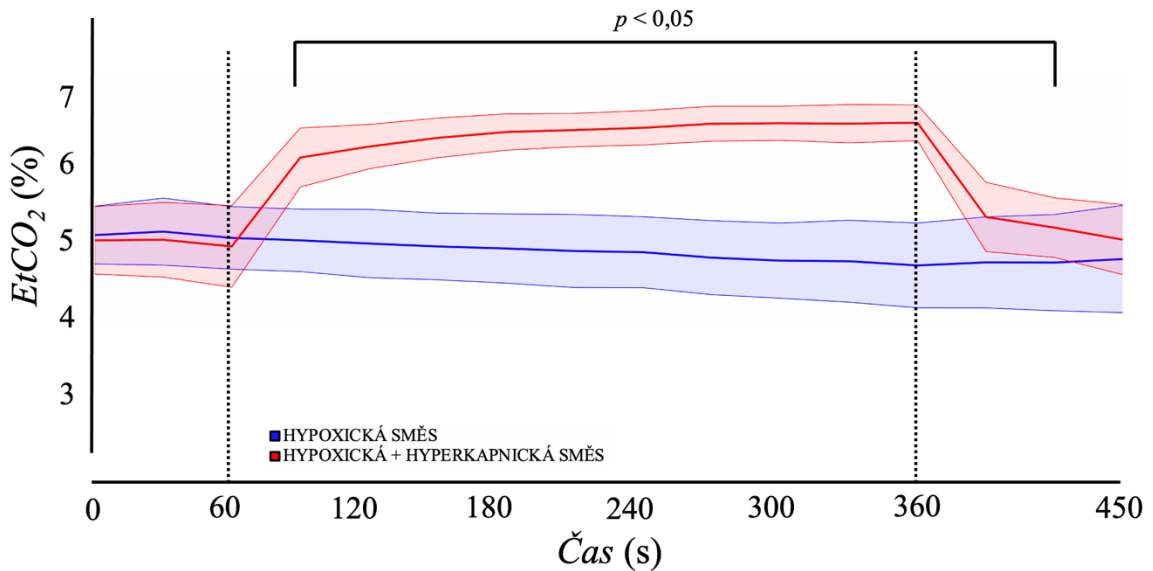
**Obr. 5.19:** Porovnání vývoje tepových frekvencí v závislosti na čase hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

Průměrné klidová expirační frakce kyslíku ( $FeO_2$ ) se v ustalovací fázi pohybovala okolo 16 %, což je zobrazeno na obr. 5.20. U obou částí experimentu po ustalovací fázi následovala desaturační fáze, kde dobrovolníci vdechovali 12 % kyslíku místo běžných 20,8 %. U hypoxické směsi se pokles  $FeO_2$  v průběhu desaturační fáze zvětšoval až k hranici 8 %. U hypoxicko-hyperkapnické směsi bylo  $FeO_2$  v celé délce desaturační fáze konstantní s koncentrací okolo 10 %.



**Obr. 5.20:** Porovnání vývoje expirační frakce kyslíku ( $FeO_2$ ) v závislosti na čase hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

Průměrné klidová koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu ( $EtCO_2$ ) se v ustalovací fázi pohybovala okolo 5 %, jak je zobrazeno na obr. 5.21. V desaturální fázi dobrovolníci vdechovali u směsi hypoxicko-hyperkapnické 5 %  $CO_2$ , což mělo za následek vzrůst  $EtCO_2$  průměrně o 1,5 %. U hypoxické směsi, kde dobrovolníci nevdechovali žádný oxid uhličitý, docházelo v celé délce měření k mírnému poklesu  $EtCO_2$ .



**Obr. 5.21:** Porovnání vývoje koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu ( $EtCO_2$ ) v závislosti na čase hypoxické části a hypoxicko-hyperkapnické části experimentu.

## 6 Diskuse

Hlavním výsledkem této diplomové práce jsou experimentálně změřené hodnoty periferní saturace krve kyslíkem a perfuzních indexů na jednotlivých prstech, a tím i stanovení vlivu volby prstu pro umístění senzoru pulzního oxymetru na hodnoty  $SpO_2$  u zdravého člověka, a to nejen při fyziologických hodnotách  $SpO_2$ , ale také při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii. Ze zpracovaných grafů vyplývá rozdílné chování jednotlivých prstů z hlediska měřeného  $SpO_2$ , ale vždy v rámci udávané přesnosti pulzního oxymetru výrobcem. Na levé ruce byly měřeny vyšší hodnoty na palci, ukazováku a malíku oproti prostředníku a prsteníku. Na pravé ruce byla nejnižší saturace měřena na ukazováku. Dále bylo zjištěno, že průměrně nejvyšší perfuzní index je měřen na palci. Současně byl prozkoumán vliv hyperkapnie na chování dobrovolníků z hlediska respiračních parametrů i měřeného perfuzního indexu.

Dýchací okruh navržený pro tento experiment umožňoval přesné dodržování protokolu měření. Aparatura nezpůsobovala odpor pro dýchací svaly, což by jinak znepříjemňovalo dobrovolníkům průběh experimentu. Jednoduše zvolená směšovací aparatura umožňovala velmi přesně a stabilně dávkovat dané složení směsi.

### 6.1 Periferní saturace hemoglobinu kyslíkem

Hypoxická směs způsobovala značnější pokles hodnot  $SpO_2$  oproti směsi hypoxicko-hyperkapnické, přestože obě směsi obsahovaly stejné množství kyslíku, což je zobrazené na obr. 5.2 a 5.3. Subjektivní názory dobrovolníků však vypovídaly spíše o nepřijemnostech se směsí hypoxicko-hyperkapnickou.

Při monitoraci  $SpO_2$  na prstech levé ruky přístroji Masimo byly průměrně vyšší hodnoty měřeny na palci, ukazováku a malíku u hypoxické části i hypoxicko-hyperkapnické části experimentu (obr. 5.4 a 5.5). Na prostředníku a prsteníku byly měřeny téměř stejné hodnoty  $SpO_2$ , avšak vždy nižší, než byla průměrná hodnota celé ruky. V průběhu desaturační fáze se tyto trendy zvyšovaly, kde maximální průměrný rozdíl  $SpO_2$  mezi malíkem a prostředníkem dosahoval až 2,5 %. U hypoxické části byly v desaturační fázi rozdíly mezi skupinou prstů (palec, ukazovák a malík) a dvojicí prstů (prostředník a prsteník) vyšší než u směsi hypoxicko-hyperkapnické. Je pravděpodobné, že je to způsobené nižším průměrným poklesem  $SpO_2$  u části hypoxicko-hyperkapnické.

Výsledky  $SpO_2$  měřených na jednotlivých prstech pravé ruky přístrojem SenSmart X-100 vykazují odlišné výsledky oproti levé ruce. Rozdíly mezi prsty byly obecně nižší a mezi jednotlivými fázemi experimentu se pořadí prstů podle hodnoty  $SpO_2$  střídalo, což mohlo být způsobeno rozdílnými velikostmi senzorů na prstech. V ustalovací fázi byly průměrně nižší hodnoty měřené na prsteníku a ukazováku. V desaturační fázi byly vyšší hodnoty měřeny spíše na prsteníku a malíku a nižší hodnoty na ukazováku. Ve fázi návratu docházelo ke snížení rozdílů mezi prsty.

Naměřené hodnoty  $SpO_2$  na obou rukách v průběhu obou částí experimentu vypovídají o rozdílném chování jednotlivých prstů z hlediska měřených hodnot  $SpO_2$ . Mírné rozdíly mezi jednotlivými prsty potvrdili i studie Besarionogla a kol. [5] a Juliana a kol. [6]. Rozdíly mezi prsty však nejsou považovány za klinicky významné. Měření však probíhala pouze za fyziologických hodnot  $SpO_2$ , tudíž nebylo jasné, jak by se prsty chovaly v nižších hodnotách  $SpO_2$ . V tabulce 6.1 je znázorněno porovnání autorem

naměřených hodnot  $SpO_2$  na všech prstech obou rukou s dalšími studii [5,6]. Prsty jsou v tabulce seřazené sestupně podle měřené hodnoty  $SpO_2$ . Autorem naměřené výsledky v této práci neodpovídají výsledkům studií [5,6], kde na levé ruce palec sice vykazoval spíše vyšší hodnoty, ale na prsteníku byly měřené hodnoty nejnižší při fyziologických hodnotách.

**Tabulka 6.1:** Tabulka porovnání sestupně seřazených prstů podle měřeného  $SpO_2$  ve fyziologických hodnotách u obou rukou.

Pořadí sestupně	Levá ruka			Pravá ruka		
	Besanoroglu a kol. [5]	Juliana a kol. [6]	Tato studie	Besanoroglu a kol. [5]	Juliana a kol. [6]	Tato studie
1.	Prsteník	Prsteník	Palec	Prostředník	Prostředník	Prostředník
2.	Palec	Palec	Ukazovák	Palec	Prsteník	Malík
3.	Malík	Prostředník	Malík	Ukazovák	Palec	Palec
4.	Ukazovák	Ukazovák	Prostředník	Prsteník	Ukazovák	Ukazovák
5.	Prostředník	Malík	Prsteník	Malík	Malík	Prsteník

Na pravé ruce byly v ustalovací fázi ve fyziologických hodnotách  $SpO_2$  měřené nejvyšší hodnoty na malíku a prostředníku a nejnižší na prsteníku. Vyšší hodnoty měřené na prostředníku odpovídají výsledkům zjištěným ve studiích Besanorogla a kol. [5] a Juliana a kol. [6], ale na malíku byla v těchto studiích měřena hodnota  $SpO_2$  nejnižší.

Jednou z možností pro vysvětlení mírně rozdílných měřených hodnot  $SpO_2$  na jednotlivých prstech by mohlo být cévní zásobení prstů [4,5]. Prsty jsou zásobené vřetenní a loketní tepnou, na ukazováku a prostředníku dominuje zásobení loketní tepnou [39]. Na základě lišících se naměřených hodnot  $SpO_2$  na těchto prstech u obou rukou se nedá říci, že by případné rozdílné měřené hodnoty  $SpO_2$  mezi prsty mohly být vysvětleny cévním zásobením. Současně se v populaci dominance zásobení na jednotlivých prstech výrazně liší [39].

Další parametrem, který by mohl způsobovat rozdíly mezi prsty z hlediska  $SpO_2$ , je perfuzní index [4,5,7–9], kde jeho naměřené hodnoty na jednotlivých prstech jsou detailně rozebrány v kapitole 6.2.

Přestože v průběhu experimentů byly mezi jednotlivými prsty statisticky významné rozdíly  $SpO_2$ , autor této práce se domnívá, že tyto rozdíly nejsou klinicky významné. Průměrné rozdíly mezi prsty se vždy pohybují v rámci přesnosti senzoru  $\pm 2\%$ , se kterými by se při interpretaci hodnot mělo počítat, a nemělo by se tedy stát, že dojde k nesprávné diagnostice vlivem zvolení prstu.

Hodnocení jednotlivých prstů z hlediska měřeného  $SpO_2$  neprobíhalo pouze při dýchání stejné směsi plynů v dané fázi experimentu, ale bylo zaznamenáváno i dynamické chování  $SpO_2$  na jednotlivých prstech při skokovité změně dýchané směsi plynů (tab. 5.1). Při přechodu z desaturační fáze do fáze návratu došlo vždy k rychlému nárůstu hodnot  $SpO_2$ , zejména u hypoxické směsi, kdy byl průměrný pokles  $SpO_2$  vyšší. Rozdíly hodnot  $SpO_2$  mezi prsty byly sice krátkodobě vysoké (až 15%), ale takové rozdíly nastávaly náhodně a pouze při skokovité změně dýchané směsi plynů a pouze po dobu maximálně 6–10 sekund, než došlo ke srovnání. Průměrování hodnot bylo nastavené na dvě sekundy u přístrojů Masimo a na čtyři sekundy u přístroje Nonin. Tyto krátkodobé rozdíly by mohly být způsobené rychlostí cévního zásobení jednotlivých prstů nebo chybným čtením hodnot při skokovité změně  $SpO_2$  a následným průměrováním po určitou

dobu. Na levé ruce došlo k nárůstu o minimálně 20 % rozdílu maximální a minimální hodnoty  $SpO_2$  od nejnižší hodnoty  $SpO_2$  průměrně za 38–43 s. Na pravé ruce byl tento nárůst rychlejší (27–39 s). Nárůst o 80 % byl u obou rukou stejný. U žádného z prstů nebyl nalezen statisticky významný rozdíl oproti jinému u ani jednoho ze tří hodnocených parametrů. Statistickým porovnáním rukou by sice byly zjištěny statisticky významné rozdíly, ale toto porovnání není prakticky možné vzhledem k rozdílným použitým přístrojům, které disponují neznámým průměrovacím algoritmem, který by tyto rozdíly mohl způsobovat.

### 6.1.1 Ověření senzorů $SpO_2$ a porovnání přístrojů

Všechny senzory obou přístrojů byly ověřeny na simulátoru ProSim 8 Vital Sign and ECG Patient Simulator (Fluke corporation, Everett, Washington, USA), zda nevykazují odchylky od nastavené hodnoty. Při nastavování hodnoty  $SpO_2$  na simulátoru se nastavuje i přístroj, na kterém snímání hodnot bude probíhat. Pokud je simulátor nastaven pro přístroj Masimo, není možné hodnoty  $SpO_2$  ověřovat pro přístroj Nonin, protože každý přístroj používá jinou technologii pro vyhodnocování. Hodnoty  $SpO_2$  byly ověřovány při třech nastaveních, což je zobrazeno v tab. 5.2, kde u přístrojů Masimo nedocházelo k žádným odchylkám. U přístroje SenSmart X-100 byly všechny senzory odchýlené mírně nahoru vůči nastavené hodnotě, avšak v rámci udávané přesnosti přístroje. Vzhledem k tomu, že přístroj Nonin SenSmart X-100 je vybaven novou a přesnější technologií snímání hodnot  $SpO_2$  [40] není jasné, zda nedošlo k úpravě vyhodnocování hodnot vůči simulátoru.

Všechny senzory byly dále ověřeny na levém prostředníčku dvou dobrovolníků (tab. 5.3). Ani na základě tohoto měření se nezdá, že by mezi senzory byly rozdíly v rámci daného přístroje. Toto měření však neumožňuje porovnat přístroje Masimo a Nonin SenSmart X-100 mezi sebou z hlediska měřených hodnot, protože měření neproběhlo simultánně. Měření však proběhlo za fyziologických hodnot, takže se dá předpokládat, že se  $SpO_2$  neměnilo. Zároveň toto ověření neproběhlo na dostatečném množství dobrovolníků.

Rozmezí velikosti prstu pro senzory přístrojů Masimo (Masimo Corporation, Irvine, CA) není blíže specifikováno než určením pro dospělou populaci nad 30 kg. Senzory přístroje Nonin SenSmart X-100 (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA) jsou dělené pro tři velikosti prstů, což je znázorněno v tabulce 4.3. Vzhledem k rozdílným velikostem jednotlivých prstů a zároveň rozdílům mezi jednotlivými dobrovolníky muselo být ze statistického zpracování odstraněno devět naměřených průběhů  $SpO_2$  na prsteníku a pět na malíku pravé ruky u obou částí experimentu. Tyto prsty byly pro dané senzory příliš velké, což způsobilo zaškrcení prstu a výrazné ovlivnění hodnot  $SpO_2$ . Průměrné velikosti jednotlivých prstů jsou znázorněny v tab. 4.4. Přestože ze statistického zpracování byly vyřazeny prsty, které byly pro daný senzor příliš velké, je možné, že i tak bylo měření ovlivněno, a to zejména u prsteníku a malíku.

Limitací tohoto experimentu může být, že měření daného prstu probíhalo vždy stejným senzorem. Vzhledem k rozdílným velikostem senzorů na pravé ruce nebylo možné senzory mezi prsty měnit. Současně vysoké množství kombinací umístění senzorů na prsty by neumožnilo provést všechny možné připojení a snížit tak vliv senzoru. Přestože všechny senzory byly jednotlivě ověřeny na simulátoru a následně i na dobrovolnících, je možné, že se jednotlivé senzory mírně lišily. Při dalším měření by bylo vhodné jednotlivé senzory střídát, aby se tato možná odchylka co nejvíce eliminovala.

V kapitole 5.1.4 bylo dále provedeno porovnání přístrojů pro obě části experimentu. Z obr. 5.12 je patrné, že na levé ruce (značené tmavě modře) jsou průměrné hodnoty  $SpO_2$  po celou dobu experimentu vyšší než na ruce pravé. V ustalovací fázi se tento rozdíl průměrně pohybuje okolo 0,5 %, v desaturační fázi rozdíl vzrostl až k 1,5 %. Směrodatné odchylky mají stejnou velikost v celé délce měření. Při porovnání přístrojů u hypoxicko-hyperkapnické směsi na obr. 5.13 jsou výsledky totožné. V ustalovací fázi červeně značená levá ruka měřená přístroji Masimo vykazuje o 0,5 % vyšší hodnoty  $SpO_2$  než ruka pravá měřená přístrojem Nonin SenSmart X-100, v desaturační fázi tento rozdíl vzrostl průměrně na 1 %. Ve fázi návratu se sice křivky překrývají, ale po ustálení je mezi nimi opět rozdíl. Větší rozdíl mezi pravou a levou rukou u hypoxické směsi, než u směsi hypoxicko-hyperkapnické mohl být způsoben vyšším celkovým poklesem hodnot  $SpO_2$ . Na základě těchto výsledků by se mohlo zdát, že mezi rukami je statisticky významný rozdíl, avšak není jasné, zda to není způsobené rozdílem mezi přístroji, protože již v ustalovací fázi jsou mezi přístroji rozdíly. Vliv dominance ruky na hodnoty  $SpO_2$  není možné uvažovat vzhledem k nízkému počtu dvou leváků z celkového počtu 24 dobrovolníků.

## 6.2 Perfuzní index

Součástí monitorace hodnot  $SpO_2$  bylo i hodnocení perfuzního indexu na jednotlivých prstech levé ruky. Nejvyšší perfuzní index v průběhu celého experimentu byl měřen na palci, kde medián perfuzního indexu v ustalovací fázi byl 3,5 %. Mezi ostatními prsty byly rozdíly minimální a medián se pohyboval okolo dvou procent. Na základě měření se zdá, že perfuzní index koreluje zejména s velikostí prstu. Podle studie Mizukoshiho a kol. [4] byl nejvyšší perfuzní index měřen na prostředníku, což neodpovídá autorem měřeným výsledkům. Zároveň je ve studii Mizukoshi a kol. [4] prostředník na základě nejvyššího perfuzního indexu doporučen pro měření pulzní oxymetrií, pokud hrozí hypoperfuze. Na základě tohoto zjištění by se mohl palec jevit jako nejvhodnější prst k měření pulzní oxymetrií vzhledem k nejvyšší síle signálu.

Nízký perfuzní index by mohl mít vliv na měřené hodnoty  $SpO_2$  [7,9]. V průběhu experimentů u žádného z dobrovolníků nebyl problém se silou signálu a s monitorací hodnot  $SpO_2$  vlivem nízkého perfuzního indexu. Současně nižší hodnoty  $SpO_2$  a  $PI$  byly zjištěny u prostředníku a prsteníku, což by mohlo naznačovat určitý vztah mezi těmito parametry. Malík však tento vztah nepotvrzuje.

V průběhu experimentů docházelo k mírnému nárůstu perfuzního indexu na všech prstech, protože vlivem hypoxie i hyperkapnie dochází k vazodilataci cév [36]. Při přechodu do fáze návratu po dýchání hypoxické směsi nebyl pozorován žádný rozdíl u perfuzního indexu. Výrazný vliv na perfuzní index byl pozorován při ukončení dýchání směsi hypoxicko-hyperkapnické. Na začátku fáze návratu reagovalo tělo vazodilatací u všech prstů, a tím i nárůstem perfuzního indexu minimálně o 40 % zřejmě z důvodu rychlé potřeby zbavení se oxidu uhličitého, což je patrné z obr. 5.15 a 5.17. U palce docházelo až ke zdvojnásobení hodnoty perfuzního indexu oproti počáteční hodnotě.

Limitací tohoto měření je monitorace perfuzního indexu pouze levé ruky, což znemožňuje potvrzení výsledků pravou rukou. Současně byl každý senzor používán vždy na daném prstu, tudíž není jasné, zda rozdíly nejsou způsobované senzory, přestože byly senzory ověřeny.



## 6.3 Další fyziologické parametry v průběhu experimentu

Součástí této práce byla i monitorace dalších fyziologických parametrů z hlediska bezpečnosti dobrovolníka, ale i z důvodu možného vztahu k perfuznímu indexu či  $SpO_2$ .

Jak již bylo zmíněno v kapitole 6.1, hypoxická směs způsobovala značnější pokles hodnot  $SpO_2$  oproti směsi hypoxicko-hyperkapnické, ale subjektivní názory dobrovolníků však vypovídaly o nepříjemných pocitech se směsí hypoxicko-hyperkapnickou. Je to zřejmě způsobené tím, že na vysoké množství oxidu uhličitého v krevním oběhu reaguje tělo rychleji než na nedostatek kyslíku. To mělo za následek zvýšení minutové ventilace, čímž docházelo k rychlejšímu odventilování oxidu uhličitého, ale zároveň také k přístupu vyššího množství kyslíku. Na obr. 5.18 jsou znázorněny časové průběhy dechové frekvence, dechového objemu a minutové ventilace při dýchání hypoxické směsi a hypoxicko-hyperkapnické směsi. Průměrná klidová minutová ventilace v ustalovací fázi se pohybovala okolo 14 litrů za minutu, ale u hypoxicko-hyperkapnické směsi vzrostla v průběhu fáze poklesu průměrně k 20 L/min, což je statisticky významně rozdílné oproti směsi hypoxické. Zvýšení minutové ventilace bylo způsobené zvýšením dechového objemu, dechová frekvence zůstávala v průběhu celého experimentu neměnná a pohybovala se průměrně okolo 11 dechů za minutu.

Výsledky průběhů minutové ventilace odpovídají i obr. 5.20, kde je znázorněn graf závislosti expirační frakce kyslíku ( $FeO_2$ ) na čase. Nižší minutová ventilace u hypoxické směsi byla kompenzována nižší frakcí vydechaného kyslíku. Vysoká minutová ventilace u hypoxicko-hyperkapnické směsi měla za následek nižší pokles hodnot  $SpO_2$ . V průběhu experimentu byla také monitorována koncentrace oxidu uhličitého na konci výdechu ( $EtCO_2$ ), které je důležitým ukazatelem zejména z bezpečnosti dobrovolníka a je graficky znázorněno na obr. 5.21. Vysoké množství oxidu uhličitého ve směsi a následně vysoké hodnoty inspirační frakce oxidu uhličitého ( $FiCO_2$ ) a zároveň  $EtCO_2$  způsobovaly značný nárůst perfuzního indexu v návratové fázi. Tepová frekvence (obr. 5.19) se při ustalovací fázi mírně zvyšovala nejspíše vlivem stresu před začátkem dýchání jedné ze směsí. U hypoxické směsi tento růst pokračoval i v celé desaturační fázi, až ve fázi návratu došlo k poklesu hodnot tepové frekvence na původní hodnoty. Zřejmě tím, že pokles  $SpO_2$  u hypoxicko-hyperkapnické směsi nebyl tak výrazný jako u druhé směsi, nedocházelo ve fázi poklesu k nárůstu tepové frekvence. V návratové fázi došlo k mírnému poklesu na původní hodnoty tepové frekvence.

## 7 Závěr

Této prospektivní studie se zúčastnilo 24 zdravých dobrovolníků, kteří podstoupili dvě části měření v náhodném pořadí (hypoxická část a hypoxicko-hyperkapnická část). Po připojení senzorů pulzních oxymetrů k prstům obou rukou následovala minutová ustalovací fáze a pětiminutová desaturační fáze, při které dobrovolníci vdechovali předpřipravenou směs plynů. Obě směsi obsahovaly shodné množství kyslíku (12 %), směs hypoxicko-hyperkapnické části měření byla navíc doplněna pěti procenty oxidu uhličitého, zbytek obsahu směsi byl tvořen dusíkem. Nižší průměrný pokles hodnot  $SpO_2$  u hypoxicko-hyperkapnické části než u hypoxické části experimentu byl zapříčiněn vysokou minutovou ventilací.

Hodnoceny a navzájem porovnávány byly simultánně naměřené hodnoty  $SpO_2$  a perfuzního indexu na jednotlivých prstech obou rukou v průběhu celého experimentu. Monitorace  $SpO_2$  a  $PI$  byla zajištěna použitím stejných pěti pulzních oxymetrů od výrobce Masimo (Masimo Corporation, Irvine, CA). Na pravé ruce byl použit ke snímání multikanálový monitor oxygenace Nonin SenSmart X-100 (Nonin Medical Inc., Plymouth, MN, USA). Všechny senzory byly ověřeny na simulátoru ProSim 8 Vital Sign and ECG Patient Simulator (Fluke corporation, Everett, Washington, USA), zda nevykazují odchylky od nastavené hodnoty.

Na levé ruce byly měřeny vyšší hodnoty  $SpO_2$  na palci, ukazováku a malíku oproti prostředníku a prsteníku. Na pravé ruce byla nejnižší saturace měřena na ukazováku a nejvyšší na malíku. Přestože v průběhu experimentů byly mezi jednotlivými prsty statisticky významné rozdíly  $SpO_2$ , autor se domnívá, že tyto rozdíly nejsou klinicky významné. Rozdíly mezi prsty se vždy pohybovaly průměrně v rámci přesnosti senzoru  $\pm 2\%$ , se kterými by se při interpretaci hodnot mělo počítat, a nemělo by tedy dojít k chybné interpretaci výsledků  $SpO_2$  při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii, pokud jsou dodrženy pokyny výrobce pulzního oxymetru. Na základě naměřených výsledků nebyl nalezen přímý vztah mezi  $SpO_2$  a velikostí prstu, perfuzního indexu nebo cévním zásobením. Při skokovité změně dýchané směsi nebyl nalezen žádný statisticky významný rozdíl u průběhů  $SpO_2$  mezi jednotlivými prsty.

Při riziku hypoperfuze by mohl být nejvhodnějším prstem k měření  $SpO_2$  palec vzhledem k nejvyššímu měřenému perfuznímu indexu. Mezi ostatními prsty byly rozdíly perfuzních indexů minimální. Vysoké množství oxidu uhličitého u hypoxicko-hyperkapnické směsi způsobovalo nárůst perfuzního indexu o minimálně 40 % u všech prstů v návratové fázi.

## Seznam použité literatury

- [1] LAPIER, Tanya, Megan CHATELLIER a Koster BAILEY. Does Finger Used for Pulse Oximetry Measurements Make a Difference? [online]. In: . Acute Care [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: [https://cdn.ymaws.com/O2.acutept.org/resource/resmgr/CSM/CSM\\_2016/1007.pdf](https://cdn.ymaws.com/O2.acutept.org/resource/resmgr/CSM/CSM_2016/1007.pdf)
- [2] 8000 SpO2 soft sensors (quick guide), nonin.com/sensors (2013) [online]. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: [nonin.com/sensors](https://nonin.com/sensors)
- [3] 9 Best Pulse Oximeters for Respiratory Therapists, Doctors, and Nurses. Respiratory Therapy Zone [online]. 2020 [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://O2.respiratorytherapyzone.com/best-pulse-oximeters/>
- [4] MIZUKOSHI, K., M. Shibasaki, F. Amaya, T. Mizobe a O2. Tanaka. Which Finger Do You Attach Pulse Oximetry To? Index Finger or Not? European Journal of Anesthesiology. 2009. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://O2.masimo.co.jp/pdf/clinical/set/mizukoshi-which-finger-do-you-attach-pulse-oximetry-to-may-2009.pdf>
- [5] BASARANOGLU, Gokcen, Mefkur Bakan a Tarik Umutoglu. Comparison of SpO2 values from different fingers of the hands. SpringerPlus. 2015, (4). DOI: 10.1186/s40064-015-1360-5. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://O2.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4627972/>
- [6] JULIANA, N., S. Azmani, A. Idrose a Amirfaiz. Reliable monitoring of oxygen saturation via pulse oximetry: which site to choose? Journal of Fundamental and Applied Sciences. 2018, 9(4S), 122-130. DOI: 10.4314/jfas.v9i4s.54. ISSN 1112-9867. Dostupné také z: <https://O2.ajol.info/index.php/jfas/article/view/165611>
- [7] RT STAFF. Pulse oximetry and low perfusion [online]. 7. 2. 2007 [cit. 2020-09-13]. Dostupné z: <https://www.rtmagazine.com/public-health/healthcare-policy/home-care/pulse-oximetry-and-low-perfusion/>
- [8] LOUIE, Aaron, J. Feiner a P. Bickler. Four Types of Pulse Oximeters Accurately Detect Hypoxia during Low Perfusion and Motion. Anesthesiology [online]. 2018 March, 520-530 [cit. 2020-09-13]. DOI: <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000002002>. Dostupné z: <https://pubs.asahq.org/anesthesiology/article/128/3/520/18780/Four-Types-of-Pulse-Oximeters-Accurately-Detect>
- [9] Gehring H, Hornberger C, Matz H, Konecny E, Schmucker P. The effects of motion artifact and low perfusion on the performance of a new generation of pulse oximeters in volunteers undergoing hypoxemia. Respir Care. 2002;47(1):48-60. [online]. [cit. 2020-09-13]. Dostupné z: <https://O2.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11749687>
- [10] Horakova, L., & Roubik, K. (2019, November). Performance of Different Pulse Oximeters Can Affect the Duration of Field Breathing Experiments. In 2019 E-Health and Bioengineering Conference (EHB) (pp. 1-4). IEEE. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8969917>

- [11] THIJSSSEN, Mark & Janssen, Loes & Le Noble, Jos & Foudraine, Norbert. (2019). Facing SpO<sub>2</sub> and SaO<sub>2</sub> discrepancies in ICU patients: is the perfusion index helpful?. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1007/s10877-019-00371-3.
- [12] TITTLE, M., & Flynn, M. B. (1997). Correlation of pulse oximetry and co-oximetry. *Dimensions of critical care nursing : DCCN*, 16(2), 88–95. [cit. 2020-07-20]. <https://doi.org/10.1097/00003465-199703000-00004>
- [13] Oximeters operate based on this principle of different absorption and light emission of the T and R configurations by Adrian Curtin. [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://medicine.uiowa.edu/iowaprotocols/pulse-oximetry-basic-principles-and-interpretation>
- [14] CHAN, Edward, Michael Chan a Mallory Chan. Pulse oximetry: Understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations. *Respiratory Medicine*. 2013, (107), 789-799. [cit. 2020-07-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rmed.2013.02.004>.
- [15] Lima, A; Bakker, J (October 2005). "Noninvasive monitoring of peripheral perfusion". *Intensive Care Medicine*. **31** (10): 1316–26. [cit. 2020-09-10]. doi:10.1007/s00134-005-2790-2. PMID 16170543.
- [16] TIPPING, Robert a Alex Nicoll. Mechanisms of hypoxaemia and the interpretation of arterial blood gases. *Surgery (Oxford)*. 2018, (36), 675-681. [cit. 2020-07-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mpsur.2018.10.001>.
- [17] HEGG, Jessica. Understanding SpO<sub>2</sub> and Normal Oxygen Levels. In: *HomeCare* [online]. 2016 [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://O2.homecaremag.com/understanding-spO2-and-normal-oxygen-levels>
- [18] YÖNT G., Korhan E. A., Khorshid L. Comparison of oxygen saturation values and measurement times by pulse oximetry in various parts of the body. *Applied Nursing Research*, 2011, 24(4):e39-43. [cit. 2020-07-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apnr.2010.03.002>.
- [19] BLAYLOCK V, Brinkman M, Carver S, McLain P, Matteson S, Newland P, Pettit R, Schulman C, Watson S. Comparison of finger and forehead oximetry sensors in postanesthesia care patients. *Journal of PeriAnesthesia Nursing*, 2008, 23(6):379-386. [cit. 2020-07-20]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jopan.2008.07.009>
- [20] BILAN N, ABDI NB, Mahallei M. Validity of pulse oximetry of earlobe, toe and finger in the detection of pediatric hypoxemia. *Medical journal of Tabriz University of medical sciences*, 2006, 28(3):41-44. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://O2.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=65978>
- [21] SEIFI, S., Khatony, A., Moradi, G. et al. Accuracy of pulse oximetry in detection of oxygen saturation in patients admitted to the intensive care unit of heart surgery: comparison of finger, toe, forehead and earlobe probes. *BMC Nurs* 17, 15 (2018). [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s12912-018-0283-1>.

- [22] CLAYTON D G, Webb R K, Ralston A C, Duthie D, Runciman O2 B. Pulse oximeter probes: A comparison between finger, nose, ear and forehead probes under conditions of poor perfusion. *Anaesthesia*, 1991, 46(4):260-265. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2044.1991.tb11492.x>
- [23] HINKELBEIN, Jochen, D. HOSE a F. FIELDER. Comparison of three different sensor sites on pulse oximetry in critically ill patients. *International journal of intensive care*. 2005. [cit. 2020-07-20]. Dostupné z: <https://O2.researchgate.net/publication/224764980>
- [24] 8000Q2. [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://O2.nonin.com/products/8000q2/>
- [25] Kiesa's toe with the glowing red pulse oximeter. [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://jaeger.festing.org/photo/2015/03/31/kiasa-toe-with-the-glowing-red-pulse-oximeter>
- [26] Nellcor SPo2 Sensor to fit the Lifepak 12 – Pattern. [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://O2.wessex-medical.com/shop/cables-sensors/nellcor-type-hard-shell-finger-sensor-2/>
- [27] Nonin 0487-000 PureLight Reusable Forehead Reflectance SpO2 Sensor. [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: [https://O2.tigermedical.com/Products/PureLight-Reusable-Forehead-Reflectance-SpO2-Sensor\\_\\_NON0487-000.aspx](https://O2.tigermedical.com/Products/PureLight-Reusable-Forehead-Reflectance-SpO2-Sensor__NON0487-000.aspx)
- [28] Nasal Alar FAST SpO2 Sensor, Case of 20. [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://images.philips.com/is/image/philipsconsumer/dcbd7d09151545d5a425a8b901461fa2?wid=4000&hei=4000&fit=constrain&fmt=jpeg&qlt=100,1>
- [29] ČSN EN ISO 80601-2-61. *Zdravotnické elektrické přístroje - Část 2-61: Zvláštní požadavky na základní bezpečnost a nezbytnou funkčnost přístrojů pro pulzní oxymetrii*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 80 s.
- [30] Effect of nail polish and henna on oxygen saturation determined by pulse oximetry in healthy young adult females. *Emergency Medicine Journal*. 2011, **28**(9), 783-785. DOI: 10.1136/emj.2010.096073. ISSN 1472-0205. [cit. 2020-09-10]. Dostupné také z: <http://emj.bmj.com/cgi/doi/10.1136/emj.2010.096073>
- [31] HAKVERDIOĞLU YÖNT, Gülendir, Esra AKIN KORHAN a Berna DIZER. The effect of nail polish on pulse oximetry readings. *Intensive and Critical Care Nursing*. 2014, **30**(2), 111-115. DOI: 10.1016/j.iccn.2013.08.003. ISSN 09643397. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0964339713000864>
- [32] FOGLIA, Elizabeth, R. Whyte a A Chaudhary. The Effect of Skin Pigmentation on the Accuracy of Pulse Oximetry in Infants with Hypoxemia. *The journal of pediatrics* [online]. 2017, (182), 355-377 [cit. 2020-09-13]. DOI: 10.1016/j.jpeds.2016.11.043. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5328979/>

- [33] BICKLER, Philip, J. Feiner a J. Severinghaus. Effects of Skin Pigmentation on Pulse Oximeter Accuracy at Low Saturation. *Anesthesiology* [online]. 2005, , 715-719 [cit. 2020-09-13]. DOI: <https://doi.org/10.1097/00000542-200504000-00004>. Dostupné z: <https://pubs.asahq.org/anesthesiology/article/102/4/715/7364/Effects-of-Skin-Pigmentation-on-Pulse-Oximeter>
- [34] TRIVEDI NS, Ghouri AF, Shah NK, Lai E, Barker SJ. Effects of motion, ambient light, and hypoperfusion on pulse oximeter function. *J Clin Anesth.* 1997;9:179–83. [cit. 2020-09-10]. DOI: 10.1016/s0952-8180(97)00039-1
- [35] Radical 7 - Masimo. Operators manual. 2012. [online]. [cit. 2020-09-10]. Dostupné z: <https://techdocs.masimo.com/globalassets/techdocs/pdf/lab-5475e.pdf>
- [36] LEUENBERGER, Urs A. et al. Hypoxia augments apnea-induced peripheral vasoconstriction in humans. *Journal of Applied Physiology.* 2001, **90**(4), 1516-1522. [cit. 2020-09-10]. DOI: 10.1152/jappl.2001.90.4.1516.
- [37] SEYMOUR, S. Kety a Carl. F. SCHMIDT. The effects of altered arterial tensions of carbon dioxide and oxygen on cerebral blood flow and cerebral oxygen consumption of normal young men. *The Journal of Clinical Investigation.* 1948, **27**(4), 484-492. [cit. 2020-09-10]. DOI: 10.1172/JCI101995.
- [38] Arteries – Hand. ASSH. [online]. [cit. 2020-09-13]. Dostupné z: <https://www.assh.org/handcare/safety/vessels>
- [39] TAN, Ruth a A. Lahiri. Vascular Anatomy of the Hand in Relation to Flaps. *Hand Clinics* [online]. 2020 February, 36(1) [cit. 2020-09-13]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hcl.2019.08.001>. Dostupné z: [https://www.hand.theclinics.com/article/S0749-0712\(19\)30087-3/fulltext#back-bib22](https://www.hand.theclinics.com/article/S0749-0712(19)30087-3/fulltext#back-bib22)
- [40] Nonin medical Inc. Accuracy and Superior Performance of PureSAT and PureLight Oximetry Technologies [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: <https://www.nonin.com/resource/accuracy-and-superior-performance-of-puresat-and-purelight-oximetry-technologies/>

# Příloha A: Syllabus výzkumného projektu

## Syllabus výzkumného projektu

<b>A: Základní údaje o výzkumném projektu:</b>	
Název projektu: Variabilita měření SpO <sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru	
Typ studie: intervenční	
Půjde o práci: s osobami	
Cíl projektu, testovaná hypotéza:  Cílem projektu je experimentálně stanovit vliv volby prstu pro umístění senzoru pulzního oxymetru na výsledky měření periferní saturace krve kyslíkem (SpO <sub>2</sub> ) u zdravého člověka při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii.	
Přínos projektu v technické, diagnostické, léčebné oblasti, pro lékařské poznání nebo individuální subjekt hodnocení:  V klinické praxi jsou senzory obvykle umísťovány na jeden ze tří prostředních prstů, umísťování probíhá ve většině případů náhodně, i bez ohledu na dominantní ruku pacienta. Některé studie již prokázaly, že naměřené hodnoty SpO <sub>2</sub> na dominantní a nedominantní ruce pacienta se mírně liší a poukázaly na možnost, že se měřené hodnoty SpO <sub>2</sub> budou lišit i mezi jednotlivými prsty. Tyto hypotézy ale nebyly doposud dostatečně ověřeny, protože měření probíhala pouze za fyziologických hodnot SpO <sub>2</sub> a hodnoty z jednotlivých prstů nebyly snímány simultánně nebo identickými přístroji.  Experiment může pomoci určit, zda záleží, na jaký prst bude umístěn prstový senzor pro měření SpO <sub>2</sub> . Vhodná volba prstu pro měření SpO <sub>2</sub> by mohla pomoci lépe interpretovat měřené hodnoty a případně tak zvýšit úspěšnost při diagnostice zdravotních událostí. Dále by mohl tento experiment pomoci určit, zda je monitorace SpO <sub>2</sub> na prstech rukou vhodný ukazatel stavu pacienta při krátkodobých hypoxických a hyperkapnických stavech.	
<b>B: Charakteristika souboru subjektů (osob) klinického hodnocení:</b>	
Počet: 20–40	Věková struktura: 20–30
Pohlaví: muži i ženy	Způsob jejich náboru: náhodný
Odměna za účast: žádná	Jiné:
Doba trvání celého projektu (datum od-do): Říjen 2020 – Srpen 2022	Doba trvání pro jeden subjekt hodnocení: 2krát 15 minut
Popis nakládání se subjekty, popis intervence, odebírání vzorků apod.:  Každý dobrovolník podstoupí vstupní vyšetření a vyplní dotazník o jeho zdravotním stavu. Nedochozí k žádnému odběru vzorků. Před samotným experimentálním měřením budou dobrovolníkovi na prsty rukou umístěny prstové senzory pulzních oxymetrů a na čelo budou přilepeny senzory rSO <sub>2</sub> . Experiment se skládá ze dvou samostatných fází, kdy v první fázi budou dobrovolníci vdechovat po dobu pěti minut hypoxickou směs. Po dostatečně dlouhém	

čase na zotavení podstoupí dobrovolníci druhou fázi, ve které budou vdechovat směs hypoxickou a hyperkapnickou. Obě fáze měření začínou dvouminutovou ustalovací fází, kdy budou kontrolovány fyziologické hodnoty dobrovolníka. Následně bude dobrovolník po dobu pěti minut vdechovat předpřipravenou hypoxickou směs nebo hypoxickou a mírně hyperkapnickou směs přes jednorázový antibakteriální filtr. Následně bude vdechování hypoxické či hypoxické a hyperkapnické směsi ukončeno a dobrovolník bude vdechovat okolní vzduch, SpO<sub>2</sub> bude monitorováno až do návratu měřených hodnot do výchozích hodnot dobrovolníka. V průběhu experimentu bude kontinuálně prováděno neinvazivní měření SpO<sub>2</sub> na jednotlivých prstech obou rukou dobrovolníků po celou dobu experimentu.

Hypoxická směs bude tvořena obohacením vzduchu o dusík, čímž vznikne směs z kyslíku (10–11 %) a dusíku (89–90 %). Tato směs odpovídá parciálnímu tlaku v nadmořské výšce 5500 m. n. m., což je nadmořská výška základního tábora Mount Everestu, kde se nachází také malá zdravotnická klinika. Pouze o 300 metrů níže se nachází nejvýše položené město La Rinconada s 30 000 obyvateli. Této směsi bylo využíváno také ve studii Leuenberger et al.

LEUENBERGER, A. et al. Hypoxia augments apnea-induced peripheral vasoconstriction in humans. *Journal of Applied Physiology*. 2001, 90(4), 1516-1522. DOI: 10.1152/jappl.2001.90.4.1516.

Směs hyperkapnická bude tvořena z kyslíku (10–11 %), dusíku (84–85 %) a oxidu uhličitého (5 %). Během experimentu bude kontrolována vydechovaná koncentrace oxidu uhličitého, která nesmí přesáhnout 60 mmHg, což je definováno jako bezpečná hranice podle publikace *Nunn's Applied Respiratory Physiology*. Ve studii Louie et al. 2008 byly tvořeny směsi kyslíku, dusíku a oxidu uhličitého tak, aby bylo dosaženo plató hodnot SaO<sub>2</sub> rovno 75 %, 88 % a 98 %. Ve studii Seymour et al. byl sledován vliv hyperkapnie i hypoxie na průtok krve mozkiem. Během experimentů bylo využíváno inhalovaných směsí s obsahem 5 a 7 % oxidu uhličitého ve směsi plynů.

LUMB AB. *Nunn's Applied Respiratory Physiology*. 7th edition. Elsevier, 2012.

LOUIE, Aaron, B.S., John. R., M.D. Feiener a Philip E., M.D. Bickler. Four Types of Pulse Oximeters Accurately Detect Hypoxia during Low Perfusion and Motion. *Anesthesiology*. 2018, 128(3), 520-530. DOI: <https://doi.org/10.1097/ALN.0000000000002002>

SEYMOUR, S. Kety a Carl. F. Schmidt. The effects of altered arterial tensions of carbon dioxide and oxygen on cerebral blood flow and cerebral oxygen consumption of normal young men. *The Journal of Clinical Investigation*. 1948, 27(4), 484-492. [cit. 2020-09-10]. DOI: 10.1172/JCI101995.

Liší se projekt od standardního postupu v denní praxi: ANO  
V případě, že ano, popište rozdíly:

Měření SpO<sub>2</sub> se od standardního postupu neliší. K odlišnosti dochází tím, že v průběhu experimentu bude kontinuálně prováděno neinvazivní měření SpO<sub>2</sub> na jednotlivých prstech obou rukou dobrovolníků po celou dobu experimentu. Obě fáze měření začínou dvouminutovou ustalovací fází, kdy budou kontrolovány fyziologické hodnoty dobrovolníka. Následně bude dobrovolník po dobu pěti minut vdechovat předpřipravenou hypoxickou směs nebo hypoxickou a mírně hyperkapnickou směs přes jednorázový antibakteriální filtr.



Následně bude vdechování hypoxické či hypoxické a hyperkapnické směsi ukončeno a dobrovolník bude vdechovat okolní vzduch, SpO<sub>2</sub> bude monitorováno až do návratu měřených hodnot do výchozích hodnot dobrovolníka.

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

Měření saturace krve kyslíkem pomocí prstového pulzního oxymetru je zcela bezpečné. Dyskomfort může být způsoben dobrovolníkovi během experimentu dýcháním ústy skrze filtr a aparaturu, která způsobuje odpor (minimalizovaný) pro dýchací svaly. Inhalace hypoxické a hyperkapnické směsi může způsobit mírnou nevolnost či motání hlavy. Po celou dobu experimentu bude přítomný lékař s dostatečným přístrojovým zajištěním. Další možné vedlejší účinky a rizika jsou minimalizovány vylučujícími kritérii uvedenými v informovaném souhlase.

Jak je zajištěna bezpečnost testovaného subjektu:

Všechny použité přístroje mají platnou BTK, pro měření je používán jednorázový spotřební materiál.

Každý dobrovolník podstoupí vstupní vyšetření a vyplní dotazník o jeho zdravotním stavu.

Po celou dobu experimentů bude přítomný lékař s dostatečným přístrojovým zajištěním.

V případě poklesu hodnot SpO<sub>2</sub> pod 75 % bude experiment ukončen. SpO<sub>2</sub> obvykle slouží jako koncový bod experimentu. Bodem pro ukončení experimentu bylo SpO<sub>2</sub> 75 % u studie Brugger et al. a Strapazzon et al. a 85 % u studií Grissom et al. a Radwin et al. Všechny tyto experimenty byly prováděny v terénních podmínkách, kde je složité zajištění potřebné zdravotnické přístrojové techniky. Současně jsou i sledovány nadechované a vydechované koncentrace kyslíku a oxidu uhličitého dobrovolníkem. Pokud vydechovaná koncentrace oxidu uhličitého překročí 60 mmHg, bude experiment ukončen.

BRUGGER, Hermann, Günther Sumann, Roland Meister, Liselotte Adlerkastner, 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. DOI: 10.1016/S0300-9572(03)00113-8. ISSN 03009572.

STRAPAZZON, Giacomo, Peter Paal, Jürg Schweizer a Markus Falk. Effects of snow properties on humans breathing into an artificial air pocket – an experimental field study. *Nature: Scientific reports* [online]. 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-17960-4.

GRISSOM, Colin K., Martin I. Radwin, Chris H. Harmston, Hirshberg, Crowley. Respiration During Snow Burial Using an Artificial Air Pocket. *JAMA*. [online]. 2000; 283(17):2266–2271. DOI:10.1001/jama.283.17.2266.

RADWIN, M. I., C. K. Grissom, M. B. Scholand, and C. H. Harmston. Normal oxygenation and ventilation during snow burial by the exclusion of exhaled carbon dioxide. *Wilderness & environmental medicine*. 2001, 12(4), 256-262. DOI: [https://doi.org/10.1580/1080-6032\(2001\)012\[0256:NOAVDS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1580/1080-6032(2001)012[0256:NOAVDS]2.0.CO;2)

Kdo ponese náklady na odškodnění v případě poškození subjektu hodnocení:

FBMI ČVUT, nicméně riziko je minimalizováno použitím zdravotnických přístrojů s platnou BTK podle zákona 268/2014, které budou navíc provozovány v galvanicky izolované soustavě ZIS. Současně je riziko poškození subjektu hodnocení sníženo vstupní kontrolou a přítomností lékaře po celou dobu experimentu.

C: Charakteristika souboru laboratorních zvířat:

Druh laboratorních zvířat:

Počet:

Doba trvání celého projektu (datum od-do):

Doba trvání pro jeden subjekt hodnocení:

Jak bude zajištěna péče o zvířata v průběhu experimentu:

D: Doplnující informace k výzkumnému projektu:

V Kladně dne



*podpis hlavního řešitele*

# Příloha B: Žádost o projednání výzkumného projektu v EK FBMI ČVUT



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta biomedicínského inženýrství

nám. Sítňá 3105, 272 01 Kladno

## Žádost o projednání výzkumného projektu v etické komisi FBMI ČVUT

*Application for approval of a research project by FBMI CTU Institutional Ethical/Review Board*

Název projektu: Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru

Name of the project: Variability of SpO<sub>2</sub> measurements depending on the choice of finger for sensor placement

Hlavní řešitel projektu (Jméno, pracoviště, e-mail): Bc. Šimon Walzel, student FBMI ČVUT, walzesim@fbmi.cvut.cz, KBT

Stručný popis projektu (do 100 slov):

Cílem projektu je experimentálně stanovit vliv volby prstu pro umístění senzoru pulzního oxymetru na výsledky měření periferní saturace krve kyslíkem (SpO<sub>2</sub>) u zdravého člověka při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii. Jedná se o intervenční prospektivní studii, která proběhne na Fakultě biomedicínského inženýrství zejména na studentech FBMI. Experiment se skládá ze dvou fází, kdy v první fázi budou dobrovolníci po ustalovací fázi vdechovat po dobu pěti minut hypoxickou směs. Ve druhé fázi budou dobrovolníci vdechovat hypoxickou a hyperkapnickou směs. V průběhu experimentu bude kontinuálně prováděno neinvazivní měření SpO<sub>2</sub> na jednotlivých prstech obou rukou dobrovolníků.

Charakter projektu:

Kvalifikační práce (specifikace): Diplomová práce

Seznam příkládaných dokumentů:

- sylabus projektu
- informovaný souhlas vč. informace pro subjekt hodnocení
- strukturovaný životopis hlavního řešitele, je-li na FBMI externistou
- jiné (prosíme vypsát):

V Kladně dne 9.10.2020

podpis hlavního řešitele

## Vyjádření souhlasu etické komise FBMI ČVUT

*FBMI CTU Institutional Ethical/Review Board approval*

Projekt byl schválen etickou komisí FBMI ČVUT dne: 4.11.2020 platný do: 1/2020  
pod číslem: C 15/2020

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

Řešitel projektu splnil podmínky nutné k získání souhlasu etické komise.

V Kladně dne 4.11.2020

ETICKÁ KOMISE  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta biomedicínského inženýrství  
nám. Sítňá 3105  
272 01 Kladno  
razítko etické komise FBMI ČVUT

Mgr. Martina ŠLIKOVÁ  
podpis předsedy etické komise

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

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

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

# Příloha C: Protokol měření

## Protokol měření

Výzkumný projekt: Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru

<b>ID probanda:</b>
Datum měření:
Čas měření:
Místo měření:
Protokol zapsal:

### Personální zajištění

Pozice	Funkce	Jméno a příjmení	Připraven
Zkoušející	Řídí měření, zapisuje protokol, instruuje probanda i obsluhu		<input type="checkbox"/>
Obsluha 1	Řídí se pokyny zkoušejícího – měří čas a obsluhuje pulzní oxymetry		<input type="checkbox"/>
Obsluha 2	Řídí se pokyny zkoušejícího – plní vaky dýchací směsí a obsluhuje aparaturu s dýchacím okruhem		<input type="checkbox"/>
Odborný dohled	Kontroluje zdravotní stav probanda		<input type="checkbox"/>

### Technické zajištění

Zařízení	Název	Výrobní číslo	Připraven
Zdroje CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> a vzduchu			<input type="checkbox"/>
Soustava na míchání plynů			<input type="checkbox"/>
Soustava na aplikaci plynů			<input type="checkbox"/>
Vaky na dýchací směs			<input type="checkbox"/>
Analyzátor ventilační směsi (Datex Ohmeda S/5)			<input type="checkbox"/>
Pulzní oxymetr MASSIMO 1			<input type="checkbox"/>
Pulzní oxymetr MASSIMO 2			<input type="checkbox"/>
Pulzní oxymetr MASSIMO 3			<input type="checkbox"/>
Pulzní oxymetr ROOT			<input type="checkbox"/>
Pulzní oxymetr ROOT			<input type="checkbox"/>
X-kanálový pulzní oxymetr NONIN			<input type="checkbox"/>
Hodiny			<input type="checkbox"/>
Stojan s kamerou			<input type="checkbox"/>
Medicínální kyslík, maska, ambuvak			<input type="checkbox"/>
Lékařský kufřík			<input type="checkbox"/>

**1. Příprava měření**

- Po příchodu do laboratoře zapnout všechny potřebné přístroje
  - Analyzátor ventilační směsi (Datex Ohmeda S/5)
  - Pulzní oxymetry
- Sesynchronizovat přístroje (čas, datum, průměrování hodnot)
- Zkontrolovat zdravotnické vybavení pro dohlížejícího lékaře
- Zkontrolovat tlakové lahve
- Našroubovat redukční ventily
- Otevřít ventil tlakové lahve
- Informovat personál o zásadách a průběhu experimentu
  - Dodržovat klid v laboratoři
  - Seznámit personál s jednotlivými úkoly

**Zkoušející:**

- Seznámit probanda s průběhem experimentu
  - Instruovat probanda, aby nesledoval hodnoty na pulzních oxymetrech
  - Zajistit pozice pulzních oxymetrů tak, aby na ně viděla obsluha, nikoli proband
- Zapsat identifikační kód (ID) probanda do tohoto protokolu, do karty probanda a informovaného souhlasu
- Zkontrolovat podepsání informovaného souhlasu probandem
- Vyplnit kartu probanda
- Zkontrolovat s probandem podmínky pro vyřazení z experimentu
- Usadit probanda do pohodlné pozice vsedě pro celý experiment
- Přiřadit pulzní oxymetry či kanály přístroje k jednotlivým prstům
- Připevnit čidla pulzních oxymetrů pro měření na obě ruce a také senzory pro měření rSO<sub>2</sub>

Levý Palec	Levý Ukazováček	Levý Prstředníček	Levý Prsteníček	Levý Malíček
Pravý Palec	Pravý Ukazováček	Pravý Prstředníček	Pravý Prsteníček	Pravý Malíček

**Obsluha:**

- Nastavit odpovídající výstupní tlaky na tlakových lahvích (4,5 bar výstupní tlak)
- Připravit aparaturu pro směřování plynů – včetně **monitorace koncentrace plynů**
- Připojit směšovací soustavu k jednotlivým plynům
- Připravit směs pomocí škrtecových ventilů
- Po ustálení směsi plynů na požadované koncentraci kyslíku či oxidu uhličitého napustit směs do velkého pytle (100 l)**
- Sestavit dýchací okruh, včetně připojení monitoru pro měření průtoků a frakcí plynů
- Upravit výšku dýchací soustavy dle probanda
- Připojit antibakteriální filtr

ID probanda

**ZAJISTIT SPUŠTĚNÍ KAMERY A NASTAVIT KAMERU TAK, ABY BYLY ČITELNÉ VŠECHNY HODNOTY NA PŘÍSTROJÍCH A HODINÁCH**

**2. Měření SpO<sub>2</sub> při dýchání vzduchu – počáteční fáze**

- Zajistit klid v místnosti
- Instruovat probanda o průběhu této části a následných fázích
- Ověřit připravenost probanda, obsluhy i všech přístrojů
- Zajistit nasazení antibakteriálního filtru a kolíku na nos**
- Dýchání dvě minuty v klidu okolního vzduchu nebo do ustálení měřených hodnot

**ZAPSÁNÍ ČASU PŘIPOJENÍ PROBANDA Z S/5 COLLECT .....**

**ZAPSÁNÍ AKTUÁLNÍHO ČASU Z HODIN .....**

**3. Měření SpO<sub>2</sub> při dýchání hypoxické směsi nebo hypoxické a hyperkapnické směsi**

**Fáze**

Hypoxická	Hypoxická a Hyperkapnická
-----------	---------------------------

- Ověřit připravenost probanda, obsluhy i všech přístrojů**
- Instruovat probanda o připojení na dýchací okruh
- Připojení vaku se směsí plynů k dýchacímu okruhu obsluhou
- Dýchání probanda hypoxické nebo hypoxické a hyperkapnické směsi po dobu 5 minut nebo do poklesu SpO<sub>2</sub> na 75 % nebo do hodnot EtCO<sub>2</sub> vyšších než 60 mmHg

**AKTUÁLNÍ ČAS Z HODIN PŘIPOJENÍ K PŘEDPŘIPRAVENÉ SMĚSI .....**

**4. Měření SpO<sub>2</sub> při dýchání vzduchu – závěrečná fáze**

- Odpojení vaku se směsí plynů od dýchacího okruhu
- Dýchání okolního vzduchu do navrácení hodnot sledovaných parametrů do počátečního stavu**
- Kontrola zdravotního stavu probanda

**5. Ukončení měření**

- Kontrola zdravotního stavu probanda
- Odpojení všech čidel pulzních oxymetrů z prstů probanda a odpojení senzorů rSO<sub>2</sub>
- Zálohování naměřených dat
- Nebude-li následovat měření dalšího probanda:
  - Vypnout použité přístroje, Příslušenství použitých přístrojů očistit a uložit do připravených krabic, Uzavřít tlakovou lahev, Uvést pracoviště do původního stavu

# Příloha D: Karta probanda

## Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru

### Karta probanda

Datum měření:

Proband vystupuje ve studii pouze pod výše uvedeným identifikátorem ID: .....

#### Základní údaje probanda:

Jméno:
Příjmení:
Pohlaví:
Věk:
Kontakt:

#### Naměřené a určené údaje:

Výška (cm):
Váha (kg):
BMI (kg/m <sup>2</sup> ):
Dominantní ruka:
Krevní tlak:

#### Šířka (š) a výška (v) prstu (mm)

Palec š.:	Ukazovák š.:	Prostředníček š.:	Prsteníček š.:	Malíček š.:
Palec v.:	Ukazovák v.:	Prostředníček v.:	Prsteníček v.:	Malíček v.:

#### Informace o zdravotním stavu probanda:

Kouření v současnosti:	ano <input type="checkbox"/>	ne <input type="checkbox"/>	četnost (pokud ano):
Doba od vykouření poslední cigarety (pro kuřáky):			
Astma:	ano <input type="checkbox"/>	ne <input type="checkbox"/>	
Prodělané onemocnění respirační soustavy:	ano <input type="checkbox"/>	ne <input type="checkbox"/>	jaké (pokud ano):
Aktuální zdravotní stav (zdravý, nachlazený, apod.):			
Fobie komplikující měření:	ano <input type="checkbox"/>	ne <input type="checkbox"/>	jaké (pokud ano):
Sport:	ano <input type="checkbox"/>	ne <input type="checkbox"/>	typ sportovní aktivity a četnost (pokud ano):
Prodělaná zranění ruky či prstů:	ano <input type="checkbox"/>	ne <input type="checkbox"/>	jaké (pokud ano):
Vzhled prstů (lak na nehty, porušená kůže, ekzém, ztvrdlá kůže apod.):			

#### Případné doplňující informace od probanda:

--

Proband podepsal informovaný souhlas: ano  ne

Podpis:
---------

## Příloha E: Informovaný souhlas

# Informovaný souhlas

## a informace pro subjekt hodnocení

**Název projektu:** Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru

**Hlavní řešitel:** Bc. Šimon Walzel

**Spoluřešitel:** Ing. Veronika Huttová, MUDr. Lenka Horáková

**Pracoviště:** Fakulta biomedicínského inženýrství ČVUT v Praze

*Variabilita měření SpO<sub>2</sub> v závislosti na volbě prstu pro umístění senzoru* je výzkumný projekt Fakulty biomedicínského inženýrství Českého vysokého učení technického v Praze.

Měření periferní saturace krve kyslíkem (SpO<sub>2</sub>) pulzními oxymetry s využitím prstových senzorů je běžně využívanou metodou pro kontinuální monitorování zdravotního stavu pacientů. V klinické praxi jsou senzory obvykle umístěvány na jeden ze tří prostředních prstů bez ohledu na dominantní ruku pacienta. Některé studie již prokázaly, že naměřené hodnoty SpO<sub>2</sub> na dominantní a nedominantní ruce pacienta se mírně liší a poukázaly na možnost, že se měřené hodnoty SpO<sub>2</sub> budou lišit i mezi jednotlivými prsty. Tyto hypotézy ale nebyly doposud dostatečně ověřeny, protože měření probíhala pouze za fyziologických hodnot SpO<sub>2</sub> a hodnoty z jednotlivých prstů nebyly snímány simultánně nebo identickými přístroji.

Cílem této práce je navrhnout a provést vhodný experiment, který umožní stanovit vliv volby prstu pro umístění senzoru pulzního oxymetru na výsledky měření periferní saturace krve kyslíkem u zdravého člověka při krátkodobé hypoxii a hyperkapnii. Záměrem studie je tedy zjistit, zda při umístění prstového senzoru na kterýkoli prst obou rukou budou měřeny v průběhu celého experimentu stejné hodnoty SpO<sub>2</sub>. Hodnoceny a navzájem porovnávány budou naměřené hodnoty SpO<sub>2</sub> a perfúzního indexu na jednotlivých prstech obou rukou v průběhu celého experimentu. Cílem práce je také ověření, zda je monitorace SpO<sub>2</sub> na prstech rukou vhodný ukazatel stavu pacienta při krátkodobých hypoxických a hyperkapnických stavech.

Experiment bude prováděn na náhodně vybraných dobrovolnících převážně z řad studentů FBMI mužského i ženského pohlaví ve věku 20–30 let. Každý dobrovolník bude po příchodu na experimentální pracoviště podroben vstupnímu vyšetření, při kterém budou zjištěny následující údaje: výška, váha, věk, obvod prstů, tepová frekvence, krevní tlak a saturace krve kyslíkem. Dále bude zaznamenáno, která ruka je pro dobrovolníka dominantní. Budou zjištěny informace o aktuálním zdravotním stavu dobrovolníka, zda dobrovolník kouří či v minulosti kouřil, zda má prokázané nějaké respirační onemocnění nebo zda neprodělal úraz rukou či prstů, který by mohl vést k přetrvávající snížené perfúzi prstů. Před samotným experimentálním měřením budou dobrovolníkovi na prsty rukou umístěny prstové senzory pulzních oxymetrů a na čelo budou přilepeny senzory rSO<sub>2</sub>. Experiment se skládá ze dvou samostatných fází, kdy v první fázi budou dobrovolníci vdechovat po dobu pěti minut hypoxickou směs. Po dostatečně dlouhém čase na zotavení podstoupí dobrovolníci druhou fázi, ve které budou vdechovat směs hypoxickou a hyperkapnickou. Obě fáze měření začnou dvouminutovou ustalovací fází, kdy budou kontrolovány fyziologické hodnoty dobrovolníka. Následně bude dobrovolník po dobu pěti minut vdechovat předpřipravenou hypoxickou směs nebo hypoxickou a mírně hyperkapnickou směs přes jednorázový antibakteriální filtr. Následně bude vdechování hypoxické či hypoxické a hyperkapnické směsi ukončeno a dobrovolník bude vdechovat okolní vzduch, SpO<sub>2</sub> bude monitorováno až do návratu měřených hodnot do výchozích hodnot dobrovolníka. Koncentrace vdechovaného a vydechovaného kyslíku a oxidu uhličitého budou kontinuálně monitorovány monitorem vitálních funkcí Datex Ohmeda S/5 (Datex-Ohmeda, Inc, Madison, USA). V případě, že aktuální hodnota SpO<sub>2</sub> klesne na 75 %



nebo hodnoty EtCO<sub>2</sub> stoupnou nad 60 mmHg, bude vdechování hypoxické či hypoxické a hyperkapnické směsi předčasně ukončeno. Odhadovaná doba celého experimentu bude 2krát 15 minut. Mezi dvěma fázemi experimentu bude minimálně 3 hodiny pauza.

Použité systémy budou provozovány POUZE v laboratoři vybavené galvanicky oddělenou elektrorozvodnou sítí ZIS (zdravotnická izolovaná soustava) a zařízení nezbytné pro záznam dat (notebook) budou napájeny VÝHRADNĚ z bateriového napájecího zdroje. Všechna zařízení mají platnou bezpečnostně-technickou kontrolu.

**Měření periferní saturace krve kyslíkem nemá žádné kontraindikace. Vylučujícím kritériem pro zajištění co nejvyšší přesnosti měření jsou poúrazové stavy horních končetin ovlivňující perfuzi prstů nebo poranění či choroby kůže na prstech rukou. Absolutní kontraindikace inhalace hypoxické směsi jsou zejména stavy, které se u dobrovolníka nepředpokládají, jako je pneumotorax nebo stav po kardiovaskulární operaci. Dále je vylučujícím kritériem anemie, bradykardie, hemoglobinopatie či další onemocnění kardiovaskulární soustavy, těhotenství, cukrovka, hypotenze či hypertenze. Tohoto experimentu by se neměli účastnit lidé s astmatem a jinými problémy s respirační soustavou, ani lidé ve fázi akutního onemocnění. Proband svým podpisem tohoto informovaného podpisu stvrzuje, že porozuměl těmto vylučujícím kritériím a že tato vylučovací kritéria nenaplnuje.**

Měření saturace krve kyslíkem pomocí prstového pulzního oxymetru je zcela bezpečné. Dyskomfort může být způsoben během experimentu dýcháním ústy skrze filtr a aparaturu, která způsobuje odpor (minimalizovaný) pro dýchací svaly. Inhalace hypoxické a hyperkapnické směsi může způsobit mírnou nevolnost či motání hlavy. Po celou dobu experimentu bude přítomný lékař s dostatečným přístrojovým zajištěním. Další možné vedlejší účinky a rizika jsou minimalizovány vylučujícími kritérii.

Náklady na odškodnění v případě poškození dobrovolníka ponese ČVUT FBMI, nicméně riziko je minimalizováno použitím zdravotnických přístrojů s platnou BTK podle zákona 268/2014, které budou navíc provozovány v galvanicky izolované soustavě ZIS. **Účast na experimentu je zcela dobrovolná, bez nároku na jakoukoliv odměnu. Zároveň se nepředpokládají žádné finanční výdaje dobrovolníka.**

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 dobrovolníka, 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 dobrovolníka, zda pokračovat v účasti ve studii nebo ne, bude dobrovolník o této skutečnosti včas informován.

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

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.

Z účasti na experimentu může být dobrovolník vyloučen z těchto důvodů: těhotenství, akutní respirační problém, zvýšená tělesná teplota a jiná nepříznivá skutečnost týkající se nemoci respirační soustavy nebo poranění v oblasti rukou.

Předpokládaná doba trvání experimentu v rámci jednoho probanda je typicky 2krát 15 minut.

Studie se zúčastní přibližně 30 probandů.

**Prohlášení:**

**Prohlašuji a svým podpisem stvrzuji, že jsem se seznámil a porozuměl všemu výše uvedenému a souhlasím s účastí ve studii. Prohlašuji, že nesplňuji žádné kritérium výše uvedené, které by neumožňovalo moji účast ve studii.**

Jméno dobrovolníka:

Datum narození:

Dobrovolník byl do studie zařazen pod číslem:

Odpovědný řešitel:

Podpis dobrovolníka:

Datum:

Podpis odpovědného řešitele:

Datum: