

UNIVERZITA KARLOVA  
Fakulta tělesné výchovy a sportu

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**2023**

**Eliška Křivánková**

UNIVERZITA KARLOVA  
Fakulta tělesné výchovy a sportu

**Vliv dobrovolné hypoventilace na výkon a vybrané ukazatele  
fyziologických funkcí u sportovců – přehledová studie**

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:  
**doc. Mgr. Michal Štefl, Ph.D.**

Vypracovala:  
**Eliška Křivánková**

Praha, prosinec 2023

Prohlašuji, že jsem závěrečnou bakalářskou práci zpracovala samostatně a uvedla jsem všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce, ani její podstatná část, nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne .....

Podpis diplomantky.....

## Poděkování

Chtěla bych vyjádřit své díky doc. Mgr. Michalovi Štefflovi, Ph.D., za odborné vedení této práce, jeho ochotu při poskytování konzultací, a za všechny cenné rady a připomínky, které mi trpělivě v průběhu psaní poskytoval, jenž mi pomohly práci v začátcích usměrnit a poté ji správně prezentovat. Vděčnost patří také mé rodině, která mi při psaní práce poskytovala zázemí a oporu a dokázala mě inspirovat a nadchnout pro mnou zvolené téma.

## **Abstrakt**

- Název:** Vliv dobrovolné hypoventilace na výkon a vybrané ukazatele fyziologických funkcí u sportovců – přehledová studie
- Cíl:** Cílem práce je shrnout výsledky vybraných studií zabývajících se technikou dobrovolné hypoventilace a ze získaných dat určit možnost a míru využití této techniky ke zlepšení sportovního výkonu.
- Metody:** Bakalářská práce byla realizována formou přehledové studie, dle doporučení PRISMA statement. Relevantní vědecké články a studie byly vyhledávány pomocí čtyř internetových databází, konkrétně: Web of Science, Pub Med, Scopus a EBSCOhost a následným průzkumem literárních zdrojů vyhledaných publikací.
- Výsledky:** Celkově bylo vyhledáno 129 potenciálních studií, ze kterých bylo vybráno 16 relevantních publikací, jež byly zařazeny do systematického přehledu. Ve všech případech se jednalo o kohortové studie, sedm z nich se zaměřovalo na zjišťování akutní odezvy hypoventilačního tréninku a devět na jeho dlouhodobý efekt. Tyto studie dohromady shromažďují data 270 aktivně sportujících probandů.
- Závěry:** Výsledky vybraných vědeckých studií z posledních dvaceti let naznačují, že by hypoventilační trénink mohl být přínosnou a dostupnou tréninkovou metodou pro zlepšení sportovní výkonnosti a navození podobných efektů, jaké způsobuje expozice hypoxickému prostředí, na úrovni moře.
- Klíčová slova:** sportovní výkon; zádrž dechu; normobarická hypoxie; hypoventilační trénink; omezená frekvence dýchání

## **Abstract**

**Title:** The effect of voluntary hypoventilation on physical performance and selected parameters of physiological function in athletes – a systematic review

**Objectives:** The aim of this thesis is to summarize the results of selected studies dealing with voluntary hypoventilation technique and from the obtained data determine the possibility and extent of using this technique to improve sports performance.

**Methods:** The bachelor thesis was conducted in the form of a systematic review, according to the recommendations of the PRISMA statement. Relevant scientific articles and studies were retrieved using four internet databases, namely Web of Science, Pub Med, Scopus and EBSCOhost, followed by literature research of the retrieved publications.

**Results:** A total of 129 potential studies were retrieved from which 16 relevant publications were selected and included in the systematic review. In all cases, these were cohort studies, seven of them focused on investigating the acute response of hypoventilation training and nine on its long-term effect. Together, these studies collected data from 270 actively exercising probands.

**Conclusions:** The results of selected scientific studies over the last twenty years suggest that hypoventilation training could be a beneficial and affordable training method to improve athletic performance and induce similar effects, to those caused by exposure to hypoxic environments, at sea level.

**Keywords:** sport performance; breath hold; normobaric hypoxia; hypoventilation training; reduced breathing frequency

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>TEORETICKÁ VÝCHODISKA.....</b>	<b>3</b>
2.1	Dech.....	3
2.1.1	Anatomické aspekty.....	3
2.1.2	Fyziologické aspekty .....	4
2.2	Plicní ventilace .....	4
2.2.1	Statické parametry .....	5
2.2.2	Hodnoty plicní ventilace .....	6
2.2.3	Alveolární ventilace.....	7
2.2.4	Alveolární vzduch .....	8
2.3	Transport kyslíku.....	8
2.3.1	Faktory ovlivňující vazebnou křivku hemoglobinu .....	9
2.4	Hypoxický trénink .....	11
2.4.1	Přístupy .....	11
2.5	Dobrovolná hypoventilace.....	13
2.5.1	Formy .....	14
2.5.2	Princip.....	15
2.5.3	Účinky.....	16
2.5.4	Bezpečnost .....	17
2.6	Hypoventilační trénink a sport v kontextu historie.....	18
<b>3</b>	<b>CÍLE A ÚKOLY .....</b>	<b>21</b>
<b>4</b>	<b>METODY PRÁCE.....</b>	<b>22</b>
4.1	Kritéria pro zařazení .....	22
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>DISKUSE .....</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>41</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>46</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>47</b>

# 1 ÚVOD

Dýchání je bezesporu jednou z nejdůležitějších životních funkcí, s prvním nádechem náš život začíná a s posledním výdechem končí. Dech nás doprovází každým dnem, a i přes jeho zásadní vliv na kvalitu života je většinou populace opomíjený. Stálým předmětem zájmu v oblasti sportovní vědy je však optimalizace tréninkových metod pro zlepšení sportovní výkonnosti a výzkumy naznačují, že konkrétní dechové techniky nám mohou zajistit větší sportovní výkonnost a také zlepšenou regeneraci po zátěži. Jedním z přístupů je výškový neboli hypoxický trénink, který přirozeně omezuje příjem kyslíku, a tak působí pozitivní svalové adaptace, díky kterým se jeví jako nadějná metoda pro zlepšování sportovní výkonnosti, zejména ve vytrvalostních disciplínách (Flaherty et al., 2016). Obtížná logistika a vysoké náklady spojené s tréninkem ve skutečné nadmořské výšce či v hypoxických komorách se však ukazují být podstatnou překážkou pro pravidelné zařazování tohoto tréninku do sportovní přípravy. Tato omezení podněcují snahu mezi vědci v objevování alternativních metod hypoxického tréninku, který by šel provádět i z pohodlí domova a na úrovni hladiny moře. Jednou z těchto technik je právě trénink s dobrovolnou hypoventilací při funkční reziduální kapacitě plic. Tato metoda, spočívající v přechodném omezování dechu, má potenciál ovlivnit fyziologické funkce a zlepšit sportovní výkon a mohla by tak obohacovat tréninkovou přípravu sportovců z mnoha odvětví (Woorons, 2014a). Přestože se v literatuře objevují studie zkoumající vliv dobrovolné hypoventilace, chybí komplexní přehled, který by shrnul aktuální poznatky a poskytl ucelený pohled na tuto problematiku. Tato bakalářská práce si tak klade za cíl provést přehledovou studii, která zhodnotí vliv dobrovolné hypoventilace na výkon a vybrané fyziologické ukazatele u sportovců, společně s analyzováním dostupné literatury a souhrnným vyhodnocením dosavadních poznatků. Může tak přispět k lepšímu pochopení potenciálních výhod a rizik spojených s touto novou tréninkovou metodou v kontextu sportovního výkonu.

Práce je členěna na teoretická východiska, která popisují konkrétní vlivy modulace dechu na organismus a také vysvětlují základní pojmy spojené s touto problematikou. V druhé části je proveden systematický přehled studií zaměřených na techniku dobrovolné hypoventilace.



## 2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

### 2.1 Dech

Vdechování vzdušného kyslíku je jedním ze dvou základních způsobů získávání energie pro lidský organismus. Díky kyslíku, který rychle reaguje a slučuje se s většinou látek, se takzvanou oxidací (okysličováním) dostává k buňkám tkání potřebná energie pro zajištění životních pochodů. Přívod tohoto prvku do organismu, stejně jako odvádění odpadového produktu látkové výměny – oxidu uhličitého pryč z organismu, zajišťuje **dýchací soustava**, při plynulém ději nazývaném **plicní ventilace**. Ta má dvě rytmicky se střídající fáze: vdech (inspirium), což je aktivní děj, který je vykonáván hlavně za pomoci bránice, a výdech (exspirium), který je za běžných podmínek spíše pasivním dějem díky pružnosti orgánů dutiny břišní, které bránici vytlačují zpět nahoru. Dýchání probíhá mimovolně, jako automatický proces, lze ho však do jisté míry regulovat naší vůlí, v čemž je mezi ostatními vitálními funkcemi zcela jedinečný. Krevní oběh a krev zabezpečují distribuci kyslíku až do buněk tkání, s následným odváděním oxidu uhličitého a vody (Dylevský, 1996; Merkunová & Orel, 2008; Mourek, 2005). Transport dýchacích plynů závisí na mnoha faktorech, kterými jsou: funkčnost dýchacích cest, složení vdechovaného vzduchu, funkce oběhového aparátu a složení krve. Oběhový a dýchací systém s krví tvoří jeden funkční celek, proto lze při změně či poruše v jednom systému očekávat odezvu druhého (Dylevský, 2019).

#### 2.1.1 Anatomické aspekty

Dýchací ústrojí lze primárně rozdělit na horní a dolní dýchací cesty a plíce. Horní cesty dýchací zahrnují nosní dutinu, vedlejší dutiny nosní a nosohltan (nasopharynx), dolní cesty sestávají z hrtanu (larynx), průdušnice (trachea) a průdušek (bronchi) (Hanzlová & Hemza, 2013). V dýchacích cestách se vyskytuje řasinkový epitel, který produkuje hlen zachycující částice prachu, kmitáním řasinek je pak tento hlen i s nečistotami postupně posouván k ústní dutině. Vzduch se tak při průchodu dýchacími cestami čistí a za pomoci dalších funkcí také zvlhčuje a ohřívá (Mourek, 2005).

Dle Slavíkové a Švíglerové (2012) dělíme dolní dýchací cesty počínaje průdušnicí na konduktivní (vodivou) a respirační zónu. Trachea se v hrudní dutině větví do dvou hlavních průdušek – pravý bronchus v pravé plíci a levý bronchus v levé plíci. Bronchy se dělí nejprve na větve pro jednotlivé plicní laloky a postupně dále na užší průdušinky.

Terminální bronchioly o průměru jen několika desetin milimetru zakončují vodivou zónu dýchacích cest a přecházejí v respirační průdušinky. Toto konečné větvení dýchacích cest nazýváme respirační zónou nebo také terminální respirační jednotkou. Začíná respiračními bronchioly, pokračuje přes alveolární chodbičky a váčky a končí v plicních sklípcích (alveoli), jejichž stěny jsou obklopeny sítí krevních vlásečnic (Dylevský, 1996; Rokyta & Šťastný, 2002; Slavíková & Švíglerová, 2012).

### 2.1.2 Fyziologické aspekty

Dle Bartůňkové (2014) rozlišujeme dýchání na vnější (ventilace) a vnitřní (respirace). Ventilací označuje výměnu vzduchu mezi zevním prostředím a plícemi, respirací pak výměnu plynů, která probíhá mezi plícemi, krví a buňkami (tkáněmi). Dylevský a Slavíková dělí respiraci dále na výměnu plynů mezi vzduchem a krví, za pomoci difuze v plicních sklípcích, a na transport krevních plynů zajišťovaný systémovou cirkulací, označovaný jako vlastní tkáňové (vnitřní) dýchání, kde difuzí probíhá výměna plynů mezi krví, tkáňovým mokem a buňkami (Dylevský, 1996; Slavíková & Švíglerová, 2012).

Princip dýchání spočívá v postupné oxidaci substrátů bohatých na energii (proteiny, tuky, sacharidy) při které se tyto živiny zbavují vodíkových atomů, což doprovází pozvolné uvolňování energie. Tato energie se při bazálních podmínkách zhruba z 56 % uvolňuje formou tepla a ve zbylých 44 % se váže do makroergních fosfátových vazeb a tvoří ATP (adenosintrifosfát). Finální akceptor vodíkových atomů, jenž se uvolnily, je kyslík, který s nimi vytváří vodu. Druhý dýchací plyn – oxid uhličitý pak vzniká spojením kyslíku s opět oxidovaným uhlíkem ze substrátů (Mourek, 2005).

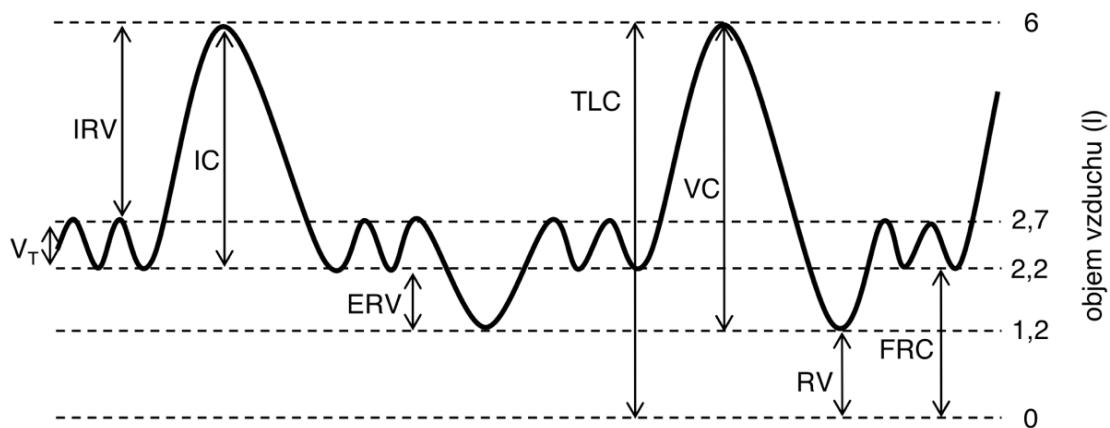
## 2.2 Plicní ventilace

Pro diagnostiku plicní ventilace se používá základní funkční vyšetření plic nazývané spirometrie, které zaznamenává objemy vydechovaného a vdechovaného vzduchu. Z výsledné křivky lze vyhodnotit spirometrické parametry a také stanovit hodnoty plicní ventilace. Ventilační parametry se dělí na *statické*, které vypovídají o základních ventilačních hodnotách a *dynamické*, jenž se stanovují pro zjištění funkční zdatnosti respiračního systému (Slavíková & Švíglerová, 2012). Pro potřeby práce jsou zde blíže popsány pouze parametry statické, které hrají roli ve studiu hypoventilace.

### 2.2.1 Statické parametry

Základní ventilační hodnoty sestávají ze čtyř plicních objemů a čtyř plicních kapacit. Uvedené údaje o hodnotách jsou průměrné a u každého člověka se mohou lišit v závislosti na faktorech, jako je hmotnost, pohlaví, trénovanost, věk a celkový zdravotní stav jedince.

**Dechový objem** ( $V_T$ ) udává množství vzduchu při jednom klidovém nádechu a následném výdechu. Jeho průměrná hodnota je přibližně 500 mililitrů. Z této hodnoty se však k oblasti vlastní respirace dostane pouze okolo 350ml, kvůli mrtvému prostoru dýchacímu. Nad hodnotu klidového nádechu je možné maximálním volným úsilím dodechnout **inspirační rezervní objem** (IRV), který činí kolem 2 až 3 litrů vzduchu. Analogicky lze také po klidovém výdechu volným úsilím vydechnout až do maxima veličinu nazývanou **expirační rezervní objem** (ERV), ten se rovná asi 1-1,5 litru vzduchu (Rokyta & Šťastný, 2002). Součet těchto tří objemů udává **vitální kapacitu plic** (VC) a odpovídá množství vzduchu, které lze, po maximálním nádechu, vydechnout maximálním volným úsilím. Tato hodnota má velkou variabilitu spojenou s pohlavím a trénovaností jedince, u žen se pohybuje okolo 3 až 4 litrů, u mužů činí obvykle 4,5 až 5 litrů. U trénovaných jedinců či v konkrétních profesích vyžadujících práci s dechem (zpěv, hra na dechové nástroje, potápění, sklářství atd.) může dosahovat až sedmi litrů, s věkem však její hodnota obvykle klesá. Po maximálním výdechu zůstává v plicích **reziduální objem** (RV), který nelze vydechnout ani stanovit jeho hodnotu spirometrickým vyšetřením. Činí asi 1,2 litru a s přibývajícím věkem se jeho velikost zvětšuje. Vitální kapacita plic a reziduální objem společně tvoří **celkovou kapacitu plic** (TLC), což se rovná množství vzduchu obsaženého v plicích po hlubokém vdechu. Objem vzduchu vdechnutého maximálním nádechem učiněným po klidném výdechu nazýváme **inspirační kapacita** (IC). Je rovna zhruba 3,5 litrům a udává ji součet dechového objemu a inspiračního rezervního objemu. Posledním statickým parametrem je **funkční reziduální kapacita** (FRC), která zahrnuje reziduální objem a expirační rezervní objem. Udává množství vzduchu, který po klidném výdechu zůstává v plicích a její hodnota se pohybuje kolem 2 litrů (Rokyta & Šťastný, 2002; Slavíková & Švíglerová, 2012). Přehled statických ventilačních parametrů je znázorněn na **Obrázku 1**.



**Obrázek 1:** Statické ventilační parametry (Slavíková & Švíglerová, 2012)

### 2.2.2 Hodnoty plicní ventilace

Spirometrický záznam nám dále umožňuje stanovit hodnoty plicní ventilace, jako je například **dechová frekvence** (df) či **minutová ventilace** (V) jedince.

Výdech a nádech tvoří dohromady jeden dechový cyklus, u zdravého jedince se tento cyklus opakuje 12x až 20x za minutu. Počet vdechů za jednu minutu označujeme jako **dechovou frekvenci** a pokud ji vynásobíme dechovým objemem, dostaneme **minutovou ventilaci**, která nám udává množství vzduchu, jenž za jednu minutu vdechneme či vydechneme. Při klidovém typu dýchání, který se označuje jako **eupnoe**, činí minutová ventilace asi 6 až 8 litrů vzduchu za minutu. Zvýšenou intenzitou zatížení se zvyšuje i dechová frekvence, protože v tkáních roste potřeba získávat kyslík, při spánku se df naopak snižuje. Změny minutové ventilace může zapříčínovat mnoho dalších faktorů, jako jsou například: emoce, nadmořská výška, chemické látky, stres, hormony, teplota a vlhkost prostředí či patologické stavy. Zrychlenou frekvenci dýchání, nazýváme **tachypnoe** a sníženou **bradypnoe**. Úplnou zástavu dechu označujeme jako **apnoe** (Bartůňková, 2014; Slavíková & Švíglerová, 2012).

Faktory, které přímo ovlivňují hladinu kyslíku ( $O_2$ ) a oxidu uhličitého ( $CO_2$ ) v našem těle, jsou tedy rychlost a amplituda ventilace. Aby buňky dostávaly dostatek kyslíku pro zásobování mitochondrií a pro vyloučení přebytečného  $CO_2$ , musí se tyto faktory pohybovat v rozmezí hodnot, které tělu umožní přizpůsobit metabolismus aktuální energetické potřebě. V širokém rozmezí metabolických nároků může tělo udržovat **arteriální saturaci kyslíkem** ( $SaO_2$ ) mezi 96 a 99 % při správné ventilaci, která je v souladu s homeostázou. Pokud dobrovolně změňíme svou frekvenci dýchání,

můžeme tak narušit respirační rovnováhu, což může mít významný dopad na náš organismus. Následky těchto akutních nebo chronických stavů, ať dobrovolně či nedobrovolně navozených nebo patologických, mohou být více či méně závažné (Zappa, 2022). Zrychleným a prohloubeným dýcháním – *hyperventilací* převýší přísun vzduchu aktuální potřeby organismu, což vede k poklesu parciálního tlaku oxidu uhličitého ( $p\text{CO}_2$ ) v alveolech. Zpomaleným a mělkým dýcháním – *hypoventilací*, se přísun vzduchu oproti aktuálním potřebám zmenší, což vede k vzrůstu alveolárního  $p\text{CO}_2$  (Slavíková & Švíglerová, 2012).

### 2.2.3 Alveolární ventilace

Difuze, tedy výměna plynů mezi vzduchem a krví probíhá v již zmíněné konkrétní zóně plic nazývané terminální respirační jednotka, která zahrnuje respirační bronchioly, alveoly, a alveolární chodbičky. *Alveolární vzduch* je označení pro vzduch, který tato respirační zóna obsahuje. Parciální tlak oxidu uhličitého a kyslíku v alveolárním vzduchu je podmíněn především velikostí alveolární ventilace. Než se po nádechu dostane vzduch do oblasti výměny plynů, probíhá jeho transport konduktivní zónou, která se primárně vlastní respirace neúčastní. Tato část dýchacích cest zůstává po vdechu naplněna takzvaným vzduchem *mrtvého prostoru dýchacího*, jehož objem se udává na 150 mililitrů a své označení nese, jelikož se nepodílí na difuzi kyslíku a oxidu uhličitého mezi krví a vzduchem (Bartůňková, 2014; Slavíková & Švíglerová, 2012).

Objem vzduchu, který se dostane do respirační oblasti za jednu minutu stanovujeme jako násobek dechové frekvence s dechovým objemem, ze kterého je nejprve odečten efektivní mrtvý prostor dýchací, a nazýváme ho *alveolární ventilací* ( $V_A$ ). Efektivní neboli *fyzilogický mrtvý prostor* ( $V_D$ ) se u zdravých jedinců v podstatě neliší od anatomického (v konduktivních zónách). Rozdíl mezi nimi nastává při patologických stavech či v situacích, kde je průtok krve plicními kapilárami omezen či zastaven, a nedochází tak v této oblasti k výměně plynů, její objem se tedy z funkčního hlediska přidává k mrtvému prostoru a je označován jako alveolární mrtvý prostor. Při chorobných stavech může být fyzilogický mrtvý prostor dýchací takto zvětšen na jeden až dva litry (Bartůňková, 2014; Slavíková & Švíglerová, 2012).

Pokud budeme provádět rychlé a slabé nádechy, zvýšíme tak dechovou frekvenci a zmenšíme dechový objem, což nám při výpočtu alveolární ventilace sníží její výslednou velikost z důvodu navýšení ventilace mrtvého prostoru, to může způsobit dušnost neboli dyspnoe. Teoreticky by pak v případě, kdy by klesl dechový objem na stejnou hodnotu

jako má fyziologický mrtvý prostor, by alveolární ventilace byla rovna nule. Toto tvrzení však platí pouze v teoretické rovině, protože gravitace ve skutečnosti způsobuje, že distribuce vzduchu není v plicích rovnoměrná, a tak i v případě snížení dechového objemu na 60 až 70 mililitrů existuje slabá alveolární ventilace (Slavíková & Švíglerová, 2012).

#### 2.2.4 Alveolární vzduch

Za fyziologických podmínek je složení alveolárního vzduchu poměrně konstantní. Případné výkyvy jsou ihned upravovány regulačními mechanismy. Fyziologické hodnoty parciálních tlaků oxidu uhličitého a kyslíku označujeme jako normokapnie a normoxii.

V důsledku snížení ventilace (omezené, nepravidelné či povrchní dýchání – hypoventilace) se v alveolárním vzduchu zvyšují hodnoty  $p\text{CO}_2$  a dochází ke stavu zvanému **hyperkapnie**. Toto zvýšení parciálního tlaku jak v alveolárním vzduchu, tak v arteriální krvi zapříčiňuje pokles pH, čímž se prostředí stává kyselější a vzniká tak respirační acidóza. Opačným dějem je **hypokapnie**, která vzniká při zvýšené alveolární ventilaci – hyperventilaci, kdy je obsah, a tedy i parciální tlak oxidu uhličitého, snížen, což způsobuje zvýšení pH a dochází tak k respirační alkalóze. Oba tyto stavy mají významný vliv, protože  $p\text{CO}_2$  hraje důležitou roli v aktivitě dýchacího centra, hyperkapnie tak ventilaci zvyšuje a hypokapnie naopak snižuje.

Pokud jde o parciální tlak kyslíku v tělních tekutinách či alveolárním vzduchu, jeho zvýšení se označuje jako **hyperoxie** a snížení jako **hypoxie**. Poklesem  $p\text{O}_2$  v arteriální krvi, například při výstupech do vyšší nadmořské výšky či hypoventilací, vzniká konkrétní typ hypoxie zvaný **hypoxická hypoxie**, jejichž přínosů se využívá v hypoxickém tréninku (Mourek, 2005; Slavíková & Švíglerová, 2012).

### 2.3 Transport kyslíku

V krvi je transport kyslíku zajišťován dvěma způsoby, z 97 až 99 % je to chemickou vazbou na hemoglobin, kdy vzniká oxyhemoglobin. Zbylé jedno až tři procenta jsou podílem kyslíku fyzikálně rozpuštěného v krvi, jehož molekuly zde tvoří parciální tlak, který je za normálních podmínek roven zhruba 12,5 kPa v arteriální krvi. Tento podíl je však tak malý, že v celkové kyslíkové transportní kapacitě krve je téměř zanedbatelný.

Hlavní roli v transportní kapacitě kyslíku hraje množství hemoglobinu v červených krvinkách (erythrocytech), kdy platí že k jedné molekule hemoglobinu se mohou navázat až 4 molekuly kyslíku. Průměrná koncentrace hemoglobinu v jednom litru krve u mužů

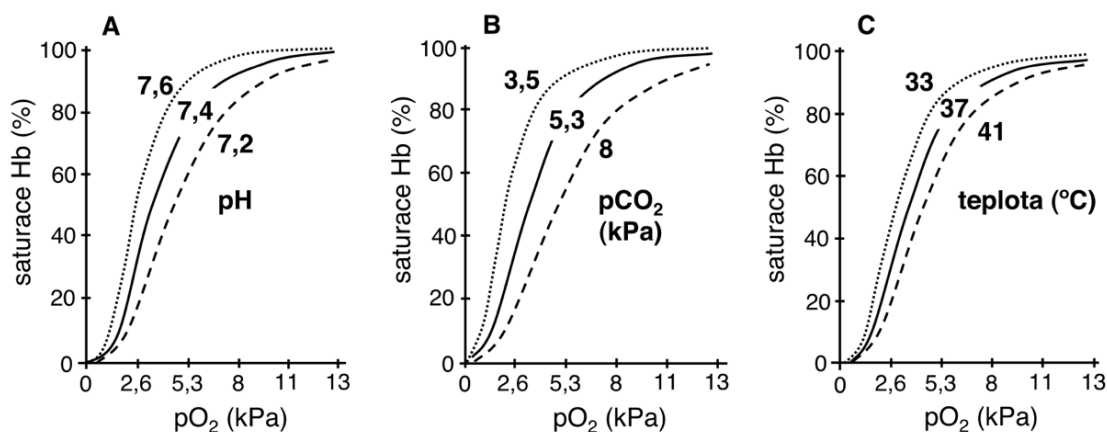
je asi 150 gramů. Každý jeden gram váže zhruba 1,34 mililitrů kyslíku, při plném nasycení tak obsahuje jeden litr arteriální krve kolem 200 mililitrů kyslíku. Tuto hodnotu nazýváme kyslíkovou kapacitou krve. Saturace (nasycení) hemoglobinu je však ovlivňována mnohými faktory, běžně se saturace kyslíkem pohybuje okolo 95 % až 99 %. Primárně se množství kyslíku vázaného na hemoglobin určuje parciálním tlakem kyslíku v krvi, jejich vzájemný vztah je definován vazebnou křivkou charakteristickou svým esovitým zakřivením. Tato křivka zleva doprava představuje, jak hemoglobin váže kyslík a nazýváme ji křivkou asociační. Naopak směr křivky zprava doleva, reprezentuje uvolňování kyslíku z hemoglobinu a nazývá se křivkou disociační (Mourek, 2005; Slavíková & Švíglerová, 2012; Václavek & Macháčková, 2023).

### 2.3.1 Faktory ovlivňující vazebnou křivku hemoglobinu

Stručně by se dalo shrnout, že vazba kyslíku na hemoglobin závisí na parciálním tlaku kyslíku a oxidu uhličitého, koncentraci vodíkových iontů, teplotě organismu a množství 2,3 – difosfoglycerátu (2,3-DPG). Tyto faktory ovlivňují uvolňování kyslíku při průtoku krve tkáňovými kapilárami a přeměnu hemoglobinu na jeho redukovanou formu (deoxyhemoglobin) a taktéž opačně přeměnu deoxyhemoglobinu na oxyhemoglobin v plicích kapilárách. Tkáně s vyšším metabolismem pak navyšují extrakci kyslíku z krve právě díky nižšímu parciálnímu tlaku kyslíku, vyšší koncentraci vodíkových iontů a oxidu uhličitého a vyšší teplotě.

Změny vazebné křivky hemoglobinu (při zachování stejného parciálního tlaku kyslíku) jsou vyobrazeny na **Obrázku 2**.

- A – pH krve
- B – parciální tlak oxidu uhličitého ( $p\text{CO}_2$ )
- C – teplota



**Obrázek 2:** Změny vazebné křivky hemoglobinu (Slavíková & Švíglerová, 2012)

**A** – Jak můžeme vidět na grafu, zvýšením koncentrace vodíkových iontů (tedy poklesem pH) se vazebná křivka hemoglobinu posouvá doprava a dolů. To zapříčiní nižší afinitu (schopnost molekul vázat se a reagovat mezi sebou) hemoglobinu pro kyslík. Pokud v těchto podmínkách stoupne parciální tlak kyslíku ( $pO_2$ ), bude se méně kyslíku vázat na hemoglobin a klesne-li  $pO_2$ , bude se z vazby na hemoglobin uvolňovat více kyslíku.

**B** – Větší obsah oxidu uhličitého posouvá křivku stejným směrem jako pokles pH. Tyto vazebné změny způsobené  $pCO_2$  a pH mají svůj fyziologický význam, protože v krvi tkáňových kapilár je nižší pH a zároveň se při průtoku krve těmito kapilárami zvyšuje  $pCO_2$ . Naopak při průtoku krve plicními kapilárami, kde je pH vyšší, klesá parciální tlak  $CO_2$ . Tyto dva faktory tak zajišťují usnadněné uvolňování kyslíku z vazby na hemoglobin do buněk tkání, kde je ho zapotřebí pro okysličení svalů, a v plicích naopak usnadňují vazbu kyslíku na hemoglobin, aby mohl být dále krví transportován do těla. Tato základní biochemická reakce se nazývá **Bohrův efekt**. (Slavíková & Švíglerová, 2012; Václavek & Macháčková, 2023).

**C** – Změny teploty mají na vazebnou křivku podobný vliv jako  $CO_2$ . Zvýšením teploty se tak křivka opět posouvá doprava a dolů. Pokud provádíme fyzickou aktivitu, stoupá v důsledku svalové práce teplota, což má zase za následek snadnější, a tedy i větší, uvolňování kyslíku z jeho vazby na hemoglobin v krvi protékající tkáňovými kapilárami.

Dalším faktorem, který se podílí na změnách vazebné křivky je malá organická molekula nazývaná se **2,3 – difosfoglycerát** (2,3-DPG). Velké množství této látky je obsaženo v erytrocytech, kde vzniká během jejich metabolismu při procesu anaerobní glykolýzy. 2,3-DPG zapříčiňuje posun křivky směrem doprava a dolů a hraje důležitou roli zejména při hypoxii. Dlouhodobější vystavení hypoxickému stavu totiž navyšuje množství 2,3-DPG v červených krvinkách, a tak se ještě o něco více posouvá vazebná křivka doprava a dolů, což opět podporuje uvolňování kyslíku z hemoglobinu. O významu této látky v adaptacích organismu na hypoxický stav se však stále diskutuje, protože při nízkém alveolárním tlaku kyslíku, snižuje 2,3-DPG schopnost hemoglobinu kyslík vázat (Slavíková & Švíglerová, 2012).



## 2.4 Hypoxický trénink

Hypoxický trénink je dnes již poměrně rozšířenou cvičební metodou pro dosažení lepší výkonnosti. Provádí se buď v přirozeném vysokohorském prostředí, nebo pomocí umělého navození hypoxického prostředí. Existují dva základní způsoby, jak lze hypoxické podmínky simulovat (Hohenauer et al., 2022).

- 1) **Hypobarická hypoxie (HH)**, do té spadá pobyt v nadmořských výškách a vytváří se snížením celkového atmosférického tlaku. Na úrovni moře tak může být HH dosaženo pomocí hypobarických pokojů, komor či stanů.
- 2) **Normobarická hypoxie (NH)**, kde se jedná o snížení obsahu kyslíku při zachování normálního atmosférického tlaku. Prakticky se toho dosahuje za pomoci přimíchávání umělých směsí se sníženým obsahem kyslíku do vdechovaného vzduchu, pobytem v místnostech s omezeným přísunem kyslíku či hypoxickými generátory, řadí se sem také dobrovolná hypoventilace.

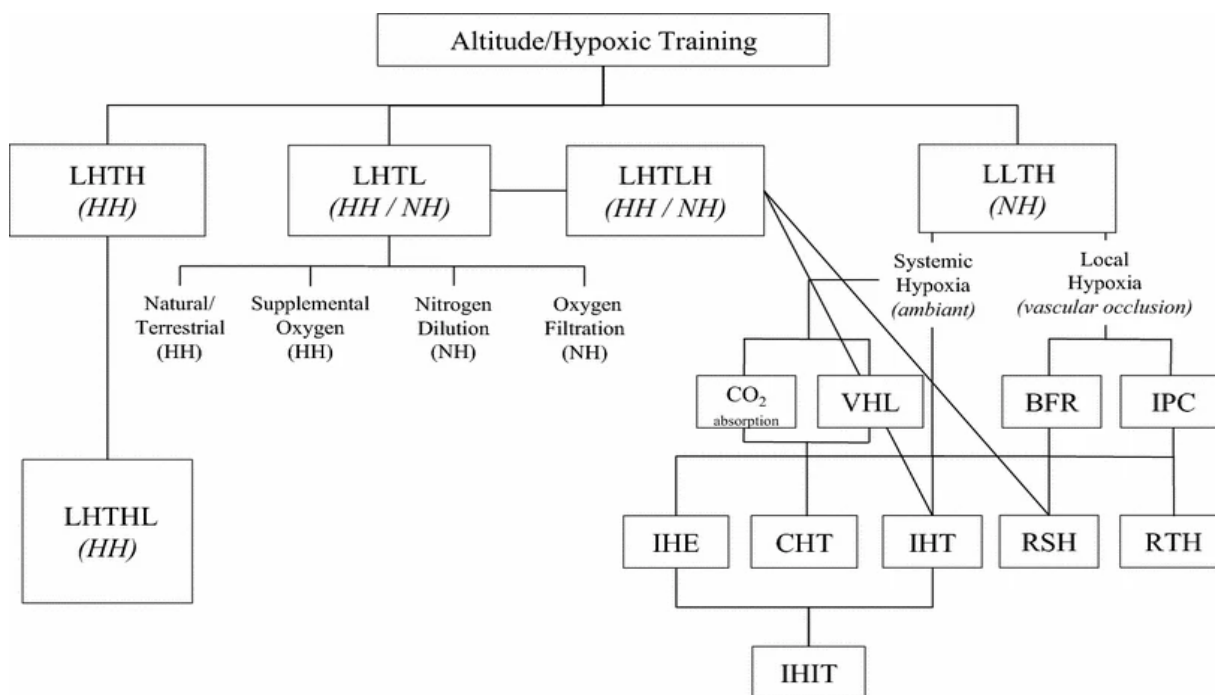
Fyziologické rozdíly vyvolané vystavením jedince buď normobarické hypoxii nebo hypobarické hypoxii jsou stále předmětem mnoha diskusí (Millet & Debevec, 2020). Metaanalýza 13 studií, která porovnávala NH a HH, ukazuje rozdíly v některých proměnných, jako je například minutová ventilace nebo hladina oxidu dusnatého (Coppel et al., 2015). To podporuje názor, že skutečně existují nějaké fyziologické odlišnosti, nicméně existují také určité důkazy naznačující, že toto tvrzení minimálně neplatí pro všechny fyziologické faktory. Například oksyličení mozku a variabilita srdeční frekvence se po expozici jak NH, tak i HH jeví jako podobné (Hohenauer et al., 2022).

### 2.4.1 Přístupy

Dlouhodobé vystavení hypoxickým podmínkám vyvolává zvýšení koncentrace hemoglobinu a počtu červených krvinek, což je považováno za jeden z určujících faktorů vytrvalostního výkonu (Berglund, 1992). Chronická hypoxie má však také škodlivé účinky, proto se uplatňuje několik přístupů a metod, díky kterým lze těžit z přínosů expozice hypoxie bez projevů jejích škodlivých účinků (Woorons et al., 2008).

Základními variantami jsou „Live High-Train High“ (LHTH), Live High-Train Low (LHTL) a Live Low-Train High (LLTH), ke kterým se v roce 2010 přidala ještě metoda „Living High-Training Low and High“ (LHTLH), která v sobě dřívější metody kombinuje (Millet et al., 2010).

Díky normobarické hypoxii je dnes již mnoho dalších strategií hypoxického tréninku. Na začátku 21. století se k nim přidala i **dobrovolná hypoventilace** při funkční reziduální kapacitě plic (VHL), když dva výzkumy prokázaly, že během cvičení s VHL je možné dosáhnout výrazného poklesu arteriální saturace kyslíkem bez vystavení se hypoxickému prostředí (Woorons et al., 2007, 2008). Opakované praktikování VHL během tréninku by tedy představovalo intermitentní hypoxickou expozici (IHE), a mohlo by tak být přirovnáno k intervalovému hypoxickému tréninku (IHT), ačkoli při hypoventilaci dochází navíc ještě k hyperkapnii (Millet et al., 2010). Na schématickém přehledu výškového/hypoxického tréninku (**Obrázek 3**), můžeme pozorovat rozřazení jednotlivých metod včetně dobrovolné hypoventilace (Girard et al., 2017).



**Obrázek 3:** Přehled strategií hypoxického tréninku (Girard et al., 2017)

**Vysvětlivky:** BFR – omezení průtoku krve, CHT – kontinuální hypoxický trénink, CO<sub>2</sub> absorption – dýchání s maskou, HH – hypobarická hypoxie, IHE – intermitentní hypoxická expozice, IHIT – IHE během intervalového tréninku, IHT – intervalový hypoxický trénink, IPC – ischemická prekonkondicace, LHTH – žít vysoko-trénovat vysoko, LHTL – žít vysoko-trénovat nízko, LLTH – žít nízko-trénovat vysoko, LHTHL – žít vysoko-trénovat vysoko a nízko, LHTLH – žít vysoko-trénovat nízko a vysoko, NH – normobarická hypoxie, RSH – opakovaný sprinterský trénink v hypoxii, RTH – odporový trénink v hypoxii, VHL – dobrovolná hypoventilace při funkční reziduální kapacitě plic

Určitým omezením hypoxického tréninku je samotný přístup do vyšších nadmořských výšek, který je v mnoha zemích obtížný, zabere spoustu času a obecně ho nelze zařadit vždy a všude. Řešení tohoto omezení pomocí zařízení, která dokážou hypoxické podmínky vytvořit i na úrovni hladiny moře jsou sice efektivní, ale také poměrně drahá či neskladná (Woorons et al., 2008). Metoda dobrovolné hypoventilace je tak ideálním prostředkem, který chyběl v hypoxickému tréninku, jelikož ji lze praktikovat vždy a všude bez jakéhokoliv přídavného zařízení.

## 2.5 Dobrovolná hypoventilace

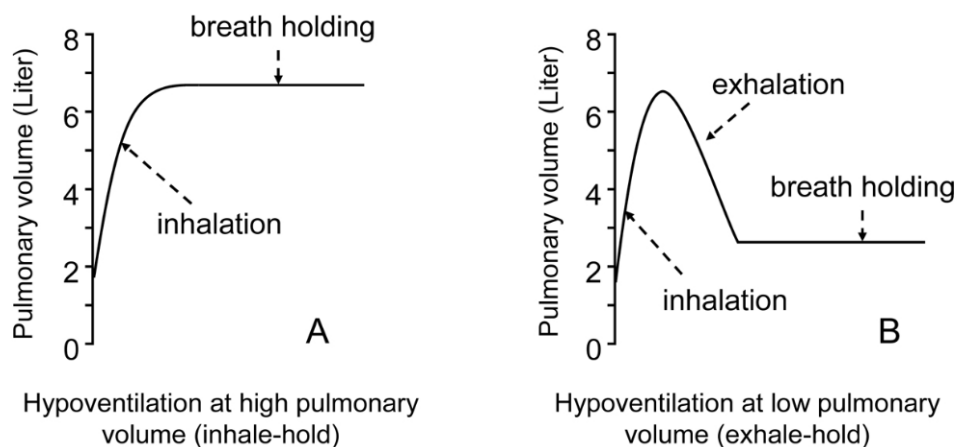
Jako hypoventilaci popisujeme stav, při kterém se koncentrace oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) a kyslíku (O<sub>2</sub>) dostane mimo normální hodnoty, protože se do plic dostává menší množství vzduchu (Woorons, 2014a). Hypoventilace může být běžně vyvolána různými zdravotními problémy, jako je například poškození hrudní stěny či ochrnutí dýchacích svalů, objevovat se může také u některých obézních pacientů či po užívání konkrétních léčiv. Kromě zdravotních příčin však může dojít k hypoventilaci i v případě, kdy jedinec úmyslně snižuje svou frekvenci dýchání a vědomě tak omezuje přísun vzduchu do organismu, což pak označujeme jako *dobrovolnou hypoventilaci* (Woorons, 2013). Právě přechodné a dobrovolné navozování tohoto stavu může přinášet pozitivní účinky na zdraví a výkon jedince, kdy lze při cvičení dosáhnout podobného efektu jaký navozuje vystavení hypoxii. Toho se využívá u *hypoventilačního tréninku*, který aplikuje střídání fází zadržování dechu s fázemi normálního dýchání během fyzické aktivity (Woorons, 2014a; Zappa, 2022).

Dle doktora Xaviera Wooronse je hypoventilační trénink inovativní a přirozenou tréninkovou metodou, která při správné aplikaci může pomoci sportovcům zvýšit jejich výkonnost při zachování respektu k zásadám sportovní etiky (Woorons, 2013). V závislosti na ročním období, objemu tréninku v průběhu týdne, úrovni konkrétního sportovce a sledovaném cíli, by měla být dobrovolná hypoventilace zařazena do cvičebního plánu jednou až třikrát týdně. První pozitivní účinky pak mohou být patrné už po 7 až 8 trénincích, nicméně významnější efekty se obvykle projevují až po nejméně dvanácti tréninkových jednotkách (Woorons, 2014a).

### 2.5.1 Formy

Dobrovolnou hypoventilaci lze provádět dvěma základními způsoby – při funkční reziduální kapacitě plic (VHL) nebo při celkovém plicním objemu (VHH), což v praxi znamená jednoduše buď po výdechu, nebo po nádechu. Autoři tyto techniky uvádějí jako: „voluntary hypoventilation at low lung volume“ (dobrovolná hypoventilace při nízkém objemu plic) nebo „voluntary hypoventilation at high lung volume“ (dobrovolná hypoventilace při vysokém objemu plic) (Woorons, 2014a).

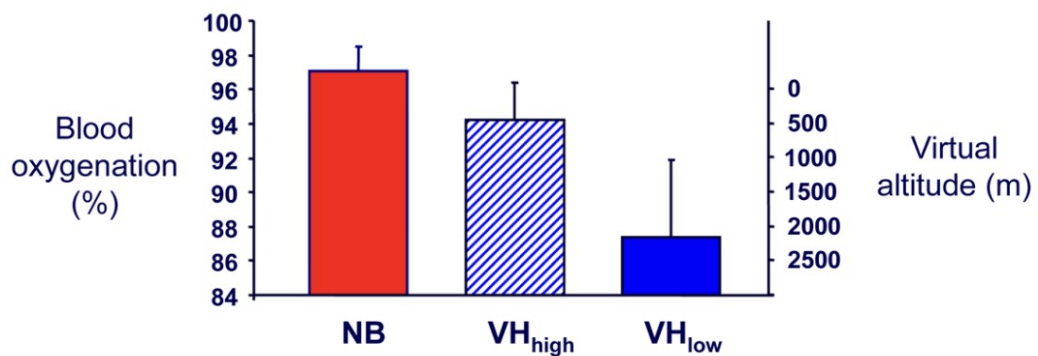
- 1) **VHH** spočívá v udržování maximálního množství vzduchu v plicích během fáze zadržetí dechu. Subjekty provádí zadržetí ihned po vdechu technikou zvanou „inhale-hold“. (**Obrázek 4–A**)
- 2) **VHL** provádí zádrž dechu s částečně prázdnými plicemi. Subjekty při použití této techniky nejprve vydechnou a poté zadrží dech na několik sekund. Jedná se také o techniku zvanou „exhale-hold“, což by se dalo přeložit jako vydechni-drž. (**Obrázek 4–B**)



**Obrázek 4:** *Formy hypoventilace* (Woorons, 2013)

Vědecké studie provedené univerzitou v Paříži ukázaly, že pouze hypoventilace při nízkém plicním objemu může vyvolat jak zvýšení koncentrace CO<sub>2</sub>, tak pokles O<sub>2</sub> v krvi a svalech (Woorons et al., 2010). Cílem dechově deprivačního tréninku je pak kombinovat tyto hyperkapnické a hypoxické účinky, jež jsou zároveň v tomto cvičení nezbytné pro dosažení fyziologických adaptací, které umožňují zlepšit výkonnost. Dobrovolná hypoventilace s plnými plicemi, která je hojně užívána hlavně mezi plavci

(viz 2.7), vyvolává pouze zvýšení koncentrace CO<sub>2</sub> ale nezpůsobuje dostatečný pokles saturace kyslíkem (Woorons, 2014a). Úroveň okysličení krve, naměřenou po cvičení prováděném na úrovni hladiny moře, a její odpovídající dosazenou (virtuální) nadmořskou výšku při zařazení technik VHH a VHL oproti NB můžete vidět v grafu na **Obrázku 5**. Z grafu je patrné, že při správném použití techniky zadržetí dechu po výdechu (VHL), je možné dosáhnout podobného snížení okysličení krve, jaké by nastalo ve výškách nad 2000 m (Woorons, 2013).



**Obrázek 5:** Míra okysličení krve při hypoventilaci na úrovni hladiny moře (Woorons, 2013)

### 2.5.2 Princip

Při praktikování dobrovolné hypoventilace na hranici funkční reziduální kapacity plic stoupá množství CO<sub>2</sub> v plicních alveolech, což vede ke zvýšení alveolárního parciálního tlaku oxidu uhličitého (pCO<sub>2</sub> se pohybuje kolem 50 mmHg). Retence tohoto plynu značí hyperkapnii, která vede k poklesu pH, a tedy k respirační acidóze. Oxid uhličitý a kyslejší krev způsobí díky Bohrovu efektu (viz. 2.3.1) snadnější uvolňování kyslíku z vazby na hemoglobin. CO<sub>2</sub> má zároveň vliv na dilataci cév, čímž je zajištěn přísun většího množství okysličené krve do buněk (Nestor, 2021; Slavíková & Švíglerová, 2012). Trénink hypoventilace vyvolává také těžkou hypoxemii (saturace kyslíkem se pohybuje kolem 87 %). V těle se tak odehrává nejen respirační acidóza, ale také metabolická acidóza, protože nedostatek kyslíku nutí buňky k alternativním procesům získávání energie, tedy k anaerobní glykolýze, která je spojena s produkcí laktátu, který může částečně tvořit kyselinu mléčnou, čímž se opět snižuje pH okolí. Tato celková souhra hypoxie, hyperkapnie a krevní acidózy je rozhodující pro vyvolání metabolického stresu, který spouští pufrovací kapacitu svalových buněk (schopnost buněk vyrovnávat se s výkyvy pH) (Zappa, 2022).

### 2.5.3 Účinky

Teoretické účinky hypoventilace při sportu by z hlediska popsanych principů a reakcí v organismu mohly způsobovat hned několik prospěšných adaptací. Ukazuje se také, že se tyto změny mohou ještě násobit, čím déle provádíme dobu zádrže dechu. Vždy bychom však měli techniku hypoventilace provádět s rozmyslem a ve „zdravé míře“, abychom dbali na své bezpečí (viz 2.6.4). Pro přehlednost je zde popis konkrétních účinků rozdělen do čtyř oblastí.

#### 1) Glykolytický metabolismus

Hypoventilační trénink vyvolal v několika případech zvýšenou koncentraci laktátu v krvi, což může nasvědčovat zlepšení glykolytického metabolismu. Tato adaptace by mohla vést k efektivnější tvorbě ATP, a tedy k pozitivním dopadům na energetické zásoby svalů.

#### 2) Pufrovací kapacita svalů

Při praktikování metody dobrovolné hypoventilace se stimuluje aktivace nárazníkových systémů (pufrů), díky poklesu pH, což připravuje a adaptuje svaly na neutralizaci překyselení spojeného s hromaděním laktátu. Zlepšuje se tak reakce svalů na anaerobní acidifikaci. Zvýšená pufrovací kapacita svalů pak může oddálit překyselení při běžném tréninku, což by zmenšilo svalovou únavu a mohlo posílit výkonnost.

#### 3) Využití kyslíku

Trénovat a posilovat se při VHL mohou i samotné dýchací svaly. V důsledku toho pak pracují silněji a hospodárněji, což znamená že mají menší spotřebu kyslíku, čímž zůstává k dispozici více kyslíku pro ostatní svalové tkáně. Tento faktor by mohl být přínosný pro celkovou výkonnost a mohla by se také zlepšit reoxygenace svalů ve fázích zotavení.

#### 4) Psychologické aspekty

Kromě fyziologické odezvy má dobrovolná hypoventilace zaznamenán i psychologický účinek v podobě zlepšení psychické odolnosti vůči stresu. To může být zvláště přínosné pro sportovce, kteří se musí potýkat se stresovými situacemi při kterých čelí akutním nedostatkům kyslíku, jako jsou například podvodní fáze plaveckých závodů nebo hromadné starty v triatlonu (Holfelder & Becker, 2018; Zappa, 2022).

Ze zmíněných důvodů může trénink dobrovolné hypoventilace při funkční reziduální kapacitě plic nabízet nový přístup ke zlepšování výkonů a urychlení následné regenerace svalů. Jako tréninkovou metodu ho lze aplikovat v různých sportovních

disciplínách, a to zejména v těch, které vyžadují intenzivní krátkodobé nebo střednědobé úsilí s trváním od několika desítek sekund po zhruba deset minut. Vhodný je také pro sporty zaměřené na rychlost jako je například atletika, plavání, cyklistika nebo vodní sporty. Využití si najde u bojových sportů, které mohou techniku aplikovat jako součást fyzické přípravy a u kolektivních sportů, kde jsou obecně klíčové krátké a intenzivní výkony. Hypoventilační trénink je také vhodný pro disciplíny, které vyžadují fyzickou námahu v nadmořských výškách nad 1000 metrů (Woorons, 2013).

Tato metoda však vyžaduje určité úsilí, protože acidóza může ztížit provádění cvičení a subjekty tak bývá vnímána jako poměrně bolestivá až velmi bolestivá. Vynaložené úsilí však nedosahuje maximální intenzity, jako při některých soutěžích nebo během velmi náročných tréninků (Woorons, 2014a). Pokud by metoda VHL způsobovala metabolickou odezvu i při vynaložení menšího fyzického úsilí, jevila by se také jako ideální prostředek pro zraněné sportovce neschopné tréninku při maximální intenzitě. Zapojením této techniky by si mohli uměle ztížit náročnost tréninku a udržet tak požadovanou anaerobní zátěž (Zappa, 2022).

#### **2.5.4 Bezpečnost**

Při správném provádění nepředstavuje hypoventilační trénink větší riziko než jiné druhy náročného tréninku. Dlouhodobý nedostatek kyslíku však může být sám o sobě pro tělo velmi nebezpečný, nejcitlivější jsou na přísun kyslíku buňky mozku, které bez něj vydrží maximálně kolem 3 až 5 minut, po uplynutí této doby hrozí nenávratná poškození mozku. Je tedy potřeba tuto techniku aplikovat v přiměřeném rozsahu a nezacházet do extrémů. Příliš dlouhé zadržování dechu navíc vede k rychlému vyčerpání a představuje zbytečná rizika, kdy může člověk z nedostatku kyslíku upadnout do bezvědomí. Délku výdechu a následného zadržování dechu je třeba přesně odměřovat podle intenzity cvičení a přizpůsobit ji úrovni okysličení, kterého chceme při tréninku dosáhnout. Další fyziologické změny, ke kterým dochází během hypoventilačního tréninku by mohly způsobit problémy zejména u některých rizikových osob. Kvůli zvyšování srdeční frekvence a krevního tlaku se obecně hypoventilace nedoporučuje jedincům, kteří trpí těžkou či středně těžkou hypertenzí, mají srdeční onemocnění či problémy s plícemi. Kromě toho může hyperkapnický efekt tréninku způsobovat bolesti hlavy, které se objevují v závislosti na intenzitě cvičení a konkrétní toleranci jedince (Woorons, 2013; Zappa, 2022). Studie Jonville et al. (2002) naznačuje, že vystavení

hyperkapnii může zhoršovat funkci dýchacích svalů. Toto zhoršení má však větší klinický význam spíše u pacientů s chronickou obstrukční nemocí plic.

## 2.6 Hypoventilační trénink a sport v kontextu historie

Metodu dobrovolné hypoventilace lze v historii nalézt pod mnohými pojmy, kterých při svém vývoji, a skrze její praktikování různými sportovci napříč světem, nabývala. Princip této techniky však zůstával stejný a spočíval v dobrovolném omezování dechu.

Jeden z prvních známých průkopníků dobrovolného omezování dýchací frekvence byl v polovině dvacátého století český běžec *Emil Zátopek*. Čtyřnásobný olympijský vítěz, který překonal 18 světových rekordů, si pro svůj trénink vyvinul vlastní metody, které mu umožňovaly získat výhodu nad protivníky. Aby posílil svou plicní kapacitu a simuloval podmínky závodů, Zátopek pravidelně během svých tréninků i vycházek zadržoval dech a postupně se takto snažil překonávat co největší vzdálenosti. Prodlužoval svůj čas bez dechu až tak, že jednou upadl do bezvědomí. Tou dobou se v éře empirického cvičení nevědělo, zda je tento způsob tréninku skutečně účinný a kvůli extrémům, do kterých ho Zátopek praktikoval, se ani nepovažoval za zcela bezpečný (Woorons, 2013).



**Obrázek 6:** *Emil Zátopek – průkopník omezeného dýchání*  
(převzato z <https://www.olympijskytym.cz/athlete/emil-zatopek>)



Do popředí zájmu se tak trénink omezeného dýchání dostává až téměř o dvacet let později díky olympijským hrám v Mexiku roku 1968. Nižší koncentrace kyslíku a snížená hustota vzduchu, způsobená nadmořskou výškou, ve které se hry konaly (2340 metrů), vyvolala pokles výkonnosti ve vytrvalostních disciplínách, jako jsou plavání, cyklistika či běhy na dlouhé a střední tratě, a naopak poskytla výhodu disciplínám, které vyžadovaly krátké intenzivní úsilí, tedy skoky, vrhy, vzpírání či běhy na krátké vzdálenosti, což vedlo také ke vzniku mnoha světových rekordů (ČOV; Girard et al., 2017). V návaznosti na dominanci výškově aklimatizovaných soutěžících se hypoxický trénink stal populárnějším nejen mezi individuálními vytrvalostními sportovci, ale také podnítl počátky vědeckého výzkumu jeho účinků (Millet et al., 2019). **James Counsilman**, světově proslulý americký trenér plavání a vědec, tehdy vyslovil hypotézu, že by plavci mohli napodobit vysokohorské podmínky dobrovolným snížením své dechové frekvence. Během 70. let se tato technika, tehdy nazývaná jako „*hypoxický trénink*“, stala v plavání velmi populární. Counsilman trénoval své svěřence v zádrži dechu až na devět temp a byl přesvědčen, že časem se díky tomu jejich tělo naučí využívat kyslík efektivněji, což jim umožní plavat rychleji. Americký plavecký tým na olympijských hrách v Montrealu roku 1976 pod jeho vedením získal tři čtvrtiny všech medailí, z toho třináct zlatých. Jeho plavci vytvořili po dobu jeho kariéry světové rekordy v každé mužské disciplíně (*Dr. James E. 'Doc' Counsilman (USA)*, 2021).

V osmdesátých letech se objevily tréninkové postupy s hypoventilací i v atletice. Podporoval je brazilský trenér Luiz Alberto de Oliveira, jehož svěřenci byli například olympijský vítěz v běhu na 800 m z roku 1984 – Joaquim Cruz, či mistryně světa v běhu na 1500 a 3000 metrů z roku 1983 – Mary Decker. Oliveira do tréninku jednou týdně zařazoval cvičení se zadržováním dechu, která spočívala v běhu bez předchozího nádechu či v zadržení dechu na posledních desítkách metrů tréninkové série, pro simulaci závodní únavy. Přestože tento druh cvičení byl již racionálnějším použitím hypoventilace, stále nebyl ukotven na solidních vědeckých poznacích (Woorons, 2013).

V osmdesátých a devadesátých letech proběhlo několik studií o tréninku s omezeným dýcháním, avšak jejich výsledky nepotvrzovaly očekávané hypotézy. Prokázalo se, že tento druh tréninku sice zvyšuje koncentraci oxidu uhličitého v těle, ale nijak výrazně nesnižuje koncentraci kyslíku, nemůže tedy simulovat výškový efekt a na výkon tak nemá téměř žádný vliv. Navzdory těmto zjištěním byl trénink s dechovou deprivací i nadále hojně užívaný plavci a stal se klasickou metodou mylně označovanou jako hypoxický trénink. Holmer a Gullstrand, stejně jako Dicker a kol. tento trénink

ve svých studiích označili spíše jako *hyperkapnický*, vzhledem k nárůstu oxidu uhličitého (Dicker et al., 1980; Holmer & Gullstrand, 1980). Studie zrealizovaná o deset let později uvádí, že aby se u techniky dýchání se sníženou frekvencí vytvořila skutečná hypoxemie musela by se provádět v mírné nadmořské výšce (Lee et al., 1990).

O průlom ve zkoumání účinků hypoventilačního tréninku se zasloužil až počátkem jednadvacátého století doktor *Xavier Woorons*. Francouzský výzkumník a odborník na fyziologii cvičení vyslovil hypotézu, že pokud by se zadržování dechu provádělo s menším množstvím vzduchu v plicích, mohlo by to vést k výraznému poklesu okysličení krve. Výzkum účinků hypoventilace se totiž dosud vždy realizoval při celkové plicní kapacitě, tedy při „vysokém objemu plic“. Woorons provedl sérii vlastních vědeckých studií s technikou nazvanou „*exhale-hold*“ a výsledky byly velmi příznivé. Ukázalo se, že dobrovolná hypoventilace prováděná po výdechu, kdy jsou plíce naplněny menším množstvím vzduchu, může během různých forem cvičení markantně snížit koncentraci kyslíku v krvi i svalech a způsobit tak kýžený hypoxický účinek. Najednou bylo možné čerpat přínosy tréninku v nadmořské výšce až kolem dvou tisíc metrů bez opuštění úrovně hladiny moře a bez použití nákladných přístrojů (Nestor, 2021; Woorons, 2013). Následný výzkum v posledních letech potvrdil předběžná zjištění a prokázal, že hypoventilační trénink při nízkých objemech vzduchu v plicích, tedy na hranici funkční reziduální kapacity plic je výhodný při sportech a aktivitách, které vyžadují pravidelné nebo přerušované intenzivní úsilí a představuje tak inovativní metodu fyzické přípravy či tréninku, která si najde využití u mnoha sportovců ve velkém množství různorodých disciplín (Woorons, 2014a).

### 3 CÍLE A ÚKOLY

Cílem této bakalářské práce je vytvořit systematický přehled novodobých studií zabývajících se účinky dobrovolné hypoventilace na vybrané fyziologické ukazatele spojené s výkonem ve sportu. Z jejich výčtu vyvodit možnosti a míru využití zkoumané techniky ke zlepšení fyzické zdatnosti.

#### **Úkoly:**

- 1) Zpracování teoretických východisek obsahujících základní informace o dýchání s detailnějším zaměřením na účinky omezeného dýchání a jeho možnosti využití ve sportu jako techniku dobrovolné hypoventilace.
- 2) Pomocí internetových databází WoS, PubMed, Scopus a EBSCOhost najít odborné články a studie zkoumající problematiku účinku hypoventilačního tréninku, navozeného dobrovolnou hypoventilací, na sportovní výkon.
- 3) Vyselektovat relevantní studie a zpracovat je do tabulek.
- 4) Tabulky přehledně rozdělit dle zkoumaného účinku.
- 5) Vyhodnocení a vyvození závěru z výsledků.

## 4 METODY PRÁCE

Práce je vedena jako přehledová studie zkoumané problematiky, a to v souladu s doporučeními PRISMA statement (Page et al., 2021). Zdrojem informací byly odborné články a studie publikované v období od roku 2003 do současnosti, tedy jde o souhrn vědomostí o hypoventilačním tréninku za posledních dvacet let. Pro vyhledávání relevantních podkladů byly použity následující elektronické databáze: *PubMed*, *Web of Science* (WoS), *Scopus* a *EBSCOhost*.

Rešerše v databázích byla provedena za pomoci klíčových slov a booleovských operátorů. Pro zajištění co nejpřesnějšího vyhledávání mezi početnými studiemi o dechu bylo uskutečněno několik zkušebních hledání, ze kterých vyplynulo, že zkoumanou dechovou techniku lze nejlépe specifikovat pod pojmy: „voluntary hypoventilation“ a „hypoventilation training“. Pro požadované zaměření studií na sportovní výkon bylo poté zadáno více klíčových slov, a to včetně vybraných základních sportovních disciplín ve kterých je tato technika nejčastěji zkoumána, abychom byli schopni pokrýt širokou oblast sportovního výkonu. Vzhledem k častému výskytu studií a článků, které se zabývají astmatem či jinými dýchacími obtížemi, a nejsou tak relevantní k tématu, bylo vyhledávání doplněno o operátor NOT, který zajistil vyloučení nejčastějších zdravotních problematik s dechem. V jednotlivých databázích se kritéria vyhledávání lišila z důvodu odlišné povahy každého z nástrojů. Přesný výpis klíčových slov a jejich kombinací použitých při hledání v konkrétních databázích je uveden v **Tabulce 1**. Další potenciální studie byly vyhledávány v bibliografiích relevantních studií.

### 4.1 Kritéria pro zařazení

- Cílem zkoumání je vliv dobrovolné hypoventilace na fyziologické parametry spojené s výkonem ve sportu.
- Zkoumání pouze zdravých a aktivně sportujících jedinců a skupin.
- Zkoumání pouze techniky hypoventilace prováděné na hranici funkční reziduální kapacity plic nebo při reziduálním objemu.
- Detailní zpracování.
- Randomizovaná nebo nerandomizovaná prospektivní studie.

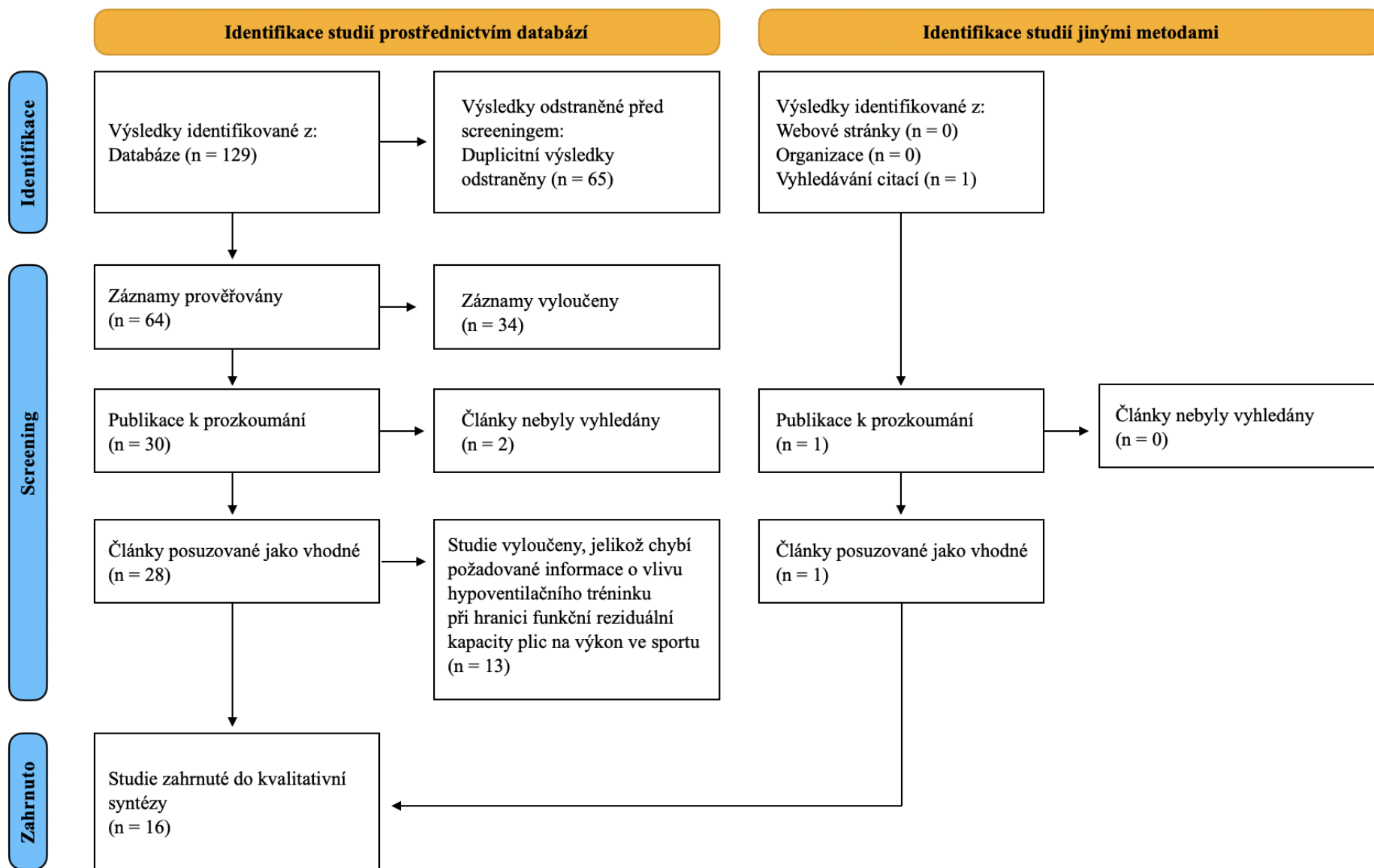
**Tabulka 1:** Seznam klíčových slov a operátorů použitých k vyhledávání a počet nalezených studií.

Databáze	Klíčová slova a použité operátory	n
Web of Science	(ALL=("voluntary hypoventilation*")OR ALL=("hypoventilation training*")) AND (ALL=(performance*)OR ALL=(endurance*) OR ALL=(sport*)OR ALL=(swim*) OR ALL=(cycling*)OR ALL=(athletics*)OR ALL=("voluntary breath*hold*")) NOT (ALL=(asthma*)OR ALL=(arrhythmia*)OR ALL=(atrophy*))	26
Pub Med	((("voluntary hypoventilation") OR ("hypoventilation training") OR ("low lung volume"))) AND (("sport* performance") OR (performance) OR (endurance) OR (swim*)) NOT ((atrophy*) OR (asthma*) OR (disease*))	34
EBSCOhost	((("voluntary hypoventilation" OR "Hypoventilation* training*") AND (sport* OR performance* OR endurance))	48
Scopus	( TITLE-ABS-KEY ( "voluntary hypoventilation*" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "hypoventilation training*" ) OR TITLE-ABS-KEY ( "low lung volume" ) ) AND ( TITLE-ABS-KEY ( sport* ) OR TITLE-ABS-KEY ( performance ) ) AND NOT ( ALL ( asthma* ) OR ALL ( arrhythmia* ) OR ALL ( atrophy* ) )	21

Pomocí výše zmíněných klíčových slov bylo nalezeno celkem 129 potencionálních článků a studií. Po odstranění 65 duplicitních publikací bylo dle kritérií pro zařazení vybráno 15 intervenčních studií, které odpovídaly zkoumané problematice. Jeden další článek byl vyhledán studiem literárních zdrojů vyhledaných publikací. Flow diagram dle PRISMA je uveden na **Obrázku 7**.

Nezařazené články a studie většinou neodpovídaly zkoumané problematice, sledovaly jiný cíl, nebo se již jednalo o přehledové studie či meta-analýzy. Vyřazeny byly také publikace, ve kterých byla dechová technika použita k léčbě poruch a onemocnění či byla hypoxie navozena jinak než hypoventilací prováděnou na hranici funkční reziduální kapacity nebo při reziduálním objemu.

Zařazené studie byly zpracovány do přehledných systematických tabulek níže, ve kterých jsou uvedeny konkrétní parametry studie, popis výzkumných skupin, metody a výsledky.



Obrázek 7: Flow diagram dle PRISMA (Page et al., 2021)

## 5 VÝSLEDKY

Systematický přehled obsahuje celkem 16 vybraných studií zkoumané problematiky, z toho se jich 9 zaměřuje na dlouhodobý efekt hypoventilačního tréninku a zbylých 7 na zkoumání akutních účinků hypoventilace při sportu. Základní informace, cíle jednotlivých výzkumů a specifikace probandů studií jsou zaznamenány v tabulkách společných pro všechny studie. Podle účinku pak byly pro dlouhodobé a akutní studie vytvořeny samostatné tabulky, obsahující vždy popis intervence a výsledné změny v proměnných. Celkově obsahuje výsledková část sedm komentovaných tabulek – první tři společné, zbylé čtyři po dvou rozdělené na studie dlouhodobé a akutní. V každé tabulce jsou články vzestupně řazeny dle roku, ve kterém se uskutečnily.

K rozlišení jednotlivých studií je na začátku každé tabulky uvedeno vždy příjmení prvního autora studie společně s rokem, ve kterém byla studie uskutečněna. Dvě publikace v přehledu jsou v těchto konkrétních základních informacích totožné, pro jejich odlišení bylo proto za rok uskutečnění přidáno písmeno „a“ či „b“.

Nejstarší zařazená studie se datuje do roku 2007 a nejnovější do roku 2022, obě tyto studie, stejně jako většina ze zařazených studií (celkem 13), byly uskutečněny ve Francii, zbylé 3 vybrané studie pocházejí z Německa, Švýcarska a Kanady. Podle typu se intervenční studie v přehledu dělí na randomizované kontrolní studie (RCT), kterých bylo zahrnuto osm, jednu nerandomizovanou kontrolní studii (NRCT), tři jednoskupinové studie (SGT) a čtyři jednoskupinové studie s cross-over designem. Tyto základní informace ke všem studiím obsaženým v systematickém přehledu jsou vypsány v Tabulce 2.

**Tabulka 2:** *Základní informace o zařazených studiích zabývajících se účinkem hypoventilace*

Studie	Rok	Stát	Design	Efekt
Woorons	2007	Francie	SGT	akutní
Woorons	2008	Francie	NRCT	dlouhodobý
Woorons	2010	Francie	Cross-over	akutní
Woorons	2011	Francie	Cross-over	akutní
Woorons	2014	Francie	SGT	akutní
Stavrou	2015	Řecko	RCT	dlouhodobý
Woorons	2016	Francie	RCT	dlouhodobý
Woorons	2017	Francie	SGT	akutní
Trincat	2017	Švýcarsko	RCT	dlouhodobý
Fornasier-Santos	2018	Francie	RCT	dlouhodobý
Woorons	2019a	Francie	RCT	dlouhodobý
Woorons	2019b	Francie	Cross-over	akutní
Woorons	2020	Francie	RCT	dlouhodobý
Lapointe	2020	Kanada	RCT	dlouhodobý
Woorons	2021	Francie	Cross-over	akutní
Brocherie	2022	Francie	RCT	dlouhodobý

Cíle se v jednotlivých studiích lišily hlavně z hlediska sledování dlouhodobého nebo akutního účinku. Při posuzování dlouhodobých účinků si všichni autoři dali za cíl určit vliv cvičení s dobrovolnou hypoventilací na výkonnost a porovnat je s podobným cvičením při normálním dýchání. Studie, které zkoumaly akutní účinek hypoventilace, měly nejčastěji za cíl zjistit míru okysličení svalové tkáně při provádění techniky VHL. Jedna ze studií zacílila na porovnání účinků jednotlivých forem hypoventilace – VHL a VHH. Další jedna studie měla též ojedinělý cíl, a to rozlišit příslušné role, které hraje v účincích VHL hyperkapnie a hypoxie. Zjistit účinek hypoventilace na jiné konkrétní fyziologické ukazatele bylo cílem dvou dalších studií z nichž se jedna zaměřila na okysličení mozku a druhá na kardiovaskulární reakce. Výpis jednotlivých cílů dlouhodobých i akutně zaměřených studií je uveden v **Tabulce 3**.



**Tabulka 3:** *Cíle jednotlivých studií zařazených do systematického přehledu*

Studie	Rok	Cíl studie
Woorons	2007	Zhodnotit účinky prodlouženého výdechu (PE) prováděného až po reziduální objem (RV) během submaximálního cvičení a vyhodnotit účinky této techniky na výkon.
Woorons	2008	Zkoumat účinky tréninku s dobrovolnou hypoventilací (VH) při funkční reziduální kapacitě (FRC) na výkonnost.
Woorons	2010	Posoudit účinky prodlouženého cvičení s přerušovanou VH prováděnou při FRC na koncentraci laktátu v krvi a okysličení svalů. Rozlišit příslušnou roli hypoxie a hyperkapnie.
Woorons	2011	Zjistit roli hypoxie na kardiovaskulární reakce během prodloužené zátěže s dobrovolnou hypoventilací při FRC.
Woorons	2014	Stanovit a porovnat účinky VHL a VHH na arteriální saturaci kyslíkem (SpO <sub>2</sub> ) u plavců prostřednictvím nové techniky měření pomocí vodotěsného snímače na čele.
Stavrou	2015	Prozkoumat vliv tréninku s přerušovaným zadržováním dechu (IBH), který může zahrnovat období RBF a apnoe, na dechové parametry, arteriální saturaci kyslíkem a výkonnost při závodním plavání s ploutvemi a porovnat ho se stejným tréninkem prováděným s vlastní volbou frekvence dýchání (SBF).
Woorons	2016	Zjistit účinky pětítýdenního tréninku s VHL při supramaximální intenzitě na plaveckou výkonnost a porovnat je se stejným tréninkem prováděným za normálních dechových podmínek.
Woorons	2017	Prozkoumat akutní reakce na opakované sprintové cvičení (RSE) v hypoxii, vyvolané dobrovolnou hypoventilací při funkční reziduální kapacitě plic (VHL).
Trincat	2017	Posoudit, zda RSH s dobrovolnou hypoventilací při FRC může vylepšit celkovou schopnost v opakovaných sprintech (RSA) ve větší míře než stejný trénink prováděný za podmínek normálního dýchání.
Fornasier-Santos	2018	Zjistit účinky tréninku opakovaného sprintu v hypoxii vyvolané VHL na RSA u hráčů týmových sportů.
Woorons	2019a	Zkoumat účinky tréninku opakovaných sprintů (RS) při hypoxii vyvolané dobrovolnou hypoventilací při FRC (RSH-VHL) na fyziologické adaptace, RSA a anaerobní výkonnost.

Woorons	2019b	Zjistit akutní účinky opakovaných sprintů v člunkových bězích s VHL na mozkovou a svalovou oxygenaci.
Woorons	2020	Prozkoumat, zda trénink vysoké intenzity s dobrovolnou hypoventilací při FRC v cyklistice může zlepšit běžecký výkon u sportovců v týmových sportech.
Lapointe	2020	Zkoumat vliv tréninku člunkového běhu prováděného s VHL na RSA a na výkon v intermitentním testu zdatnosti.
Woorons	2021	Posoudit vliv běžeckých cvičení při různé intenzitě se zadržím dechu na konci výdechu (EEBH) až do bodu zlomu na okysličení svalů.
Brocherie	2022	Posoudit vliv opakovaného sprintového tréninku v hypoxii vyvolané VHL na RSA mimo led u hráčů ledního hokeje.

---

Zahrnuté studie celkem shromáždily data od 270 probandů, žádná intervence se nezaměřovala pouze na ženy a celkově tak bylo 9 mužských a 7 smíšených skupin. Z celkového počtu účastníků bylo pouze 35 ženského pohlaví, zbytek (235) byli muži. Účastníci studií byli vždy buď aktivní rekreační sportovci, či dobře trénovaní závodníci v různých sportovních disciplínách. Nejčastěji zastoupenými sportovními odvětvími byly týmové sporty, triatlon a plavání. Jediná studie se zaměřila na elitní sportovce, konkrétně na plavce s ploutvemi. Dvakrát byli pak zkoumáni běžci a po jedné studii cyklisté a bojovníci Jiu-Jitsu. Průměrný věk u jednotlivých intervenčních skupin se pohybuje okolo 25 let, kdy nejmladšímu zúčastněnému bylo kolem 14 let a nejstaršímu kolem 45 let. Podmínky, dle jakých účastníci hypoventilaci prováděli, se od sebe v jednom případě lišily názvem, ale shodovaly se v postupech. U studií, kde byli účastníci rozdělení do skupin, je vedle podmínky uveden také název skupiny v závorce. Pouze tři studie měly o něco rozdílné podmínky oproti technice VHL jak jí popisuje Woorons (Woorons, 2014a). Kompletní přehled informací o výzkumných skupinách a podmínkách hypoventilace je vypsán v **Tabulce 4**.

**Tabulka 4:** Informace o účastnících studie a podmínkách hypoventilace

Studie	Rok	Výzkumná skupina	n	Pohlaví	Věk	Podmínky
Woorons	2007	Triatlonisté	10	M	27,1 (±8,1)	PE/NB
Woorons	2008	Středně trénovaní běžci	15	M	27,1 (±6,0) *	VHL (HYPO) NB (CONT)
Woorons	2010	Fyzicky aktivní rekreační sportovci	8	M	29,3 (± 6,4)	VHL/NB VHL v hyperoxii NB v hypoxii
Woorons	2011	Fyzicky aktivní rekreační sportovci	7	M	29,8 (±6,5)	VHL/NB NB v hypoxii
Woorons	2014	Závodní plavci a triatlonisté	10	M/Ž	29,2 (± 8,4)	VHL/VHH/NB
Stavrou	2015	Elitní plavci s ploutvemi	28	M/Ž	15,8 (±1,0) *	RFB (IBH) NB (SBF)
Woorons	2016	Triatlonisté	16	M/Ž	32,5 (±10,7) *	VHL (VHL) NB (CONT)
Woorons	2017	Dobře trénované osoby	9	M/Ž	27,2 (± 9,3)	VHL/NB
Trincat	2017	Závodní plavci	16	M/Ž	15,6 (±1,8) *	VHL (RSH-VHL) NB (RSN)
Fornasier-Santos	2018	Vysoce trénovaní hráči ragby	35	M	18,3 (± 1,3)	VHL (RSH-VHL) NB (RSN)
Woorons	2019a	Závodní cyklisté	18	M	34,6 (± 11)	VHL (RSH-VHL) NB (RSN)

Woorons	2019b	Vysoce trénovaní bojovníci Jiu- Jitsu	10	M/Ž	19,2 (± 2,3)	RSN/RSH-VHL
Woorons	2020	Soutěžící v týmových sportech	20	M	19,5 (± 1)	VHL (VHL) NB (CONT)
Lapointe	2020	Basketbalisté z univerzitního klubu	17	M/Ž	22,3 (± 1,2)	VHL (VHL) NB (CONT)
Woorons	2021	Průměrně až dobře trénovaní běžci	8	M	27,1 (± 9)	EEBH/NB
Brocherie	2022	Hráči ledního hokeje	43	M	16,9 (±1,4) *	VHL (RSH-VHL) NB (RSN)

\*u intervenční skupiny; PE – prodloužený výdech až do reziduálního objemu, NB – normální dýchání, VHL – dobrovolná hypoventilace při funkční reziduální kapacitě plic, VHH – dobrovolná hypoventilace při celkové kapacitě plic, RFB – omezená frekvence dýchání, RSH-VHL – opakované sprinty prováděné v hypoxii s použitím techniky VHL, RSN – opakované sprinty v normoxii, EEBH – zadržování dechu po výdechu, IBH – přerušované zadržování dechu, SBF – vlastní volba dýchací frekvence

Všechny intervence ve studiích zaměřených na dlouhodobý efekt VH probíhaly na úrovni hladiny moře. Nejkratší studie trvala 2 týdny a nejdelší 16 týdnů. Cvičení byla do programu sportovců zařazována vždy nejméně dvakrát týdně. Ve čtyřech případech byla náplní intervencí běžecká cvičení, třikrát prováděly subjekty plavecké tréninky a dvě intervence probíhaly na bicyklovém ergometru. V trénincích byla volena různá intenzita cvičení a často byl zařazován sprint. Detailněji popsanou podobu a délku jednotlivých dlouhodobých intervencí obsahuje **Tabulka 5**.

**Tabulka 5:** Popis jednotlivých intervencí v dlouhodobých studiích

Studie	Rok	Popis intervence	Délka
Woorons	2008	3 x týdně 55 min běžecká cvičení. 1) 15 min při 60 % rychlosti odpovídající $VO_{2max}$ 2) 24 min při 70 % rychlosti $VO_{2max}$ – NB vs. VHL 3) 15 min při 60 % rychlosti $VO_{2max}$	4 týdny

Stavrou	2015	5–6 x týdně 120 min plavecká cvičení. 1) 2 x 10 x 50 m plavecké apnoe při 80 % rychlosti nejlepšího individuálního výkonu 2) 15 x 100 m při 70 % rychlosti nejlepšího individuálního výkonu na 100 metrech 3) 20 x 25 m plavecké apnoe při 80-90 % rychlosti nejlepšího individuálního výkonu	16 týdnů
Woorons	2016	2 x týdně 12 až 20 x 25 m kraulem vpřed 1) CONT s normálním dýcháním 2) VHL s hypoventilací při FRC	5 týdnů
Trincat	2017	3 x týdně 2 série po 16 × 15 m sprint kraulem vpřed 1) RNS obě série s normálním dýcháním 2) RSH-VHL obě série s hypoventilací při FRC - série odděleny 20 min. aktivního zotavení při nízké intenzitě	2 týdny
Fornasier-Santos	2018	2 x týdně 8 až 16 x 40 m sprint při maximální rychlosti 1) RSN s normálním dýcháním 2) RSH-VHL s hypoventilací při FRC - 30 s odpočinek mezi sprinty - 3 min. odpočinku při chůzi mezi sériemi	4 týdny
Woorons	2019a	2 x týdně 6 až 8 x 6 s sprinty na cyklo ergometru 1) RSN s normálním dýcháním 2) RSH-VHL s hypoventilací při FRC	3 týdny
Woorons	2020	2 x týdně 3 x 8 při 150 % výkonu v 3 min. testu na cyklo ergometru 1) CONT s normálním dýcháním 2) VHL s hypoventilací při FRC	3 týdny
Lapointe	2020	2 x týdně 3 série po 6 až 8 x 6 s sprint 1) CONT s normálním dýcháním 2) VHL s hypoventilací při FRC - 3 min. aktivního odpočinku mezi sériemi	4 týdny
Brocherie	2022	2 x týdně 2 až 3 série po 6 až 8 x 40 m sprint při maximální rychlosti 1) RSN s normálním dýcháním 2) RSH-VHL s hypoventilací při FRC - 30 s odpočinek mezi sprinty - 3 min. odpočinku při chůzi mezi sériemi	5 týdnů

---

VO<sub>2max</sub> – maximální objem kyslíku, FRC – funkční reziduální kapacita plic

---

Hlavní proměnná sledovaná dlouhodobými studii byla výkonnost a k jejímu zlepšení po intervenci došlo v osmi z devíti případů. Pouze v jediné studii zůstaly ukazatele aerobní výkonnosti po hypoventilačním tréninku nezměněny. Studie, které měřily koncentraci laktátu v krvi, se ve výsledcích rozcházejí, tři studie uvádějí nezměněnou koncentraci laktátu, zatímco intervenční skupina triatlonistů, která do svých tréninků zařazovala dvakrát týdně supramaximální plavecké cvičení, vykazovala při měření podstatně vyšší hodnoty laktátu. Stejně tak uvádí zvýšení maximální hodnoty laktátu v krvi i dvoutýdenní studie, při které byly třikrát týdně prováděny plavecké sprinty. Všechny studie, které ve svých výsledcích prezentují arteriální saturaci kyslíkem, zaznamenaly významný pokles v jejích hodnotách. Výsledky a výpis dalších proměnných jednotlivých studií zaměřených na dlouhodobý vliv hypoventilace jsou uvedeny v **Tabulce 6**.

**Tabulka 6:** *Výsledné proměnné studií zkoumajících dlouhodobý účinek hypoventilace*

Studie	Rok	Hlavní výsledky	Změny proměnných
Woorons	2008	Čtyřtýdenní trénink s dobrovolnou hypoventilací při FRC nezměnil ukazatele aerobní výkonnosti. Cvičením VHL se snížila krevní acidóza.	Tlak O <sub>2</sub> na konci nádechu ↓ VO <sub>2max</sub> ↔ Laktát v krvi ↔ pH ↑ Rychlost při laktátovém prahu ↔
Stavrou	2015	Trénink s IBH ve srovnání s tréninkem s SBH významně zlepšil výkonnost v plaveckých testech s ploutvemi.	Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ Respirační parametry ↑ Srdeční frekvence ↔ Čas v plaveckých testech na 50 a 400 m ↓
Woorons	2016	Trénink s VHL při supramaximální intenzitě vedl ke zlepšení plavecké výkonnosti.	Průměrný počet opakování na sérii ↔ Průměrný čas opakování ↔ Subjektivní pocit námahy ↑ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ Srdeční frekvence ↔ Koncentrace laktátu v krvi ↑
Trincat	2017	RSH s VHL zlepšil RSA při plavání. Tato inovativní metoda umožnila navodit výhody spojené s hypoxií během plaveckého tréninku v normoxii.	Počet sprintů ↑ Maximální koncentrace laktátu v krvi ↑ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓

Fornasier-Santos	2018	Ve skupině RSH-VHL se počet sprintů absolvovaných během testu RSA po tréninkovém období významně zvýšil oproti RNS, kde zůstal nezměněný.	Maximální rychlost ↔ Průměrná rychlost ↔ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ Počet sprintů ↑
Woorons	2019a	Šest tréninků RSH-VHL vedlo k významnému zlepšení RSA i Wingate testu.	Anaerobní výkonnost ↑ Spotřeba kyslíku ↑ Okysličení svalové tkáně ↔ Laktát v krvi ↔ Srdeční frekvence ↔
Woorons	2020	Vysoce intenzivní cyklistický trénink s VHL vedl ke zlepšení v testu RSA.	Výkon v testech ↑ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ Anaerobní výkonnost ↔ Index únavy ↓
Lapointe	2020	Trénink opakovaných člunkových sprintů v kombinaci s VHL zlepšil test RSA.	Maximální rychlost ↔ Koncentrace draslíku ↓ Laktát v krvi ↔ Reoxygenace svalů během zotavení ↑
Brocherie	2022	Hokejisté po absolvování pětítýdenního opakovaného sprintového tréninku s VHL zlepšili svou výkonnost v testu RSA více než skupina s NB.	Maximální rychlost ↔ Průměrná rychlost ↑ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓

---

Statisticky významné ↑ = zvýšení hodnoty; ↓ = pokles v hodnotě; ↔ = nezměněná hodnota

---

Intervence studií zaměřujících se na akutní účinky hypoventilace byly taktéž ve všech sedmi případech prováděny na úrovni hladiny moře, jednalo se tedy opět o normobarickou hypoxii. Nejčastěji byla do intervencí zařazena cvičení na bicyklovém ergometru – celkem čtyřikrát. Zbýlé tři tréninkové postupy obsahovaly plavecký trénink, člunkové sprinty a běhy na běžecím ergometru. Ve studii, kde porovnávali efekt hypoxie a hyperkapnie, bylo do intervence zařazeno také cvičení v uměle navozené hyperoxii a hypoxii. Variabilita zvolené intenzity cvičení mezi studii byla poměrně velká a vyskytovala se i v rámci jednotlivých intervencí. Přehled cvičení v těchto intervencích je uveden v **Tabulce 7**.

**Tabulka 7: Informace o intervencích studií zaměřených na akutní efekt hypoventilace**

Studie	Rok	Protokol cvičení	Popis intervence
Woorons	2007	Maximální zátěžový test na cyklo ergometru. Cvičení na seznámení s technikou PE. 3 x 5 minut cvičení na bicyklovém ergometru	1. Výkon při 70 % $VO_{2max}$ – NB 2. Výkon při 70 % $VO_{2max}$ – PE 3. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – PE - 45 min. odpočinku mezi výkony
Woorons	2010	Maximální zátěžový test na cyklo ergometru. Cvičení na seznámení s technikou VHL. 3 x 5 minut cvičení na bicyklovém ergometru rozložené ve dvou dnech.	1. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – NB 2. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – VH 3. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – VH v hyperoxii ( $F_{iO_2}$ 0,29) 4. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – NB v hypoxii ( $F_{iO_2}$ 0,157) - 4 hod. odpočinku mezi výkony ve stejný den
Woorons	2011	Maximální zátěžový test na cyklo ergometru. Cvičení na seznámení s technikou VHL. 3 x 5 minut cvičení na bicyklovém ergometru rozložené do dvou dnů. Celková doba zátěže byla 18 min.	1. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – NB 2. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – VH 3. Výkon při 65 % $VO_{2max}$ – NB v hypoxii ( $F_{iO_2}$ 0,157) - Mezi sériemi přechodná jednominutová období s NB - 4 hod. odpočinku mezi výkony ve stejný den
Woorons	2014	Dvě sezení na seznámení s technikou VHL. 400m kraul při maximální rychlosti. 3 sezení po 10 x 50 m čelně kraulem	1. 95 % rychlost 400 m – NB 2. 95 % rychlost 400 m – VHL 3. 95 % rychlost 400 m – VHL - sezení oddělena 48-72 hod. - odpočinek 12 s NB po každých 50 m
Woorons	2017	Sezení na seznámení s testovacími postupy a technikou VHL. 2 testy po 2 sériích na bicyklovém ergometru 8 x 6 s sprint.	1. 95 % max. výkonu – NB 2. 95 % max. výkonu – VHL - 24 s neaktivní zotavení mezi sprinty - 3 min. pasivní odpočinek po sérii
Woorons	2019b	Seznámení s testováním a technikou VHL. 2 tréninky po 2 setech 8 x 6 s sprintů tam a zpět na tatami.	1. 8 x 6 s sprint při maximálním výkonu (all-out) – NB 2. 8 x 6 s sprint (all-out) – VHL - tréninky odděleny 24 hod. - 3 min. pasivní odpočinek po setu



Woorons	2021	Maximální inkrementální test 3 x 2 cvičení (první s VHL, po 45 min. druhé s NB) na běžecím ergometru. 10-12 běžecích sérií	1. 60 % maximální aerobní rychlosti (MAV) 2. 80 % MAV 3. 100 % MAV - aktivní odpočinek u 60 % MAV - pasivní odpočinek u 80 % a 100 % MAV
---------	------	--	--

Výsledky studií zaměřených na akutní účinky hypoventilace se ve společných proměnných shodují v poklesu arteriální saturace kyslíkem a snížení pH. Pokles okysličení svalové tkáně potvrdily 3 studie, zatímco ve studii, kde subjekty prováděly člunkové sprinty, zůstal tento parametr bez signifikantní změny. Rozdílly se dále objevují v hodnotách srdeční frekvence, laktátu v krvi, produkce oxidu uhličitého či ve spotřebě kyslíku. Zvýšení laktátu v krvi bylo naměřeno jak po plaveckých sprintech, tak po cvičení na bicyklovém ergometru při submaximální intenzitě, tato hodnota však zůstala nezměněna u téměř totožného cvičení na bicyklovém ergometru, které ovšem bylo prováděno rozdílnou technikou dobrovolné hypoventilace, kdy subjekty vydechovaly až na hranici reziduálního objemu plic a poté nezadržovaly dech. Výsledky studií uvádějící hodnoty srdeční frekvence se z poloviny dělí na ty, kde srdeční frekvence vzrostla a ty, u kterých zůstala beze změny. Výsledky a další proměnné intervenčních studií, které se zaměřovaly na akutní efekt hypoventilace jsou uvedeny v **Tabulce 8**.

**Tabulka 8:** Výsledné proměnné studií zkoumajících akutní efekt hypoventilace

Studie	Rok	Hlavní výsledky	Změny proměnných
Woorons	2007	Opakované PE až do RV během 70 % výkonu vedly k poklesu $S_{aO_2}$ až na 87 %, byly rovněž doprovázeny výraznou hyperkapnií.	Spotřeba kyslíku ↑ Srdeční frekvence ↑ Arteriální tlak $CO_2$ ↑ Arteriální tlak $O_2$ ↓ Arteriální saturace $O_2$ ↓ Alveolární tlak $O_2$ ↓ pH ↓ Laktát v krvi ↔
Woorons	2010	Cvičení s VH vyvolalo nižší okysličení tkání a vyšší koncentraci laktátu v krvi než cvičení s NB	Arteriální tlak $CO_2$ ↑ Arteriální tlak $O_2$ ↓ pH ↓ Laktát v krvi ↑ Okysličení svalové tkáně ↓

Woorons	2011	Delší cvičení s VH vedlo k vyšší srdeční aktivitě nezávisle na hypoxickém efektu.	Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ pH ↓ Srdeční frekvence ↑ Srdeční výdej ↑ Systolický objem srdce ↑ Transport kyslíku ↔ Spotřeba kyslíku ↔ Sympatická modulace srdce ↑
Woorons	2014	U plavců se při použití techniky exhale-hold zvýšila koncentrace laktátu v krvi. Pouze prováděním VHL, ale už ne VHH byla navozena hypoxie na úrovni hladiny moře.	Anaerobní glykolýza ↑ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ Srdeční frekvence ↔ Spotřeba kyslíku ↓ Dechový objem ↑ Tlak CO <sub>2</sub> na konci nádechu ↑ Tlak O <sub>2</sub> na konci nádechu ↓ Produkce CO <sub>2</sub> ↓ Laktát v krvi ↑
Woorons	2017	Provádění opakovaných sprintových cvičení (RSE) s VHL vedlo k větší arteriální a svalové deoxygenaci než při zachování podobného výkonu s NB.	MPO ↔ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ Srdeční frekvence ↑ Dechový objem ↑ Produkce CO <sub>2</sub> ↑ Minutová ventilace ↔
Woorons	2019b	Opakované člunkové sprinty s VHL vyvolaly větší pokles okysličení mozku ve srovnání s NB. Navzdory tomuto jevu nedošlo ke zhoršení výkonnosti.	Spotřeba kyslíku ↑ Srdeční frekvence ↔ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓ Okysličení svalové tkáně ↔ Okysličení mozku ↓ Výsledné časy sprintu ↔
Woorons	2021	Opakovaná běžecká cvičení s EEBH až do bodu zlomu vyvolaly velký a časný pokles okysličení svalů ve srovnání se stejným cvičením s NB.	Srdeční frekvence ↔ Arteriální saturace O <sub>2</sub> ↓

---

MPO – maximální energetický výdej; statisticky významné ↑ = zvýšení hodnoty; ↓ = pokles v hodnotě; ↔ = nezměněná hodnota

---

## 6 DISKUSE

Tato bakalářská práce zkoumala výsledky studií, které se zabývají účinkem techniky dobrovolné hypoventilace a jejím vlivem na vybrané fyziologické aspekty spojené se sportovním výkonem. Hypoxický trénink je dnes již poměrně rozšířenou metodou při zlepšování fyzické výkonnosti, kdy existují důkazy, že intenzivní cvičení ve vysoké nadmořské výšce stimuluje svalové adaptace pro aerobní i anaerobní cvičení a omezuje pokles výkonu, a je tak hojně využíván sportovci z mnoha odvětví (Millet et al., 2010). K možnostem navození normobarického hypoxického stimulu se nově přidala i technika dobrovolné hypoventilace při funkční reziduální kapacitě plic, která v sobě kombinuje hypoxické a hyperkapnické stimuly.

Z prezentovaných výsledků můžeme říci, že cvičení s technikou dobrovolné hypoventilace při funkční reziduální kapacitě plic vyvolává pokles arteriální saturace kyslíkem, což potvrdily všechny zařazené studie, které tuto hodnotu měřily. Osm studií, které zkoumaly dlouhodobý účinek dobrovolné hypoventilace, prokázaly statisticky významné zlepšení anaerobní výkonnosti v důsledku zařazení tréninkové intervence s VHL. Za zmínku stojí zvláště výrazný příklad tohoto zlepšení u studie realizované s profesionálními hráči ragby, kteří během 4 týdnů praktikování VHL zvýšili svůj výkon až o 64 % ve srovnání s kontrolní skupinou, kde činilo zlepšení pouze 6 % (Fornasier-Santos et al., 2018).

Dvě studie, které se zaměřovaly na testování vytrvalosti, tedy aerobního výkonu, prezentují rozporuplné výsledky. U první studie se po třítydenní intervenci, skládající se z šesti tréninků při supramaximální intenzitě na bicyklovém ergometru, zvýšil výkon v testu YYIR1, který se považuje za spolehlivé a validní měřítko aerobní zdatnosti. Zároveň se zvýšil počet opakovaných sprintů při testu RSA, ale obě tréninkové intervence nezměnily běžeckou anaerobní výkonnost při časovém testu (all-out) na 200 m (Woorons et al., 2020). Naopak v druhé studii, skládající se z dvanácti běžeckých tréninků s VHL, při submaximální intenzitě, po dobu čtyř týdnů nedošlo k výraznému zlepšení ukazatelů aerobní výkonnosti jako jsou  $VO_{2max}$ , laktátový práh nebo doba do vyčerpání při 100 %  $VO_{2max}$ . Tato studie však uvádí snížení acidózy krve vyvolané po cvičení s VHL, což by mohlo být způsobeno zlepšením svalové pufráční kapacity, což může mít významný pozitivní vliv na anaerobní výkonnost (Woorons et al., 2008).

Hlavním přínosem hypoventilačního tréninku by mohlo být zlepšení odolnosti svalů vůči acidóze, k níž dochází během sprintů či závodů, kde převažuje anaerobní metabolismus. Tomu by mohla nasvědčovat zvýšená koncentrace laktátu ve svalech, kterou ve svých výsledcích uvedly čtyři studie ze systematického přehledu. Ačkoli koncentrace laktátu ve svalech a v krvi závisí na řadě faktorů, vyšší hodnoty laktátu by mohly odrážet právě zvýšenou glykolýzu a produkci pyruvátu. Technika VHL by tak mohla zvýšit schopnost provádět opakované sprinty nebo intenzivní zátěže s trváním od třiceti sekund do několika minut.

Zajímavým předmětem k diskusi je také využití techniky omezování dechu různými sportovními odvětvími. Lavin et al. (2015) například ve své studii, prováděné s technikou omezené frekvence dýchání (RBF), prezentuje zlepšení nejen výkonnosti a ekonomiky běhu u profesionálních běžců, ale také u plavců, což naznačuje, že metodika tréninku s omezením dechu by se dala použít ve více sportovních odvětvích. Tuto hypotézu podporuje i jedna ze zahrnutých studií, kde šest sezení vysoce intenzivního tréninku s VHL prováděného na bicyklovém ergometru zlepšilo běžeckou schopnost v opakovaných sprintech u hráčů kolektivních sportů (Woorons et al., 2020).

Hojně debatovaným tématem je také srovnání účinků VHL oproti účinkům hypoxického tréninku. Studie z roku 2022 porovnávala vysoce intenzivní intervalový trénink s technikou dobrovolné hypoventilace oproti stejnému cvičení v hypoxických podmínkách a ve svých výsledcích uvádí, že při VHL došlo k menšímu poklesu arteriální saturace kyslíkem než u skupiny vystavené hypoxické expozici (Imai et al., 2022). Tomu odporuje jedna ze zařazených studií, která nezaznamenala statisticky významnou odlišnost v arteriální saturaci kyslíkem při submaximálním výkonu mezi skupinou s VHL a skupinou s normálním dýcháním v hypoxickém prostředí (Woorons et al., 2010). Tato odlišnost by mohla být vysvětlena použitím jiné hypoxické směsi, nebo jinou zvolenou intenzitou cvičení.

Společným limitem většiny uvedených studií je nemožnost vyloučení placebo efektu, jelikož jsou si subjekty vědomi toho, že provádí metodu dobrovolné hypoventilace, díky které by mohli dosáhnout lepší výkonnosti. Při absenci fyziologických měření či biologických analýz, tak může být nárůst výkonnosti po VHL přisuzován alespoň částečně právě placebo efektu. Jedna ze studií tento problém vyřešila umístěním svých subjektů při provádění intervence do normoxické místnosti, přičemž kontrolní skupině bylo sděleno, že jsou v místnosti navozeny normobarické hypoxické podmínky odpovídajících nadmořské výšce 3000 m. Členům skupiny, která prováděla

cvičení s VHL bylo řečeno, že jsou v místnosti během jejich tréninku normoxické podmínky. Obě skupiny si tak byly vědomy toho, že během tréninku mohou zažívat hypoxický efekt. Tento postup měl také další výhodu, která spočívala v eliminaci nocebo efektu u subjektů, které byly zařazeny do kontrolní skupiny místo do skupiny VHL (Woorons et al., 2020).

Limitace této práce může být spatřována v zařazení jedenácti studií od stejného autora, z celkového počtu šestnácti studií vybraných do systematického přehledu. Xavier Woorons se aktivně snaží prosazovat metodu dobrovolné hypoventilace, výsledky by tak mohly být zkreslené, jelikož z velkého hlediska nabízí pohled tohoto konkrétního autora, to však může být spatřováno také jako výhoda, protože by mohly být studie lépe porovnatelné mezi sebou. Dalším limitem je neustálené pojmenování konkrétní prezentované techniky, což mohlo vést k opomenutí určitých studií stejné tematiky, jen odlišného názvu při vyhledávání zdrojů k práci. Autorka se toto omezení snažila co nejvíce zmírnit pomocí důkladného zkoumání literárních zdrojů z již vyhledaných relevantních studií. Ze stejného důvodu se u studií omezeného dýchání často liší i použité metodologie, což znemožňuje zcela posoudit a objektivně zhodnotit účinnost a možnost využití VHL pro sportovce.

Celkově hovoří výsledky uvedených studií na téma dobrovolné hypoventilace při funkční reziduální kapacitě plic spíše ve prospěch účinnosti této techniky, a to jak v rekreačním, tak i vrcholovém sportu. Pro závodní sportovce se trénink VHL jeví jako ideální doplňující komponent tréninkové přípravy, poskytující větší variabilitu tréninku a možnost dosažení výraznějšího stimulu výkonu i při relativně nízkém zatížení. Díky své jednoduché aplikaci, která nevyžaduje žádné speciální vybavení ani konkrétní místo, kde by měl trénink být prováděn, může být metoda VHL užitečnou alternativou k výškovému tréninku.

## 7 ZÁVĚR

V práci je představena technika dobrovolné hypoventilace a jsou zde popsány konkrétní možnosti, jak by teoreticky mohla ovlivňovat fyziologické funkce z hlediska modifikování dechu. V praktické části práce jsou prezentovány studie zkoumající akutní efekty VHL na vybrané fyziologické ukazatele a studie dlouhodobých účinků sledovaných po několikátýdenním zařazení této techniky do tréninku.

Na základě vědecký výsledků studií zrealizovaných v posledních dvaceti letech můžeme konstatovat, že hypoventilační trénink se jeví jako efektivní způsob, jak dosáhnout lepší výkonnosti v různých sportovních odvětvích, zejména v těch vyžadujících intenzivní krátkodobé až střednědobé úsilí. Nicméně dodnes stále nejsou objasněny všechny faktory spojené s praktikováním a přínosem VHL a vědci se pouze domnívají jaké pochody a adaptace v těle způsobuje, což souvisí i s problematikou výzkumu hypoxického tréninku obecně, je tedy potřeba výsledky prezentovat s opatrností. Obecně lze říci, že technika dobrovolné hypoventilace stojí za pozornost sportovců, kteří jsou připraveni posouvat své hranice ne zcela příjemným, ale zato výjimečným tréninkem, který jim může zajistit lepší anaerobní výkonost a potenciálně i zvýšenou psychickou odolnost.

Do budoucna by se studie mohly zaměřit na stále sporný, možný přínos hypoventilace na vytrvalostní výkon a zároveň upevnit vědecké poznatky o účincích techniky VHL na organismus. Například je ještě zapotřebí prozkoumat, která forma a intenzita vede k nejmarkantnějšímu zlepšení a zda, a případně jak, jsou za to zodpovědné mechanismy působení na molekulární úrovni. Zajímavý směr výzkumu vyvstává ještě u psychologických účinků hypoventilačního tréninku, které byly dosud zkoumány pouze v malém měřítku.

## 8 BIBLIOGRAFIE

- Bartůňková, S. (2014). *Fyziologie člověka a tělesných cvičení*. Nakladatelství Karolinum.
- Berglund, B. (1992). High-Altitude Training. *Sports Medicine*, 14(5), 289-303. <https://doi.org/10.2165/00007256-199214050-00002>
- Brocherie, F., Cantamessi, G., Millet, G. P., & Woorons, X. (2023). Effects of repeated-sprint training in hypoxia induced by voluntary hypoventilation on performance during ice hockey off-season. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 18(2), 446-452, Article 17479541221079531. <https://doi.org/10.1177/17479541221079531>
- Coppel, J., Hennis, P., Gilbert-Kawai, E., & Grocott, M. P. W. (2015). The physiological effects of hypobaric hypoxia versus normobaric hypoxia: a systematic review of crossover trials. *Extreme Physiology & Medicine*, 4(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s13728-014-0021-6>
- ČOV. *Emil Zátopek - profil sportovce*. <https://www.olympijskytym.cz/athlete/emil-zatopek>
- ČOV. *Olympijské hry Mexico City 1968*. <https://olympics.com/en/olympic-games/mexico-city-1968>
- Dicker, S. G., Lofthus, G. K., Thornton, N. W., & Brooks, G. A. (1980). Respiratory and heart rate responses to tethered controlled frequency breathing swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(1), 20-23.
- Dr. James E. 'Doc' Counsilman (USA). (2021). <https://ishof.org/honoree/honoree-dr-james-e-doc-counsilman/>
- Dylevský, I. (1996). *Základy funkční anatomie člověka* (Vol. 1). Fakulta tělesné výchovy a sportu UK.
- Dylevský, I. (2019). *Somatologie pro předmět Základy anatomie a fyziologie člověka* (Vol. 3). Grada Publishing, a.s.
- Flaherty, G., O'Connor, R., & Johnston, N. (2016). Altitude training for elite endurance athletes: A review for the travel medicine practitioner. *Travel Med Infect Dis*, 14(3), 200-211. <https://doi.org/10.1016/j.tmaid.2016.03.015>
- Fornasier-Santos, C., Millet, G. P., & Woorons, X. (2018). Repeated-sprint training in hypoxia induced by voluntary hypoventilation improves running repeated-sprint

- ability in rugby players. *European Journal of Sport Science*, 18(4), 504-512.  
<https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1431312>
- Girard, O., Brocherie, F., & Millet, G. P. (2017). Effects of Altitude/Hypoxia on Single- and Multiple-Sprint Performance: A Comprehensive Review. *Sports Medicine*, 47(10), 1931-1949. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0733-z>
- Hanzlová, J., & Hemza, J. (2013). *Dýchací soustava (apparatus respiratorius, systema respiratorium)*. Fakulta sportovních studií Masarykovy univerzity.  
[https://is.muni.cz/do/fsp/s/e-learning/zaklady\\_anatomie/zakl\\_anatomieIII/pages/dychaci\\_soustava.html](https://is.muni.cz/do/fsp/s/e-learning/zaklady_anatomie/zakl_anatomieIII/pages/dychaci_soustava.html)
- Hohenauer, E., Freitag, L., Costello, J. T., Williams, T. B., Küng, T., Taube, W., Herten, M., & Clijsen, R. (2022). The effects of normobaric and hypobaric hypoxia on cognitive performance and physiological responses: A crossover study. *PLoS One*, 17(11), e0277364.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0277364>
- Holfelder, B., & Becker, F. (2018). Atemmangeltraining: eine systematische Übersichtsarbeit [Hypoventilation Training: a systematic review]. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin*, 67.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.34045/SSEM/2018/23>
- Holmer, I., & Gullstrand, L. (1980). Physiological responses to swimming with a controlled frequency of breathing. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2(1), 1-6.
- Imai, A., Yamaguchi, K., & Goto, K. (2022). Comparison of systemic and peripheral responses during high-intensity interval exercise under voluntary hypoventilation vs. hypoxic conditions. *Physical Activity and Nutrition*, 26(2), 8-16. <https://doi.org/10.20463/pan.2022.0008>
- Jonville, S., Delpech, N., & Denjean, A. (2002). Contribution of respiratory acidosis to diaphragmatic fatigue at exercise. *European Respiratory Journal*, 19(6), 1079-1086. <https://doi.org/10.1183/09031936.02.00268202>
- Lapointe, J., Paradis-Deschênes, P., Woorons, X., Lemaître, F., & Billaut, F. (2020). Impact of Hypoventilation Training on Muscle Oxygenation, Myoelectrical Changes, Systemic K<sup>+</sup>, and Repeated-Sprint Ability in Basketball Players. *Frontiers in Sports and Active Living*, 2, Article 29.  
<https://doi.org/10.3389/fspor.2020.00029>



- Lavin, K. M., Guenette, J. A., Smoliga, J. M., & Zavorsky, G. S. (2015). Controlled-frequency breath swimming improves swimming performance and running economy. *Scand J Med Sci Sports*, 25(1), 16-24.  
<https://doi.org/10.1111/sms.12140>
- Lee, C., Cordain, L., Sockler, J., & Tucker, A. (1990). Metabolic consequences of reduced frequency breathing during submaximal exercise at moderate altitude. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61(3-4), 289-293. <https://doi.org/10.1007/bf00357615>
- Merkunová, A., & Orel, M. (2008). *Anatomie a fyziologie člověka pro humanitní obory* (Vol. 1). Grada Publishing, a.s.
- Millet, G. P., & Debevec, T. (2020). CrossTalk proposal: Barometric pressure, independent of , is the forgotten parameter in altitude physiology and mountain medicine. *The Journal of Physiology*, 598(5), 893-896.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1113/JP278673>
- Millet, G. P., Girard, O., Beard, A., & Brocherie, F. (2019). Repeated Sprint Training in Hypoxia – An Innovative Method. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin*, 70, 115-122. <https://doi.org/10.5960/dzsm.2019.374>
- Millet, G. P., Roels, B., Schmitt, L., Woorons, X., & Richalet, J. P. (2010). Combining hypoxic methods for peak performance. *Sports Medicine*, 40(1), 1-25.  
<https://doi.org/10.2165/11317920-000000000-00000>
- Mourek, J. (2005). *Fyziologie - učebnice pro studenty zdravotnických oborů* (Vol. 1). Grada Publishing, a. s.
- Nestor, J. (2021). *DECH. Nové poznatky o ztraceném umění* (A. Vargová, Trans.; Vol. 1). Vydavatelství Host.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., . . . Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.  
<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rokyta, R., & Šťastný, F. (2002). *Struktura a funkce lidského těla* (Vol. 1). TIGIS, spol. s r. o.
- Slavíková, J., & Švíglerová, J. (2012). *Fyziologie dýchání*. Nakladatelství Karolinum.

- Stavrou, V., Toubekis, A. G., & Karetsi, E. (2015). Changes in Respiratory Parameters and Fin-Swimming Performance Following a 16-Week Training Period with Intermittent Breath Holding. *J Hum Kinet*, *49*, 89-98.  
<https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0111>
- Trincat, L., Woorons, X., & Millet, G. P. (2017). Repeated-Sprint Training in Hypoxia Induced by Voluntary Hypoventilation in Swimming. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *12*(3), 329-335.  
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2015-0674>
- Václavek, R., & Macháčková, P. (2023). *Změň svůj dech a začnou se dít věci*. CPress.
- Woorons, X. (2013). *HYPOVENTILATION TRAINING.com*.  
<https://www.hypoventilation-training.com/index.html>
- Woorons, X. (2014a). *Hypoventilation training, push your limits!*
- Woorons, X., Billaut, F., & Lamberto, C. (2021). Running exercise with end-expiratory breath holding up to the breaking point induces large and early fall in muscle oxygenation. *European Journal of Applied Physiology*, *121*(12), 3515-3525.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-021-04813-2>
- Woorons, X., Billaut, F., & Vandewalle, H. (2020). Transferable Benefits of Cycle Hypoventilation Training for Run-Based Performance in Team-Sport Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, *15*(8), 1103-1108.  
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0583>
- Woorons, X., Bourdillon, N., Lamberto, C., Vandewalle, H., Richalet, J. P., Mollard, P., & Pichon, A. (2011). Cardiovascular responses during hypoventilation at exercise. *International Journal of Sports Medicine*, *32*(6), 438-445.  
<https://doi.org/10.1055/s-0031-1271788>
- Woorons, X., Bourdillon, N., Vandewalle, H., Lamberto, C., Mollard, P., Richalet, J. P., & Pichon, A. (2010). Exercise with hypoventilation induces lower muscle oxygenation and higher blood lactate concentration: role of hypoxia and hypercapnia. *European Journal of Applied Physiology*, *110*(2), 367-377.  
<https://doi.org/10.1007/s00421-010-1512-9>
- Woorons, X., Dupuy, O., Mucci, P., Millet, G. P., & Pichon, A. (2019b). Cerebral and Muscle Oxygenation during Repeated Shuttle Run Sprints with Hypoventilation. *International Journal of Sports Medicine*, *40*(6), 376-384.  
<https://doi.org/10.1055/a-0836-9011>

- Woorons, X., Gamelin, F. X., Lamberto, C., Pichon, A., & Richalet, J. P. (2014b). Swimmers can train in hypoxia at sea level through voluntary hypoventilation. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, *190*(1), 33-39. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2013.08.022>
- Woorons, X., Millet, G. P., & Mucci, P. (2019a). Physiological adaptations to repeated sprint training in hypoxia induced by voluntary hypoventilation at low lung volume. *European Journal of Applied Physiology*, *119*(9), 1959-1970. <https://doi.org/10.1007/s00421-019-04184-9>
- Woorons, X., Mollard, P., Pichon, A., Duvallet, A., Richalet, J. P., & Lamberto, C. (2007). Prolonged expiration down to residual volume leads to severe arterial hypoxemia in athletes during submaximal exercise. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, *158*(1), 75-82. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2007.02.017>
- Woorons, X., Mollard, P., Pichon, A., Duvallet, A., Richalet, J. P., & Lamberto, C. (2008). Effects of a 4-week training with voluntary hypoventilation carried out at low pulmonary volumes. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, *160*(2), 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2007.09.010>
- Woorons, X., Mucci, P., Aucouturier, J., Anthierens, A., & Millet, G. P. (2017). Acute effects of repeated cycling sprints in hypoxia induced by voluntary hypoventilation. *European Journal of Applied Physiology*, *117*(12), 2433-2443. <https://doi.org/10.1007/s00421-017-3729-3>
- Woorons, X., Mucci, P., Richalet, J. P., & Pichon, A. (2016). Hypoventilation Training at Supramaximal Intensity Improves Swimming Performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, *48*(6), 1119-1128. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000000863>
- Zappa, S. (2022). Hypoventilation training <https://respire-aligne.com/hypoventilation-training/>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<b>Obrázek 8:</b> <i>Statické ventilační parametry (Slavíková &amp; Švíglerová, 2012)</i> .....	6
<b>Obrázek 9:</b> <i>Změny vazebné křivky hemoglobinu (Slavíková &amp; Švíglerová, 2012)</i> .....	9
<b>Obrázek 10:</b> <i>Přehled strategií hypoxického tréninku (Girard et al., 2017)</i> .....	12
<b>Obrázek 11:</b> <i>Formy hypoventilace (Woorons, 2013)</i> .....	14
<b>Obrázek 12:</b> <i>Míra okysličení krve při hypoventilaci na úrovni hladiny moře (Woorons, 2013)</i> .....	15
<b>Obrázek 13:</b> <i>Emil Zátopek – průkopník omezeného dýchání (ČOV)</i> .....	18
<b>Obrázek 14:</b> <i>Flow diagram dle PRISMA (Page et al., 2021)</i> .....	24

## SEZNAM TABULEK

<b>Tabulka 9:</b> <i>Seznam klíčových slov a operátorů použitých k vyhledávání a počet nalezených studií.....</i>	23
<b>Tabulka 10:</b> <i>Základní informace o zařazených studiích zabývajících se účinkem hypoventilace.....</i>	26
<b>Tabulka 11:</b> <i>Cíle jednotlivých studií zařazených do systematického přehledu.....</i>	27
<b>Tabulka 12:</b> <i>Informace o účastnících studie a podmínkách hypoventilace.....</i>	29
<b>Tabulka 13:</b> <i>Popis jednotlivých intervencí v dlouhodobých studiích.....</i>	30
<b>Tabulka 14:</b> <i>Výsledné proměnné studií zkoumajících dlouhodobý účinek hypoventilace.....</i>	32
<b>Tabulka 15:</b> <i>Informace o intervencích studií zaměřených na akutní efekt hypoventilace.....</i>	34
<b>Tabulka 16:</b> <i>Výsledné proměnné studií zkoumajících akutní efekt hypoventilace.....</i>	35