Univerzita Palackého v Olomouci

Fakulta tělesné kultury

Fakulta
tělesné kultury

MOŽNOSTI VYUŽITÍ MOLEKULÁRNÍHO VODÍKU JAKO PROSTŘEDKU PRO ZEFEKTIVNĚNÍ REGENERACE PO VYTRVALOSTNÍM TĚLESNÉM ZATÍŽENÍ

Bakalářská práce

Autor: Jonáš Pospíšil

Studijní program: Tělesná výchova pro vzdělávání / Geografie pro vzdělávání

Vedoucí práce: Mgr. Michal Valenta

Olomouc 2023

Bibliografická identifikace

Jméno autora: Jonáš Pospíšil

Název práce: Možnosti využití molekulárního vodíku jako prostředku pro zefektivnění regenerace po vytrvalostním tělesném zatížení

Vedoucí práce: Mgr. Michal Valenta

Pracoviště: Katedra přírodních věd v kinantropologii

Rok obhajoby: 2023

Abstrakt:

Tato studie zkoumá možnosti využití molekulárního vodíku, jako prostředku pro zefektivnění regenerace po vytrvalostním tělesném zatížení. K naplnění hlavního cíle práce je zde využita vyhledávací strategie, pomocí které jsem nalezl 195 studií. Vyhledané studie jsem zredukoval podle vybraných kritérií na osm akceptovaných studií, které se zabývají vlivem H_2 na regeneraci po tělesné zátěži. V akceptovaných studiích jsem zkoumal vliv H_2 na dynamiku markerů oxidačního poškození, zánětlivých markerů a vliv na redukci projevů DOMS. Po analýze výsledků akceptovaných studií jsem dospěl k závěru, že molekulární vodík urychluje regeneraci. H_2 snižuje hodnotu subjektivního ukazatele bolestivosti svalů VAS z čehož plyne, že H_2 snižuje také DOMS. Urychlení regenerace po aplikaci H_2 ale nebylo prokázáno biomarkery sledovanými v akceptovaných studiích, a tak zatím není známý mechanismus funkce H_2 při urychlení regenerace.

Klíčová slova:

Molekulární vodík, ROS, DOMS, regenerace, zánět, vytrvalostní zatížení

Souhlasím s půjčováním práce v rámci knihovních služeb.

Bibliographical identification

Author: Jonáš Pospíšil

Title: Possible ways of using molecular hydrogen as an instrument for the improvement of regeneration after endurance exercise

Supervisor: Mgr. Michal Valenta

Department: Department of Natural Sciences in Kinanthropology

Year: 2023

Abstract:

This study investigates the potential of molecular hydrogen as an instrument to improve recovery after endurance exercise. A search strategy is used to meet the main objective of the thesis. Using this stratégy, I found 195 studies. I have reduced the retrieved studies according to the selected criteria to eight accepted studies that deal with the effect of H_2 on recovery after physical exercise. In the accepted studies, I examined the effect of H_2 on the dynamics of markers of oxidative damage, inflammatory markers and the effect on the reduction of DOMS manifestations. After analyzing the results of the accepted studies, I concluded that molecular hydrogen accelerates recovery. H_2 reduces the value of the subjective muscle soreness marker VAS implying that H_2 also reduces DOMS. However, acceleration of recovery after H_2 application has not been demonstrated by biomarkers monitored in accepted studies and thus the mechanism of H_2 function in accelerating recovery is still unknown.

Keywords:

Molecular hydrogen, ROS, DOMS, regeneration, inflammation, endurance exercise

I agree the thesis paper to be lent within the library service.

Prohlašuji, že jsem tuto práci zpracoval samostatně pod vedením Mgr. Michala Valenty, uvedl všechny použité literární a odborné zdroje a dodržoval zásady vědecké etiky.

V Olomouci dne 28. června 2023

.....

Děkuji vedoucímu práce Mgr. Michalu Valentovi za pomoc a cenné rady, které mi poskytl při zpracování této práce.

OBSAH

Obsah 7
1 Úvod 8
2 Přehled poznatků 9
2.1 Únava 9
2.1.1 Druhy únavy 9
2.2 Vytrvalostní zatížení 11
2.2.1 Dělení vytrvalosti 12
2.2.2 Fyziologické determinanty vytrvalostního zatížení 12
2.3 Únava po vytrvalostním zatížení 19
2.3.1 Únava akutní 19
2.3.2 Únava následná 22
2.4 Redukce DOMS 23
2.4.1 Regenerace 23
2.4.2 Biologické prostředky 24
2.4.3 Farmakologické prostředky 25
2.5 Molekulární vodík 26
2.5.1 Molekulární vodík jako antioxidant 26
2.5.2 Možnosti aplikace molekulárního vodíku 26
3 Cíle 28
3.1 Hlavní cíl 28
3.2 Dílčí cíle 28
3.3 Výzkumné otázky 28
4 Metodika 29
5 Výsledky 31
6 Diskuse 35
7 Závěry 37
8 Souhrn 38
9 Summary 39
10 Referenční seznam 40

1 ÚVOD

Vytrvalostní zatížení je specifickým typem zatížení, u kterého může dojít u netrénovaných jedinců k různým nežádoucím bolestivým podnětům, které nastávají už v průběhu nebo po dokončení aktivity. Tyto podněty nastávají samozřejmě i u jedinců trénovaných, ti jim ale předchází nebo jejich nástup oddalují dlouhodobým tréninkem. Bolestivé podněty vznikající v průběhu a po ukončení vytrvalostní tělesné zátěže jsou spojeny s únavou.

Můžeme se setkat s únavou akutní a následnou. Akutní únava nastává ihned po ukončení aktivity, zatímco únava následná nastává nejdříve až přibližně 24 hodin po ukončení aktivity (Cheung et al., 2003). Únavu následnou můžeme nazývat také jako opožděný nástup bolesti svalů, kterou nalezneme také pod odbornou zkratkou z anglického jazyka DOMS (delayed onset muscle soreness) (Howatson & van Someren, 2008). DOMS může ovlivnit lidský výkon ve chvíli, kdy chce jedinec podat kvalitní výkon více dní po sobě. DOMS ale nemusí vznikat a ovlivňovat nás pouze ve sportu, ale i při běžných každodenních aktivitách, na které člověk jednoduše není zvyklý. Obzvláště ve sportu se lidé snaží dopady DOMS co nejvíce zmírnit případně co nejrychleji odstranit, aby mohli zařadit co nejvíce kvalitních tréninkových jednotek za sebou, případně aby nebyl ovlivněn jejich výkon při soutěži.

Pro redukci DOMS je tedy velmi důležité zařadit do sportovního procesu regeneraci. Při aplikaci správných regeneračních prostředků pak můžeme dosáhnout snížení DOMS a zkvalitnění výkonů podávaných v následujících dnech. Bylo provedeno několik studií, které porovnávají účinnost regeneračních prostředků na redukci DOMS. Z těchto studií vychází jako účinné prostředky pro redukci DOMS masáže, kompresní oděvy, kryoterapie a kontrastní vodní terapie (Dupuy et al., 2018; Torres et al., 2012).

V posledních letech se začaly zkoumat funkce molekulárního vodíku jako antioxidantu. Přesněji od roku 2007, kdy vyšla zlomová studie, kterou napsal Ohsawa et al. (2007), ve které byly potvrzeny pozitivní dopady molekulárního vodíku na lidský organismus. Vhledem k tomu, že antioxidanty mají vliv na redukci DOMS (Howatson & van Someren, 2008) se předpokládá pozitivní antioxidační působení molekulárního vodíku na likvidaci DOMS po vytrvalostním tělesném zatížení.

Tuto teorii můžeme podložit například studií Nogueiry et al. (2018), ve které byl potvrzen pozitivní účinek molekulárního vodíku na zánětlivé procesy jenž jsou jedním z možných mechanismů vzniku DOMS.

2 PŘEHLED POZNATKŮ

2.1 Únava

Únavu lze definovat jako pokles výkonnosti a neschopnost pokračovat v další práci (Máček & Radvanský, 2011). Botek et al. (2017) popisují stav únavy jako určitý druh ochrany a obrany organismu před vyčerpáním, či v krajních případech jako druh ochrany před ohrožením života.

Únava se většinou považuje za negativní prvek, protože omezuje činnost svalů a snižuje výkonnost. Na únavu se dá pohlížet ale také z pozitivního hlediska, protože je to nezbytná součást při rozvoji adaptačních mechanismů.

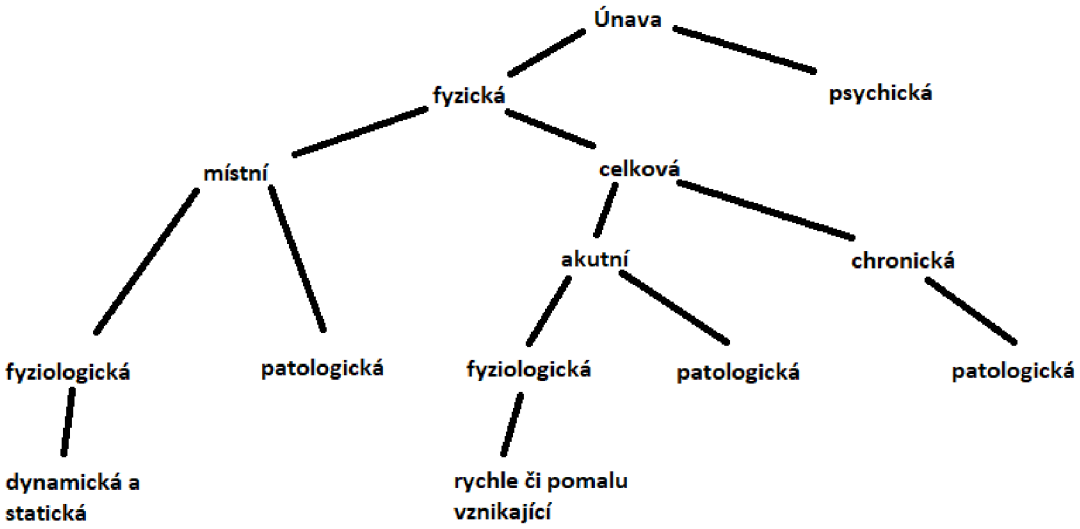
2.1.1 Druhy únavy

Základní dělení únavy je na psychickou a fyzickou. V našem případě se budeme potřebovat orientovat hlavně v únavě fyzické. Ovšem na únavu fyzickou má velký vliv únava psychická a naopak. Toto tvrzení můžeme podložit tvrzením Jirky (1990), který říká, že velká tělesná únava snižuje duševní výkonnost a velká duševní únava snižuje tělesnou výkonnost.

Na vzniku fyzické únavy se podílí řada okolností. Podle Bartůňkové (2013) to jsou především:

- Charakter práce – zda je práce statická nebo dynamická, aerobní nebo anaerobní a v neposlední řadě sem řadíme dobu a intenzitu zatížení
- Trénovanost jedince
- Aktuální stav jedince – psychické rozpoložení jedince
- Vliv okolního prostředí
- Vliv biorytmů

Fyzická únava lze dále dělit podle obrázku 1.



Obrázek 1. Druhy únavy (Bartůňková, 2006)

1) Místní únava

Místní únava neboli také lokální se vyznačuje únavou pouze v menším rozsahu, je do ní zapojen menší počet svalových skupin. I přes její malý rozsah má ale vliv na výkon celého organismu. Místní únavu můžeme dále dělit na fyziologickou a patologickou. Fyziologická místní únava se pak dělí na dynamickou a statickou.

2) Celková únava

Celková únava má mnohem větší rozsah než únava místní. Do pohybové činnosti se zapojuje více než 2/3 svalových skupin (Botek et al., 2017). Celková únava nastává u většiny pohybových aktivit, jako příklad zde můžeme uvést běh, běh na lyžích nebo plavání.

3) Akutní únava

Akutní únava nastává při přechodném snížení pracovní kapacity, kterému předcházelo tělesné zatížení (Bartůňková, 2013). Dochází zde k akutním chemickým a fyzikálním změnám. Těmito změnami můžou být například pokles pH, zvýšení parciálního tlaku CO_2, zvýšení teploty nebo zvýšení koncentrace H^+.

4) Chronická únava

Chronická únava nevzniká náhle, ale z dlouhodobého přetěžování organismu, ve sportu se nazývá přetrénování. K dlouhodobému přetěžování se přidávají také další faktory, kterými jsou nedostatek vitamínů, emocionální stres nebo také stereotypy v tréninkových metodách. Stav chronické únavy nelze jednoduše napravit několika dny odpočinku, ale jeho náprava je dlouhodobější proces. Podle Bartůňkové (2013)

se chronická únava projevuje příznaky výkonnostními, somatickými a neuropsychickými.

5) **Fyziologická únava**

Nastává přirozeně během jakékoliv činnosti. Dochází při ní k poklesu výkonnosti po zatížení a následně během zotavení mizí. Fyziologickou únavu můžeme sledovat jak projevy subjektivními, tak i projevy objektivními. Mezi subjektivní projevy můžeme řadit celkovou slabost, bolest a tuhnutí svalů. Mezi objektivní projevy patří pokles výkonnosti, svalový třes, poruchy koordinace, zvýšená nervosvalová dráždivost a zpomalené reakce (Bartůňková, 2006).

Fyziologickou únavu můžeme podrobněji dělit na statickou a dynamickou nebo na rychle a pomalu vznikající.

Statická únava nastupuje dříve než dynamická. Nastává při dlouho trvalé svalové kontrakci, kvůli které je sval méně prokrven. Oproti tomu dynamická únava nastává později díky lepšímu prokrvení, které zapříčiňuje střídání kontrakce a relaxace svalu.

Rychle vznikající únava vzniká při zátěži s intenzitou submaximální až maximální. Charakterizuje ji pokles hodnot makroergních fosfátů spolu s menšími změnami v glykogenu (Bartůňková, 2013). Dalšími projevy je zvýšení laktátu. Rychle vznikající únava odchází vcelku rychle a má po ní převládat aktivní odpočinek.

Pomalu vnikající únava oproti únavě rychle vznikající nastává při zatížení střední až mírné aktivity a má také delší trvání z důvodu vyčerpání většího množství svalového a jaterního glykogenu. Po tomto typu únavy by měl převládat odpočinek pasivní.

6) **Patologická únava**

Vzniká přechodem z únavy fyziologické při přehlížení jejich příznaků a opakovaném přetížení. Botek et al. (2017) jako příznaky patologické únavy uvádí bolesti hlavy nebo bolesti v krajině srdeční, závratě a celkovou slabost. Bartůňková (2013) uvádí, že s patologickou únavou mohou nastávat problémy kardiorespirační a zažívací, nervové, senzorické, psychické a oběhové poruchy. Patologická únava se může také projevit jako syndrom přetrénování.

2.2 Vytrvalostní zatížení

Lehnert, Kudláček, et al. (2014) popisují vytrvalost jako kondiční pohybovou schopnost, která je spojována s dlouhodobým prováděním pohybové činnosti odpovídající intenzity

a se schopností odolávat únavě. Dovalil (2012) vysvětluje vytrvalost jako pohybovou schopnost člověka k dlouhotrvající tělesné činnosti, soubor předpokladů provádět cvičení s určitou nižší než maximální intenzitou co nejdéle, nebo po stanovenou dobu danou délkou cvičení a jako schopnost odolávat únavě. Jednodušší popsání rychlosti nalezneme u Lehnerta, Kudláčka, et al. (2014), kteří říkají, že vytrvalost je chápána jako schopnost dlouhodobě provádět tělesnou práci určité intenzity bez snížení její efektivity.

Vytrvalost je asi ze 70 % podmíněna geneticky a je závislá na maximální spotřebě kyslíku, úrovní aerobního prahu (AP) a anaerobního prahu (ANP), typologii svalových vláken a ekonomice pohybu.

2.2.1 Dělení vytrvalosti

Vytrvalost můžeme dělit podle několika aspektů. První možné dělení je podle doby trvání. Botek et al. (2017) vytrvalost podle doby trvání dělí na:

- Rychlostní vytrvalost
- Krátkodobou vytrvalost
- Střednědobou vytrvalost
- Dlouhodobou vytrvalost

Rychlostní vytrvalost se vyskytuje během 7–35 s zatížení. Krátkodobá vytrvalost je v rozmezí 35-120 s, střednědobá 2-10 minut a dlouhodobá v čase nad 10 minut (Dovalil, 2012).

Další dělení je podle způsobu energetického krytí aerobní a anaerobní vytrvalost. K těmto pojmům se dostaneme blíže později v této kapitole.

Vytrvalost můžeme také dělit podle zapojení svalstva. Na celkovou, u které musí být podle Lehnerta, Kudláčka, et al. (2014) zapojeno nejméně 2/3 svalstva v těle. A na lokální, která je charakteristické zapojením menších svalových skupin.

Vytrvalost dělíme ještě podle druhu svalové činnosti na dynamickou a statickou. Dynamická vytrvalost nastává při pohybu. Statická je naopak založená na výdrži v určité poloze.

2.2.2 Fyziologické determinanty vytrvalostního zatížení

2.2.2.1 Maximální spotřeba kyslíku

Maximální spotřeba kyslíku neboli také VO_2max je podle Botka et al. (2017) maximální množství z objemu přijatého O_2, které je organismus schopen využít při maximální svalové práci.

VO_2max můžeme vyjádřit v buď v litrech spotřebovaného O_2 za minutu, nebo v mililitrech spotřebovaného O_2 na kilogram tělesné hmotnosti za minutu. Druhému zmiňovanému vyjádření se říká relativní. V praxi se používá hlavně relativní vyjádření, protože umožňuje porovnání jedinců s odlišnou tělesnou hmotností.

VO_2max se zjišťuje při zátěžovém testu pomocí spiroergometrie. Test probíhá na běhátku nebo na trenažeru. Na běhátku jedinci dosahují obecně o 5-10 % vyšší hodnoty než na cyklistickém trenažéru (Botek et al., 2017), protože na běhátku je u pohybu zapojeno více svalů, a to způsobuje větší spotřebu kyslíku. Výjimka nastává v případě profesionálních sportovců, kteří dosahují nejvyšších hodnot VO_2max při testu, který probíhá v jejích specifickém pohybu např. cyklisté na cyklistickém trenažeru. Mezi sportovce s nejvyšší hodnotou VO_2max se řadí běžci na lyžích. Hodnota naměřeného VO_2max závisí také na délce zátěže. Když se dostane spotřeba kyslíku na maximální hodnotu nastane tzv. levelling of. V tomto stavu již spotřeba kyslíku nestoupá a zůstává na stejné úrovni, než dojde k vyčerpání. Během tohoto setrvalého stavu se může i nadále měnit intenzita měřená ve wattech (Máček & Radvanský, 2011). Na hodnotě VO_2max jsou trénovaní vytrvalci schopni vydržet 10-15 minut (Botek et al., 2017).

Hodnota VO_2max je dána částečně dědičností přibližně z 25-40 % (Máček & Radvanský, 2011). Vysoká hodnota VO_2max může přispívat nejen k vyššímu výkonu, ale také k lepší regeneraci např. mezi jednotlivými běhy při intervalovém tréninku. Je tomu tak díky dobré dodávce kyslíku do svalů a tím pádem nastane rychlejší splacení kyslíkového dluhu.

U vysoce trénovaných jedinců může VO_2max dosahovat hodnot až 5-7 l/min, což odpovídá hodnotě 80-90 ml/kg/min. U běžné netrénované populace se dosahuje průměrných hodnot u mužů okolo 45 ml/kg/min a u žen 36 ml/kg/min (Botek et al., 2017).

Výsledná hodnota VO_2max je ovlivněna několika faktory, kterými jsou dědičnost, hmotnost a složení těla, ventilace, schopnosti odběru kyslíku z krve a distribuci krve (Máček & Radvanský, 2011). Faktor dědičnosti se na výsledné hodnotě VO_2max projevuje podle Máčka & Radvanského (2011) z 25-40 %. Jak ovlivňuje VO_2max hmotnost a složení těla už jsme si vysvětlili výše. Jednoduše ale můžeme říct, že tento faktor je hlavně o množství svalové hmoty, která v průběhu zátěže spotřebovává kyslík.

Nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím VO_2max je ventilace. Ta je schopna přivádět kyslík do alveolů, kde dochází díky rozdílnému parciálnímu tlaku k difuzi alveolokapilární membránou kyslíku do krve (Steimle et al., 2011). Jakmile se dostane kyslík do krve ukáže se výkonnost dalšího faktoru, kterým je schopnost distribuce okysličené krve k pracujícím svalům. Jakmile se okysličená krev dostane do kapilárního systému v pracujícím svalu, zjistíme velikost schopnosti odběru kyslíku z krve do svalového vlákna. Odběr kyslíku z krve je závislá na míře uvolnitelnosti kyslíku z vazby na hemoglobin a na následné výkonnosti aerobních enzymů

v mitochondriích, který slouží pro oxidaci H^+ vytvořeného tělesnou aktivitou. Při těžké svalové práci je uvolnění kyslíku z hemoglobinové vazby usnadněno posunem kyslíkové disociační křivky doprava vlivem teploty, pH a zvýšené produkce CO_2 a zvýšenou koncentrací 2,3-difosfoglycerátu (Máček & Radvanský, 2011).

Dle Botka et al. (2017) můžeme spotřebu kyslíku určit pomocí Fickovy rovnice:

$$VO_2 = Q\ (SF \times SV) \times (a\text{-}v)O_2$$

Ve které Q znamená minutový srdeční výdej v litrech za minutu. SF je srdeční frekvence v počtu tepů za minutu. SV je systolický objem srdce v mililitrech. Pod zkratkou $(a\text{-}v)O_2$ najdeme arteriovenózní diferenci kyslíku v mililitrech. Pojem arteriovenózní diference znamená množství kyslíku, který se vrátí žilním systémem zpět do srdce bez využití.

2.2.2.2 Aerobní práh

AP je prvním ze dvou metabolických přechodů. Určuje předěl mezi aerobním metabolismem a aerobně-anaerobním metabolismem. Podle Botka et al. (2017) se o AP hovoří jako o intenzitě zatížení, kdy se energie pro svalovou činnost v podobě ATP přestává tvořit výhradně aerobní cestou. Tato změna se projeví ve změně hodnoty laktátu v krvi. Podle Bartůňkové (2013) je hraniční hodnota 2 $mmol.l^{-1}$. Pokud hladina laktátu tuto hodnotu nepřesáhne, jedná se potom o aerobní pásmo. Fyzická aktivita v aerobním pásmu se využívá převážně u rekreačních sportovců. U profesionálních nebo výkonnostních sportovců slouží fyzická aktivita v tomto pásmu převážně k regeneračním účelům. Rozdíl je u vytrvalostních sportů, kde se většina objemového tréninku odehrává právě tady v této zóně.

Aerobní práh bývá u běžné populace na úrovni přibližně 40 % VO_2max a u vysoce trénovaných jedinců se může nacházet až na hodnotě 70 % VO_2max (McLellan & Skinner, 1981).

2.2.2.3 Anaerobní práh

ANP je přechodem mezi smíšeným aerobně-anaerobním metabolismem a výhradně anaerobním metabolismem. Bartůňková (2013) definuje ANP jako intenzitu zatížení, při které je tvorba laktátu a jeho utilizace v rovnováze. Dá se také říct, že je to nejvyšší dosažitelná intenzita zatížení, kterou můžeme provádět dlouhodobě (Svedahl & MacIntosh, 2003). Znalost velikosti ANP je u většiny sportovců velice důležitá, mnohdy důležitější než znalost jejich AP.

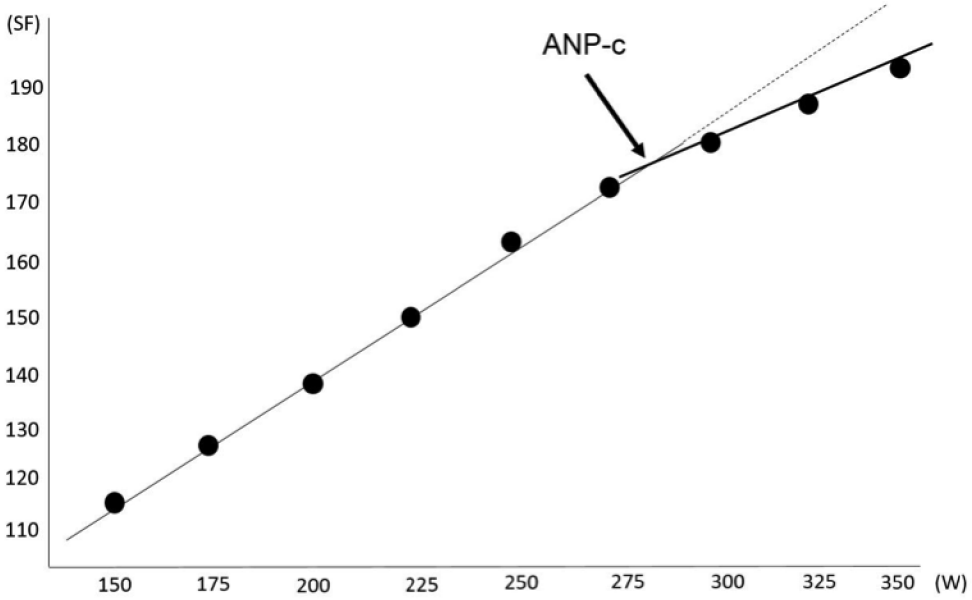
Botek et al. (2017) dělí ANP na tři druhy. Jsou jimi ANP cirkulační, ANP metabolický a ANP ventilační.

a) ANP cirkulační

Zkráceně se označuje ANP-c. ANP-c závisí na schopnosti práce srdce. Zjišťuje se pomocí stupňovaného zátěžového testu do maxima. Při testu se sleduje reakce

srdeční frekvence (SF) na zvyšující se zátěž. Botek et al. (2017) uvádí, že při SF v rozmezí 110-120 tepů za minutu existuje lineární vztah. Ve chvíli, kdy se křivka odchýlí od lineárního vzestupu můžeme zpozorovat hodnotu ANP-c. Od této chvíle se SF začne zvedat již pozvolněji, než dosáhne svého maxima. ANP-c zpozorujeme snadněji u trénovaných jedinců než u běžné populace.

U mladých mužů běžné populace se ANP-c nachází na úrovni kolem 85 % SF max a u vytrvalostně trénovaných sportovců ho můžeme najít na úrovni kolem 90 % SF max. (Bartůňková, 2013).



Obrázek 2. Ukázka determinace ANP-c (Lehnert, Botek, et al., 2014)

b) ANP metabolický

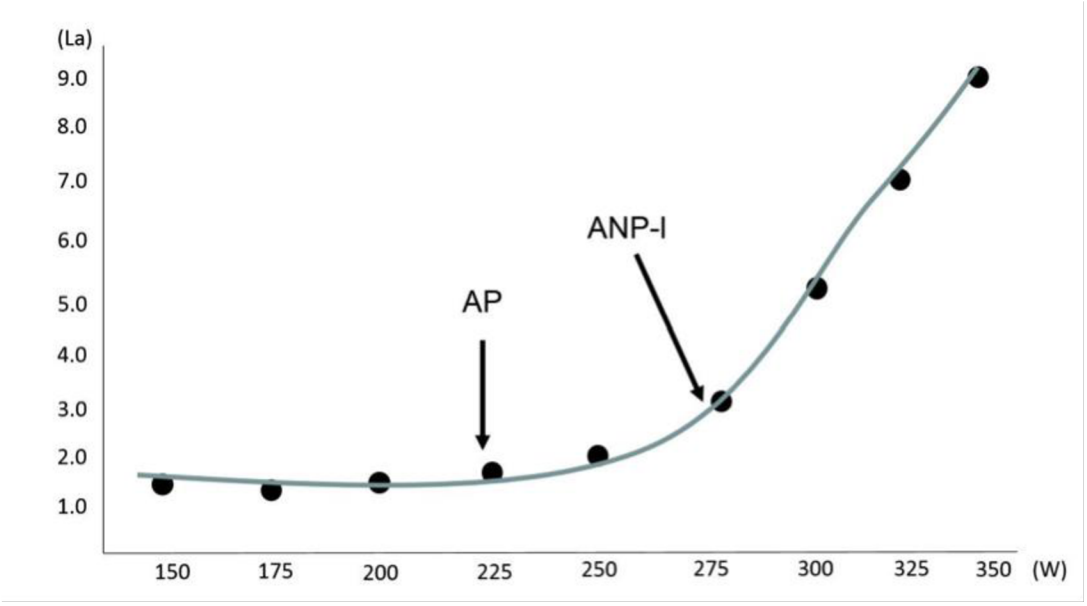
ANP metabolický můžeme nazývat také ANP laktátový, zkráceně ho potom nalezneme pod zkratkou ANP-l. Botek et al. (2017) definují ANP-l jako intenzitu zatížení, při které dochází k narušení dynamické rovnováhy mezi produkcí laktátu a schopností jeho odplavení nebo využití jako zdroje pro svalovou činnost. Při narušení této rovnováhy dochází k nahromadění laktátu a H^+, to je příčinnou poklesu pH a zvýšení únavy.

ANP-l určíme stejně jako ANP-c pomocí vytvoření křivky. V Případě ANP-l to však bude křivka laktátová. Ta se vytváří na základě zátěžového testu s rostoucí intenzitou zatížení. Rostoucí zatížení má 3-8 stupňů a každý trvá 4 minuty (Faude et al., 2009). Na konci každého stupně se odebírá vzorek krve z bříška prstu nebo ušního lalůčku. Z tohoto důvodu je zjišťování laktátu nazýváno jako invazivní metoda. Z odebraného

vzorku se zjistí hladina laktátu. Zpočátku se hladina laktátu zvyšuje pozvolně, protože tělo je schopno laktát v malé míře využívat jako energetický substrát. Ve chvíli, kdy se naruší dynamická rovnováha a tělo přestává stíhat laktát zpracovávat začne laktátová křivka prudce stoupat (Faude et al., 2009). Chvíle prudkého nárůstu laktátu v krvi odpovídá intenzitě zatížení na hranici ANP-l.

Bartůňková (2013) uvádí, že hodnota ANP-l odpovídá hladině laktátu v krvi v rozmezí 2,5-6 mmol.l^{-1}. Dále říká, že u maratonců bývají hodnoty laktátu při ANP-l nižší než u sprinterů. Přitom maratonci se na úroveň svého ANP-l dostanou mnohem později než sprinteři.

S hladinou laktátu na úrovni ANP-l souvisí také pojem maximální laktátový setrvalý stav (MLSS). Jedná se o nejvyšší možnou koncentraci laktátu udržitelnou během dynamické svalové práce, která nastává při intenzivní práci zhruba po 10-15 minutách zatížení (Botek et al., 2017).



Obrázek 3. Konstrukce laktátové křivky a determinace aerobního a anaerobního prahu (Lehnert, Botek, et al., 2014)

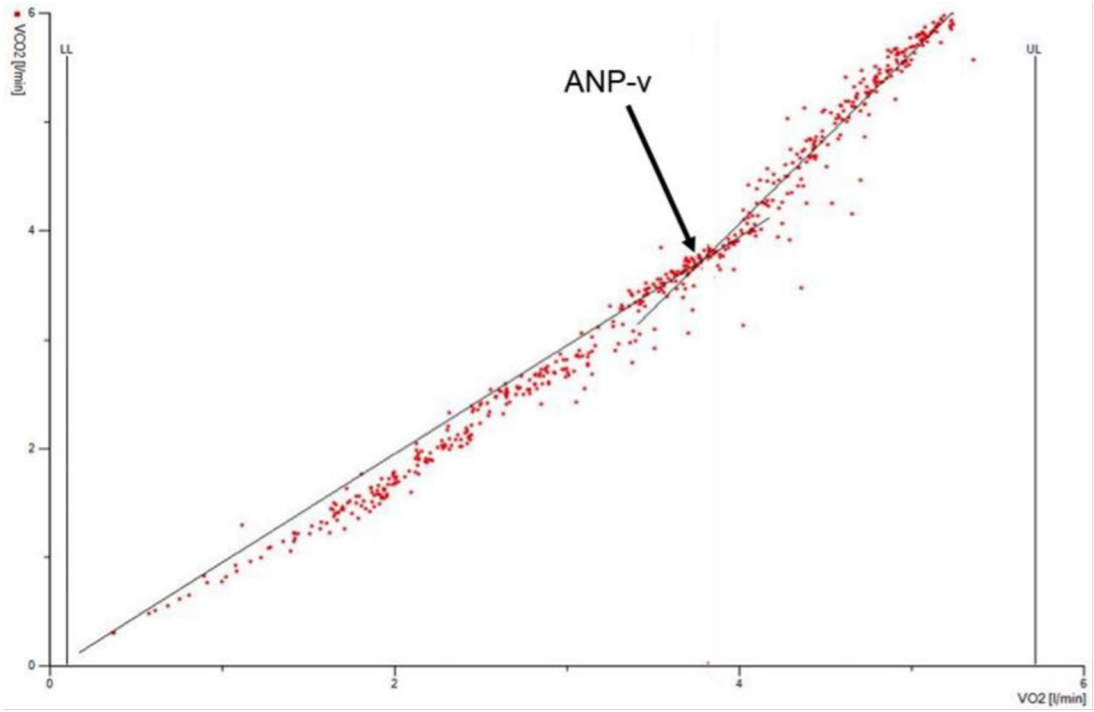
c) ANP ventilační

Ve zkráceném tvaru ho nalezneme pod zkratkou ANP-v. Určuje se na základě hodnocení změn v dynamice výměny dechových plynů O_2 a CO_2 při stupňovaném zátěžovém testu (Lehnert, Botek, et al., 2014). Při zvyšování výkonu v těle začíná převládat anaerobní metabolismus a tím pádem se tvoří více laktátu a H^+. Jak je již uvedeno výše z těchto příčin se v těle naruší rovnováha pH a dochází k jeho poklesu. V tuto chvíli se o srovnání acidobazické rovnováhy začne pokoušet pufrovací systém.

Nadbytečné H^+ se začnou vázat na pufry za vzniku CO_2. Tím pádem se v těle začne tvořit nadbytek CO_2 a tělo začne reagovat zvýšením ventilace, aby nadbytečné CO_2 vyloučilo (Reinhard et al., 1979).

ANP-v zjistíme vytvořením grafu, který je založen na změnách minutové ventilace. Pozorujeme příjem O_2 a výdej CO_2. Hranici ANP-v zpozorujeme ve chvíli, kdy se změní lineární vzestup ventilace a začne prudce stoupat výdej CO_2.

ANP-v se nachází u netrénovaných osob na hodnotě odpovídající přibližně 70 % VO_2max. U trénovaných osob se rovná přibližně 85 % VO_2max (Bartůňková, 2013).



Obrázek 4. Ukázka determinace ANP-v (Lehnert, Botek, et al., 2014)

2.2.2.4 Typologie svalových vláken

Svalové vlákno je dalším z faktorů ovlivňující vytrvalostní zatížení. U svalových vláken najdeme mnoho znaků, díky kterým je můžeme jednotně popsat. Dylevský (2009) ale říká, že sval je ve skutečnosti heterogenní populací vláken lišících se řadou mikroskopických, histochemických a fyziologických vlastností. Svalová vlákna dělíme na čtyři typy podle, které se liší, podle již zmíněných kritérií na pomalá červená vlákna, rychlá bílá vlákna, rychlá červená vlákna a přechodná vlákna (Bartůňková, 2013).

a) Pomalá červená vlákna

Vlákna typu I neboli také pomalá oxidativní vlákna (SO – slow oxidative). Tento typ vláken je poměrně tenký. Dylevský (2009) uvádí, že ve svalových vláknech tohoto

typu se nachází méně myofibril, hodně mitochondrií a také větší množství myoglobinu. Myoglobin dává svalu červenou barvu a jeho funkce ve svalu je podobná jako funkce hemoglobinu v krvi tzn., že váže na svůj iont Fe^{2+} O_2. V těchto svalových vláknech se nachází velké množství kapilár. Jsou také typická svou vysokou oxidativní kapacitou, díky které jsou pomaleji unavitelná. Dochází zde k nižší tvorbě kyselých metabolitů díky lepšímu využívání O_2 pro aerobní metabolismus (Botek et al., 2017).

Vlákna typu I jsou stavěná k pomalejší kontrakci a jsou vhodná pro protahovanou a vytrvalostní zátěž.

b) Rychlá bílá vlákna

Rychlá bílá vlákna najdeme taky pod názvem rychlá oxidativní a glykolytická (FOG – fast oxidative and glycoytic) nebo pod označením vlákna typu IIa. Tento typ vláken je přechod mezi vlákny typu I a typu IIb. Jsou středně silné, mají větší množství myofibril a méně mitochondrií než vlákna typu I, ale jsou stále velmi dobře kapilarizovaná. Jsou stavěná k rychlým kontrakcím prováděných velkou silou. Botek et al. (2017) uvažují, že tento typ vlákna je tréninkem ovlivnitelný směrem k pomalým nebo rychlým svalovým vláknům jako adaptace na daný typ tréninku.

c) Rychlá červená vlákna

Rychlá červená vlákna neboli také vláka rychlá glykolytická (FG – fast glycolytic) jsou vlákna již zmíněného typu IIb. Typický je pro ně velký objem, nízký obsah myoglobinu, oxidativních enzymů a malé množství kapilár (Dylevský, 2009). Díky velkému průřezu mají největší sklon k hypertrofii ze všech svalových typů. Velké množství glykolytických enzymů pomáhá svalům vytvořit velkou svalovou sílu za krátký časový úsek ovšem jako daň za tuto schopnost se svaly rychle podléhají acidóze a tím pádem se rychle unaví. Z těchto faktů nám vychází, že tyto vlákna jsou vhodná pro rychlostně silové zatížení s krátkou dobou trvání.

d) Přechodná vlákna

Přechodná vlákna jsou vlákna III typu a zmiňují se o nich jen někteří autoři. Tento typ vláken je vývojově nedifencovaný a je zřejmě potenciálním zdrojem předchozích typů vláken (Dylevský, 2009).

Typy svalových vláken můžeme zjistit třemi způsoby převážně invazivními metodami. Bartůňková (2013) mezi tyto způsoby řadí:

- Odběr vzorku svalové tkáně punkční jehlou

- Odběrem řady vzorků svalové tkáně po smrti nebo při některých typech chirurgických zákroků
- Zjištění pomocí nukleární magnetické rezonance se současnou analýzou biochemických parametrů snímaného svalu

Z výše zmíněných svalových typů můžeme říct, že pro vytrvalostní zatížení jsou nejpodstatnější svalová vlákna typu I. Ovšem v lidském těle jsou zastoupena vždy vlákna všech uvedených typů a jejich poměr určuje předpoklad pro daný typ sportu.

2.2.2.5 Ekonomika pohybu

Ekonomiku pohybu můžeme vyjádřit pomocí množství spotřebovaného O_2 při dané rychlosti pohybu (Botek et al., 2017). Ekonomika pohybu by se také dala nazvat jako schopnost efektivně zapojovat svaly tzn. zapojovat pouze svaly potřebné pro daný pohyb. Díky dobré ekonomice pohybu se dá zvýšit i celkový vytrvalostní výkon, protože jak je obecně známo tělo při zátěži spotřebovává kyslík a dobrá ekonomika pohybu dokáže spotřebu kyslíku snížit. Díky tomu může nastat situace, když mají dva běžci stejné VO_2max, tak běžec s lepší ekonomikou pohybu bude mít větší výkon.

Mezi hlavní faktory určující ekonomiku pohybu patří parametry těla jedince. Za ideál se považuje hubená postava menšího vzrůstu bez výrazného osvalení (Botek et al., 2017). S ekonomikou pohybu je úzce spojena také technika vykonávaného pohybu.

2.3 Únava po vytrvalostním zatížení

Únavu po vytrvalostním zatížení dělíme na únavu vzniklou okamžitě po ukončení zátěže, tu budeme nazývat akutní, a únavu s pozdějším nástupem, kterou nazveme únavou následnou.

2.3.1 Únava akutní

Jak již je uvedeno výše únava vzniká jako obrana organismu. Hlavní příčinou vzniku je nedostatečný přísun energetických zdrojů. Máček & Radvanský (2011) dělí vznik únavy do tří hypotéz na deficit energetických zásob nutných k provedení svalové kontrakce, deficit kyslíku a snížení kapacity svalu tyto látky využívat.

Podle velikosti zatížení se liší také energetické zásoby, které jsou potřebné pro svalovou kontrakci. Při dlouhodobější nižší zátěži se spalují volné mastné kyseliny. Zároveň se také využívají sacharidy. Při aktivitě s vyšší zátěží přibližně do 70 % maxima se množství glykogenu v těle příliš nemění. Na úrovni prahu vyčerpání je podle Máčka & Radvanského (2011) v pracujícím svalu jen asi 10 % předchozího obsahu glykogenu.

Deficitem kyslíku je myšlena nedostatečná dodávka kyslíku do svalů. Která vyplývá z nedostatečného okysličení krve. K tomuto stavu dochází hlavně při stupňované nebo maximální zátěži. Při zátěži vytrvalostní jsou problémem spíše faktory jako například produkce tepla a současné snížení transportu krve ke svalům z důvodu jejího přesunu do kůže (Noakes, 2006). Dalším, ovšem krajním případem, kdy může dojít k nedostatečnému okysličení krve je přechodná porucha srdečního svalu.

Snížení kapacity svalu využívat látky potřebné k funkci se dá nazvat také snížení utilizace. V této hypotéze se pracuje se situací, kdy se ke svalu dostane dostatečné množství látek potřebných pro jeho funkci, ale klesá schopnost přeměnit jejich chemickou energii na energii mechanickou. K tomuto stavu dochází buď při poklesu tvorby adenosintrifosfátu (ATP) nebo při poklesu kapacity kontrakcí aktinu a myozinu (Noakes, 2006).

Jako další z možných příčin akutní únavy uvedli Avela et al. (1999) snížení nervového vstupu do svalu. Motorická jednotka svalu je aktivována vstupem nervového vzruchu do svalu pomocí motoneuronů. Únava nastává ve chvíli ztráty svalové síly, která se zmenší z důvodu zpomalení funkce motoneuronů. Wan et al. (2017) uvádí několik možných příčin snížení funkce motoneuronů. Mezi tyto faktory patří dlouho se opakující aktivace motoneuronů, snížení rychlosti vzruchu z motorické kůry a snížení počtu motoneuronů.

2.3.1.1 Reaktivní formy kyslíku

Mezi další z příčin únavy řadíme tvorbu reaktivních forem kyslíku (ROS – reactive oxygen species). ROS spadají do skupiny volných radikálů. O výskytu volných radikálů v biologických matriálech se poprvé zjistilo ve 20. století v roce 1954, zároveň bylo také zjištěno že biologické materiály volné radikály produkují (Powers, Ji, et al., 2011). Volný radikál je atom nebo molekula, která obsahuje jeden nebo více nepárových elektronů (Halliwell & Gutteridge, 2015). Díky výskytu nepárových elektronů jsou volné radikály velice reaktivní. Reagují během několika mikro či milisekund, a proto jejich životnost většinou nemá dlouhé trvání. Reagují s proteiny, lipidy, sacharidy, nukleovými kyselinami a jinými malými anorganickými molekulami (Di Meo & Venditti, 2020). Mezi volné radikály patří již zmíněné ROS a reaktivní formy dusíku (RNS – reactive nitrogen species). Reaktivní formy kyslíku a dusíku najdeme také pod souhrnnou zkratkou RONS.

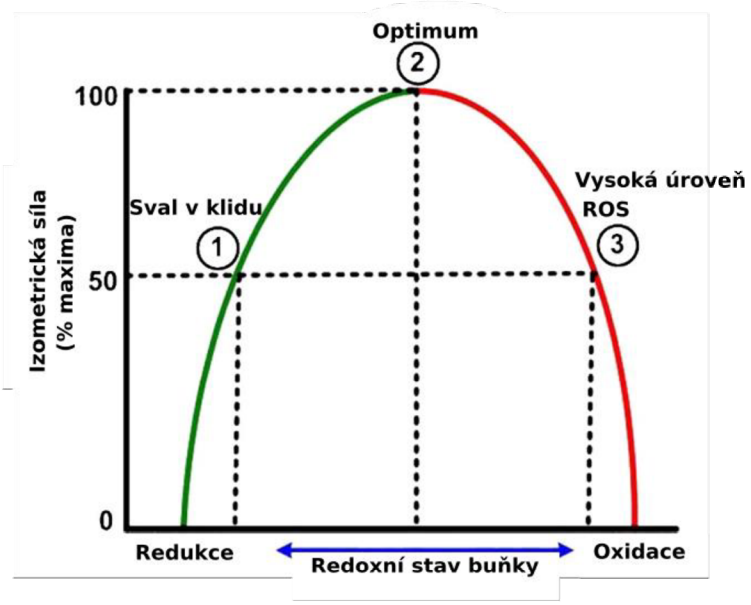
ROS můžeme dále rozdělit na radikály a neradikálová oxidační činidla. Mezi radikály patří superoxid (O_2), hydroxylový radikál ($OH^{\cdot}$), peroxylový radikál (RO_2) a hydroperoxyl ($HO_2^{\cdot}$) a mezi neradikálová činidla řadíme peroxid vodíku (H_2O_2), kyselinu chlornou (HCl) a ozon (O_3) (Bayr, 2005).

Ve skupině RNS najdeme pouze reaktivní formy. Přesněji se zde nachází peroxynitrit ($ONOO^-$) a oxid dusnatý (NO) (Patel et al., 1999).

Produkce ROS během tělesného zatížení byl nejprve prokázán v játrech a kosterním svalstvu. (Davies et al., 1982). Kromě jater a svalů existuje mnoho dalších potenciálních zdrojů ROS. Během fyzické zátěže mohou k celkové tvorbě ROS významně přispět také plíce, srdce a bílé krvinky (Powers & Jackson, 2008).

V průběhu fyzické aktivity vznikají ROS několika způsoby, přičemž mezi hlavní patří vznik v mitochondriích a vznik pomocí NADPH (nikotinamidadenindinukleotidfosfátoxidázy), fosfolipázy A_2 (PLA_2) nebo xanthinoxidázy (Powers, Nelson, et al., 2011).

ROS mají během zátěže jak pozitivní, tak negativní účinky. V klidové fázi jsou ROS nepostradatelnou úlohu pro tvorbu svalové síly. Lehce zvýšená koncentrace ROS je dokonce prospěšná pro sval a zvyšuje tvorbu jeho síly. Ovšem ve chvíli, kdy ROS dosáhnou ve svalu vysoké koncentrace stává se jejich účinek kontraproduktivní a tvorba svalové síly klesá (Reid et al., 1993). Tento postup tvorby můžeme názorně pozorovat na obrázku 5.



Obrázek 5. Teoretický model popisující bifázické účinky RONS na produkci síly kosterního svalstva (Reid et al., 1993)

Di Meo et al. (2016) uvádí, že zvýšená tvorba ROS při fyzické aktivitě může způsobit poškození a dysfunkci buněk. ROS může narušit svalovou kontrakci, protože podporuje uvolňování intracelulárního vápníku ze sarkoplazmatického retikula, tím zpomaluje zpětné vychytávání vápníku a snižuje kontraktilní sílu svalových myofilament. Reid (2016) říká, že zvýšení tvorby ROS ve svalu jasně přispívá ke zvýšení svalové únavy a ztrátě plné svalové funkce.

2.3.2 Únava následná

Následná únava po tělesném zatížení je únava vznikající s časovým odstupem od tělesného zatížení. Nazýváme ji jako zpožděný nástup bolestivosti svalů (DOMS – delayed onset muscle soreness). DOMS je popisováno jako poranění svalového napětí typu I, projevuje se citlivostí nebo ztuhlostí na dotek a při pohybu (Gulick & Kimura, 1996). DOMS se může projevovat od mírné bolesti, která zmizí samovolně během běžných činností až po silné bolesti svalů omezující pohyb. DOMS vzniká přibližně 24-48 hodin po zátěži (MacIntyre et al., 1995).

DOMS vzniká nejčastěji u nových pohybových činností, na které organismus není zvyklý. Další běžná situace vzniku je u sportovců, kteří začínají po delším odpočinku znovu plně trénovat. DOMS vznikají nevíce při excentrických svalových kontrakcí prováděných s větší silou (Cheung et al., 2003).

Příčiny vzniku DOMS byly popsány několika teoriemi, avšak žádná z nich nebyla prokázána jako převládající (Zeng et al., 2022). Mezi příčiny vzniku Cheung et al. (2003) řadí svalové křeče, poškození pojivové tkáně, poškození svalů, zánět, teorii enzymového efluxu a kyselinu mléčnou.

Při vzniku DOMS v důsledku poškození pojivové dochází k bolesti svalů z důvodu nadměrného namáhání excentrickou svalovou kontrakcí pojivové tkáně, nacházející se jako plášť kolem svalových snopců (Stauber, 1989).

Teorie vzniku DOMS v důsledku poškození svalů byla poprvé popsána Houghem (1902) a až dodnes zůstává jako jedna z možných hypotéz. Tato teorie se zaměřuje na narušení svalu v místech z-linie. Porušení nastává zejména u vláken typu II při excentrické kontrakci, protože vlákna typu II mají z-linie nejslabší. Bolestivost vzniká kvůli stimulaci nociceptorům umístěných ve svalové pojivové tkáni (Cheung et al., 2003). Nocioceptory jsou senzorické neurony reagující na potenciální hrozby vysláním signálů do mozku, který vytvoří bolestivý pocit (Dubin & Patapoutian, 2010).

Podle teorie zánětu se ve svalech po excentrickém zatížení tvoří otok, následně se do svalu infiltrují leukocyty. Při této teorii dochází k poškození svalových vláken a pojivové tkáně v důsledku excentrického zatížení. Po poškození se ve svalu začnou shromažďovat leukocyty a bílé krvinky a následně se sem díky vyšší propustnosti cév dostane tekutina bohatá na bílkoviny. Na konci tohoto procesu je zvýšen osmotický tlak a aktivují se senzorické neurony, díky kterým dochází k bolestivosti (Cheung et al., 2003).

Teorie enzymového efluxu pracuje s předpokladem hromadění vápníku v poškozených svalech. Vápník se do svalu dostane v důsledku sarkolemálního poškození sarkoplazmatického retikula, kde je obvykle vápník uložen. Sarkolemální poškození vzniká po namáhavém cvičení

(Byrd, 1992). Při poškození svalu dochází ke snížení buněčného dýchání na buněčné úrovní, což vede ke zpomalení resyntézy ATP a snížení jeho celkového množství. Důsledkem sníženého množství ATP je zpomalení transportu vápníku zpět do sarkoplazmatického retikula (Armstrong, 1984).

Teorie vzniku DOMS pomocí kyseliny mléčné je ze všech nejméně pravděpodobná a byla dokonce vyvrácena, protože hladina kyseliny mléčné se vrátí do původního stavu do hodiny po zatížení. Z tohoto důvodu nemůže ovlivňovat bolestivost svalů po více než 24 hodinách (Zeng et al., 2022).

2.4 Redukce DOMS

DOMS můžeme redukovat pomocí regeneračních procesů. Jak se dozvíme níže v dělení regenerace existuje několik skupin podle způsobu regenerace. V likvidaci DOMS jsou nejdůležitější skupiny regenerace pomocí biologických prostředků a pomocí farmakologických prostředků (Howatson & van Someren, 2008).

2.4.1 Regenerace

Regenerace je nezbytná a nepostradatelná část sportovního výkonu. Podle Jirky (1990) zahrnuje regenerace veškerou činnost, která směřuje k úplnému zotavení všech tělesných i duševních procesů, jejichž klidová rovnováha byla nějakou předcházející činností posunuta na určitou úroveň únavy. Máček & Radvanský (2011) popisují regeneraci jako snahu eliminovat změny v organismu vzniklé fyzickou aktivitou.

Regenerace sil nás provádí celým životem a kvůli tomuto faktu nemůžeme jednoduše spočítat čas potřebný k regeneraci po zatížení (Jirka, 1990). V případě přepočtu aktivního času na čas odpočinku by se komplexní regenerace musela stavět mimo tréninkovou jednotku a tvořila by jednotku samostatnou, což, jak se dozvíme později, není možné, protože regenerace se s aktivním pohybem prolíná a některé regenerační procesy mohou nastávat již během tělesné zátěže.

Hošková et al. (2015) uvádí, že při sportovní činnosti je doba nutná k regeneraci potřeba zkrátit, a to je možné při správném využití postupů a metod komplexní regenerace.

Regeneraci můžeme dělit na aktivní a pasivní a podle času na časnou a pozdní (Jirka, 1990). Regenerace pasivní je způsob regenerace, kdy není do organismu nijak zasaženo. Tento typ začíná již během tělesné zátěže a je zapojen do doby, než se organismus zotaví a dostane do původního stavu, ve kterém bylo před vychýlením rovnováhy všech fyziologických funkcí (Kyralová & Matoušová, 1996). Regenerace aktivní je oproti tomu typ, při kterém se zásahy

do organismu snažíme regeneraci urychlit (Jirka, 1990). Časná regenerace začíná po zátěži a pozdní je celková regenerace fyzická i psychická po delším časovém úseku se zátěží.

Pro regeneraci je velmi důležitá adaptace organismu. Adaptace na daný fyzický podnět dokáže urychlit regenerační procesy. Urychlení regenerace může nastat také při adaptaci na nějakou regenerační metodu. Adaptace může být ale také záporným faktorem, a to při přílišné adaptaci organismu na danou regenerační metodu, která vzniká často opakovaným užíváním dané metody bez obměny (Jirka, 1990).

V regeneraci se využívají různé regenerační prostředky, které se dají dělit do několika skupin, které se prolínají a navazují na sebe. Hošková et al. (2015) je dělí do 4 skupin a to na prostředky pedagogické, psychologické, biologické a farmakologické. Prostředky pro regeneraci je vhodné vybírat po zvážení dané situace v jaké se jedinec nachází a je možné je podle potřeby kombinovat.

2.4.2 Biologické prostředky

Do biologických regeneračních prostředků můžeme zařadit masáž, kompresní oděvy, ponoření do studené vody, kontrastní vodní terapii elektrostimulaci, protahování, kryoterapii a aktivní zotavení (Dupuy et al., 2018). Podobné procesy můžeme najít u řazení podle Hoškové et al. (2015), která mezi biologické procesy řadí tepelné procedury, vodní procedury, elektroprocedury, světelné procedury, aktivní pohybová cvičení a masáže.

Největší význam v redukci DOMS by měla mít masáž, na tomto tvrzení se shodují autoři Dupuy et al. (2018), Zainuddin et al. (2005) a Torres et al. (2012), kteří ve svých studiích prokázali její účinek. Masáž nejúčinněji snižuje DOMS při provedení do dvou hodin po ukončení fyzické aktivity, při délce od 20 do 30 minut (Torres et al., 2012). Masáž však neměla žádný vliv na koncentrickou svalovou sílu, ale podařilo se s její pomocí snížit otok a DOMS až o 30 % (Zainuddin et al., 2005).

Mezi další prokazatelně funkční techniky můžeme řadit kompresní oděvy u kterých byla prokázána účinnost na redukci DOMS, ovšem pocitový účinek na únavu nebyl velký (Dupuy et al., 2018).

Stejných výsledků jako u kompresních oděvů dosáhla redukce DOMS pomocí kryoterapie, a kontrastní vodní terapie kde byl také znatelná dopad na DOMS ale už menší na vnímanou únavu (Dupuy et al., 2018; Torres et al., 2012).

Oproti předchozím metodám nastal opačný výsledek u metody ponoření, kde při ponoření do vody o teplotě 15 °C a nižší nebyl prokázaný dopad na DOMS. Nastalo zde ale významné snížení únavy pocitové (Dupuy et al., 2018).

Účinky DOMS bohužel nebyly prokázány u klasických metod aktivního zotavení a protažení (Torres et al., 2012).

2.4.3 Farmakologické prostředky

Farmakologické regenerační prostředky jsou svou podstatou hlavně doplňkové k biologickým regeneračním prostředkům, ovšem v regeneračním procesu můžou sehrát také velmi významnou roli. Mezi farmakologické prostředky můžeme řadit například léky, u kterých se setkáváme s nutností lékařského předpisu nebo také doplňky stravy, které jsou běžně k sehnání. Užívání veškerých farmakologických prostředků by mělo být konzultováno s odborníkem abychom se vyhnuli případným komplikacím přinejmenším v neúčinnosti preparátů. Při užívání těchto prostředků je hlavně u sportovců velmi důležité kontrolovat, zda se v nějakém preparátu nenachází některá ze zakázaných látek ve sportu (Pipe & Ayotte, 2002).

Mezi první skupinu farmakologických prostředků regulujících DOMS řadíme nesteroidní antiflogistika (NSAID) neboli také nesteroidní protizánětlivé léky. Mezi NSAID řadíme ibuprofen, aspirin, naproxen diclofenac, flurbiprofen a ketoprofen (Howatson & van Someren, 2008). Jejich účinky na redukci DOMS jsou však nejasné, protože některé studie uvádí jejich funkčnost (O'Grady et al., 2000) a jiné jejich účinky neprokazují (Gulick et al., 1996).

Další skupinou látek regulujících DOMS jsou doplňky stravy. Doplňky stravy jsou založené na funkci antioxidantů, které obsahují.

Antioxidanty jsou látky, které zpomalují, zabraňují nebo odstraňují oxidační poškození cílové molekuly (Halliwell, 1995). Antioxidanty snižují kumulaci ROS ve svalu a díky tomu i bolestivost.

Ve většině studií zkoumajících účinek antioxidantů na redukci DOMS byly zkoumány vitamíny C a E. Tyto vitamíny mají vliv na snížení bolestivosti v prvních 24 hodinách, následně ale jeho účinky klesají. Torre et al. (2021) ve svém systematickém přehledu uvádí, že pouze ve 21 % recenzovaných studií byla zjištěna pozitivní vazba mezi užitím vitamínu C nebo E nebo jejich kombinací na snížení DOMS vyvolané fyzickou aktivitou. Pro větší předpoklad úspěchu při pokusu snížení DOMS pomocí těchto vitamínů je doporučeno jejich užívání dlouhodobě (Howatson & van Someren, 2008).

Dalším ze zajímavých antioxidantů, které mají pozitivní vliv na snížení DOMS je kurkumin. Kurkumin je přírodní látka, která se získává z oddenků rostlin druhu kurkuma. Jeho účinek byl prozatím prokázaný pouze malý, avšak má potenciál pro prevenci před DOMS jak naznačují jeho účinky (Drobnic et al., 2014).

V posledních letech se jako další látka s potenciálními vlastnostmi k redukci DOMS začal zkoumat molekulární vodík.

2.5 Molekulární vodík

Molekulární vodík (H_2) je molekula bez barvy, bez chuti a bez zápachu. Vodík je sice nejhojnějším prvkem v atmosféře, avšak nachází se hlavně ve sloučeninách a samostatně se vyskytuje pouze zřídka. Při samostatné formě výskytu je vodík velice hořlavý. Jinak je ale málo reaktivní a s většinou látek vůbec nereaguje. I přes vysokou hořlavost vodíku při reakci s kyslíkem se tento jev stane pouze někdy, protože vodík se vznítí pouze při koncentraci nad 4 % (Ohta, 2012).

2.5.1 Molekulární vodík jako antioxidant

První myšlenky o molekulárním vodíku jako o antioxidantu byly představeny již v roce 1975 (Dole et al., 1975). Toto zjištění se však dlouhou dobu nevyužívalo a dále neprozkoumávalo. Až v roce 2007 vyšla pro molekulární vodík průlomová studie (Ohsawa et al., 2007), která odstartovala výzkum využití H_2 jako antioxidantu. H_2 odstraňuje ROS vzniklé cvičením. Přesněji řečeno vysoce reaktivní druhy, kterými jsou $OH^{\cdot}$ a $ONOO^{-}$ (Ohsawa et al., 2007). Také díky odstranění těchto dvou reaktivních sloučenin se daří vodíku potlačovat oxidační stres. Ten zapříčiňuje vznik několika nemocí a také ovlivňuje funkce pohybového aparátu. Hong et al. (2010) ve své studii potvrzuje pozitivní účinky H_2 na nemoci spojené s oxidačním stresem. Molekulárnímu vodíku se daří účinně redukovat ROS díky jeho velmi malé velikosti. Jeho velikost mu umožňuje lépe proniknout do mitochondrií, které jsou jedním z míst tvorby ROS, se kterými zde reaguje (Ohta, 2012).

Molekulární vodík by díky své antioxidační funkci měl také účinně fungovat k redukci DOMS vyvolané cvičením.

2.5.2 Možnosti aplikace molekulárního vodíku

Molekulární vodík se dá užívat několika způsoby, kterými jsou inhalace, orální příjem, intravenózní infuze, koupel, oční kapky nebo zvýšení střevního vodíku (Ge et al., 2017).

a) Inhalace

Inhalace H_2 je způsob, kterým se dá přijmout relativně velké množství H_2. Tento způsob je dobrý zejména při akutních stavech. Inhalace pobíhá pomocí dýchací masky, ventilačního okruhu nebo nosních kanyl. Při inhalaci se nevdechuje čistý vodík ale plyn

obsahující H_2 v koncentraci menší než 4 %, kvůli bezpečnosti (Kawamura et al., 2020). Při inhalaci H_2 nedochází ke snížení tlaku ani k dalším nežádoucím účinkům (Ohsawa et al., 2007).

b) Orální příjem

Orálně se vodík užívá pomocí vody obohacené o H_2. H_2 se rozpustí ve vodě do koncentrace 0,8 nM, což odpovídá 1,6 mg/l, za normálního atmosférického taku při pokojové teplotě (Hong et al., 2010). tento roztok musí být uchováván v hliníkové nádobě, aby se zabránilo poklesu obsahu H_2. Tato metoda příjmu H_2 se považuje za nejjednodušší, nejbezpečnější a nejlépe kontrolovatelnou pro běžné užívání je tudíž nejdoporučovanější.

c) Intravenózní infuze

Při intravenózním příjmu H_2 se do těla pomocí injekcí dostává roztok s H_2. Při této metodě se do těla dostane velké množství H_2 (Ohta, 2014). Proto je opět doporučována spíše při akutních stavech. Nevýhodou této metody je její invazivita, proto není doporučena k běžnému užívání.

d) Koupel

H_2 lze do těla dostávat také pomocí koupele v roztoku s H_2. Vodík se do těla dostává prostoupením přes kůži a dosáhne celého těla pouze za 10 minut (Kawamura et al., 2020). Tento způsob aplikace patří k těm jednodušším a doporučovaným například pro sportovce.

e) Oční kapky

H_2 se dá aplikovat také na povrch oka pomocí fyziologického roztoku s obsahem H_2. Tento způsob aplikace byl navržen a testován jako prostředek pro zabránění slepoty vzniklé alkalickým popálením (Kubota et al., 2011).

f) Zvýšení střevního vodíku

H_2 je v těle produkován i samovolně, a to fermentací nestrávených sacharidů ve střevech. Tato produkce H_2 může například pomoci proti zánětu tlustého střeva (Kajiya et al., 2009). Ge et al. (2017) uvádí že střevní vodík se dá zvýšit pomocí některých léků.

3 CÍLE

3.1 Hlavní cíl

Cílem práce je analyzovat, možnosti využití molekulárního vodíku, jako prostředku pro zefektivnění regenerace po vytrvalostním tělesném zatížení.

3.2 Dílčí cíle

1) Posoudit vliv aplikace H_2 na redukci oxidativního poškození organismu v průběhu regenerace po vytrvalostním zatížení.
2) Posoudit vliv aplikace H_2 na dynamiku zánětlivých markerů v průběhu regenerace po vytrvalostním zatížení.
3) Posoudit vliv aplikace H_2 na redukci projevů DOMS po vytrvalostním zatížení.
4) Srovnání průběhu regenerace při různých metodách aplikace H_2.

3.3 Výzkumné otázky

1) Jaký vliv má aplikace H_2 na projevy DOMS po vytrvalostním tělesném zatížení.
2) Jaký vliv má aplikace H_2 na oxidativní poškození organismu po vytrvalostním tělesném zatížení.
3) Jaký vliv má aplikace H_2 na zánětlivé procesy po vytrvalostním tělesném zatížení.

4 METODIKA

K získání informací potřebných k naplnění cílů práce jsem použil elektronickou databázi Web of Science. K sestavení vyhledávací strategie jsem použil modifikovanou výzkumnou otázku PICOT (Riva et al., 2012), která se skládá z pěti skupin, do kterých jsou tematicky rozděleny slova použité ve vyhledávací strategii. Jednotlivé skupiny jsou populace (P), intervence (I), srovnání (C), výstup (O) a čas (T).

Pro sestavení vyhledávací strategie jsem vynechal skupiny srovnání a čas, které nejsou v mém tématu zásadní.

Celá vyhledávací strategie je znázorněna v tabulce 1. Pro propojení jednotlivých slov a skupin vyhledávací strategie jsem použil Booleovské operátory or a and (Dinet et al., 2004). Slova v jednotlivých skupinách jsem spojil pomocí operátoru or a celé skupiny pomocí operátoru and. Výsledná vyhledávací strategie vložená do databáze Web of Science vypadala následovně. ((ALL=(sport) OR ALL=(training) OR ALL=(workout) OR ALL=(fatigue) OR ALL=(endurance exercise) OR ALL=(sprint exercise) OR ALL=(strength exercise) OR ALL=(exercise) OR ALL=(skeletal muscle) OR ALL=(anti-inflammation) OR ALL=(sports medicine) OR ALL=(exercise - induced oxidative stress) OR ALL=(muscle damage) OR ALL=(physical endurance) OR ALL=(endurance training) OR ALL=(sprint training) OR ALL=(strength training) OR ALL=(fitness) OR ALL=(muscle contraction) OR ALL=(muscle function) OR ALL=(eccentric contraction) OR ALL=(physical exercise)) AND (ALL=(men) OR ALL=(women) OR ALL=(trained persons) OR ALL=(untrained persons) OR ALL=(athletes) OR ALL=(students) OR ALL=(university students) OR ALL=(high school students) OR ALL=(healthy people))) AND (ALL=(molecular hydrogen) OR ALL=(molecular hydrogen inhalation) OR ALL=(molecular hydrogen baths) OR ALL=(molecular hydrogen water) OR ALL=(hydratation) OR ALL=(increase intestinal molecular hydrogen) OR ALL=(eye drops with molecular hydrogen) OR ALL=(HRW)) AND (ALL=(regeneration) OR ALL=(performance) OR ALL=(recover) OR ALL=(delayed onset muscle soreness) OR ALL=(preventive and terapeutic aplications) OR ALL=(free radicals) OR ALL=(oxidative stress) OR ALL=(reactive oxygen spieces) OR ALL=(lactate) OR ALL=(inflammation) OR ALL=(ROS) OR ALL=(DOMS) OR ALL=(muscle cramps)).

Po použití kompletní vyhledávací strategie jsem vyhledal 195 studií. Následný postup třídění článků je znázorněn v tabulce 2., kde je v jednotlivých řádcích napsané kritérium, podle kterého jsem studie třídil, nebo v případě referenčního seznamu studie přidával. Kritérium referenčního seznamu tedy znamená, že jsem prohledal referenční seznamy již nalezených studií a doplnil původní počet o studie s potřebnou tématikou nalezené v referenčních seznamech. Prvním číslem v řádku nacházející se za daným kritériem je počet studií před roztřídění daným

kritériem. Následuje počet studií, které jsem vyčlenil nebo přidal a posledním číslem je výsledek po třídění daným kritériem. Uvedeným postupem jsem se dostal na konečný počet 8 vyhledaných článků.

Tabulka 1. Vyhledávací strategie

Skupiny	Klíčová slova	Počet výsledků	Celkem
Populace	training, workout, fatigue, endurance exercise, sprint exercise, strength exercise, exercise, skeletal muscle, anti-inflammation, sports medicine, exercise-induced oxidative stress, muscle damage, physical endurance, edurance training , sprint training, strength training, fitness, muscle contraction, muscle function, eccentric contraction, physical exercise, men, women, trained persons, untrained persons, athletes, students, university students, high school students, healthy people	617 068	195
Intervence	molecular hydrogen, molecular hydrogen inhalation, molecular hydrogen baths, molecular hydrogen water, hydratation, increase intestrial molecular hydrogen, eye drops with molecular hydrogen, HRW	258 534	
Výstup	regeneration, performance, recover, delayed onset muscle soreness, preventive and terapeutic aplications, free radicals, oxidative stress, reactive oxygen spieces, lactate, inflammation, ROS, DOMS, muscle cramps	8 474 153	

Tabulka 2. Postup třídění studií

Název	195	-178	17
Referenční seznam	17	+11	28
Abstrakt a full text	28	-20	8
Výsledný počet	8		

5 VÝSLEDKY

Po aplikaci vyhledávací strategie v databázi Web of Science a následném protřídění výsledků jsem se dostal k 8 studiím, které zkoumají využití molekulárního vodíku v regeneraci po tělesném zatížení. V daných studiích jsem sledoval dynamiku markerů oxidačního poškození, svalového poškození, antioxidační kapacity a psychometrických dat zobrazených subjektivními ukazateli únavy. Přehled akceptovaných studií s dynamikou jednotlivých markerů je uveden v tabulce 3. a tabulce 4.

Vliv aplikace H_2 na DOMS jsem sledoval pomocí ukazatelů VAS, kreatinkinázy a myoglobinu. Subjektivní ukazatel únavy VAS škála se vyskytovala ve třech studiích. Redukci bolestivosti svalů v důsledku aplikace H_2 jsem zaznamenal ve studiích Botka et al. (2022) a Eda et al. (2022). Ve třetí studii se hodnota VAS mezi aplikací placeba a H_2 nijak signifikantně nelišila (Kawamura et al., 2016). Hladina kreatinkinázy, markeru svalového poškození, se v průběhu regenerace signifikantně nelišila ve výzkumech Aokiho et al. (2012), Kawamury et al. (2016) a Shibayamy et al. (2020). Oproti tomu bylo zaznamenáno její zvýšení ve výzkumu Botka et al. (2022). Hladina myoglobinu v těle byla zkoumána pouze v práci Kawamury et al. (2016), kde se její hodnoty prokazatelně nezměnily.

Vliv aplikace H_2 a dynamiku procesů oxidativního poškození jsem sledoval ukazateli oxidačního stresu a antioxidační kapacity. Ukazatel oxidačního stresu, který se ve studiích vyskytuje nejčastěji jsou d-ROMs (diakronově reaktivní metabolity kyslíku). Tento biomarker byl hodnocen ve studiích Aokiho et al. (2012), Dobashiho et al. (2020), Shibayamy et al. (2020) a Kawamury et al. (2016). V žádné z těchto studií nebyl prokázán statisticky významný rozdíl v množství d-ROMs při užití H_2 nebo placeba. Dalším z ukazatelů oxidačního stresu zkoumaným ve studiích byl 8-hydroxy-2-deguanosin (8-OHdG). Tento biomarker byl zkoumán ve studiích Shibayamy et al. (2020) a Edy et al. (2022). V obou těchto studiích se množství produkovaného 8-OHdG v těle po užití H_2 prokazatelně snížilo. Další ukazatelé oxidačního stresu se ve studiích vyskytovaly vždy pouze jednou, a tak nemáme porovnání jejich dynamiky mezi více studiemi. Ke změně došlo pouze u superoxidového aniontu (O^{2-}) jehož hodnota se po užití H_2 snížila (Sun & Sun, 2017). U ostatních markerů, mezi které patřily laktát dehydrogenáza (LDH), malondyaldehyd (MDA) a myeloperoxidáza (MPO) nebyly pozorovány žádné signifikantní změny (Kawamura et al., 2016; Shibayama et al., 2020).

Prvním z ukazatelů hodnotících dynamiku antioxidační kapacity je biologický antioxidační potenciál (BAP). Snížení hodnoty BAP v důsledku koupele v H_2 zaznamenal ve své práci Kawamura et al. (2016). Změny hodnoty BAP byly zkoumány ještě v dalších třech výzkumech. Ovšem ve všech těchto výzkumech nedošlo ke změně hodnoty BAP. Jmenovitě to byly výzkumy

Aokiho et al. (2012), Dobashiho et al. (2020) a Shibayamy et al. (2020). Celkový antioxidační potenciál (BAP/d-ROMs) byl zkoumán ve třech studiích, ovšem jejich výsledky jsou značně rozdílné. Ve výzkumu Shibayamy et al. (2017) došlo ke zvýšení hodnoty BAP/d-ROMs v důsledku aplikace H_2. Oproti tomu se snížila ve výzkumu, který prováděl Dobashi et al. (2020). Shibayama et al. (2020) změny v hodnotách BAP/d-ROMs nezaznamenal. Další dva ukazatele, jimiž jsou celková antioxidační kapacita (T-AOC) a superoxid dismutáza (SOD) zkoumali ve své práci Sun & Sun (2017). Oba tyto markery se po aplikaci H_2 zvýšily. Nacházejí se ovšem pouze v jedné studii, a tak nemáme data k porovnání účinnosti těchto markerů.

Vliv aplikace H_2 na zánětlivé procesy jsem zkoumal pomocí interleukinu 6 (IL-6), interleukinu 17a (IL-17a) a počtu bílých krvinek v organismu po zátěži. Signifikantní vliv H_2 byl zaznamenán pouze v případě redukce IL-6 (Kawamura et al., 2016). U IL-17 a počtu bílých krvinek byl účinek H_2 nesignifikantní (Kawamura et al., 2016; Shibayama et al., 2020).

Tabulka 3. Studie zaměřující se na změny vybraných ukazatelů pozátěžového poškození lidského organismu po aplikaci hydrogenované vody

Metoda příjmu H_2	Studie	Počet účastníků	Množství přijatého vodíku	Cvičení	Markery	Efekt
Hydrogenovaná voda	Botek et al. 2022	12 netrénovaných mužů	před zátěží 2×210ml během zátěže 210 ml okamžitě po zátěži 210 ml 30 minut po zátěži 420 ml	odporový trénink	La	↓
					VAS	↓
					RPE	↓
					CK	↑
	Aoki et al. 2012	10 trénovaných mužů	před zátěží 3×500 ml	jízda na kole 30 min při zátěži 75 % VO_2 max a 100 maximálních isokinetických kontrakcí	d-ROMs	→
					BAP	→
					CK	→
					La	↓
	Shibayama et al. 2017	8 mužů	každý testovací den 500 ml před prvním sprintem a 500ml po druhém testu	3 po sobě jdoucí dny cyklistický test složený ze dvou 6 min sprintů s max zatížením 10 s	BAP/d-ROMs	↑
	Dobashi et al. 2020	8 trénovaných mužů	každý testovací den 500 ml před a po zátěži	3 po sobě jdoucí dny cyklistický test složený ze dvou sérií skládající se ze tří 10 s maximálních sprintů a 110 s volného šlapání a následného vertikálního skoku a maximální izometrické kontrakce	La	→
					d-ROMs	→
					BAP	→
					BAP/d-ROMs	↓
	Sun & Sun 2017	60 trénovaných mužů	200 ml před, během a po každém tréninku	2 h intenzivního plavání 8 dní po sobě	O^{2-}	↓
					SOD	↑
					T-AOC	↑

Vysvětlivky: La: laktát; CK: kreatinkináza; d-ROMs: diakronově reaktivní metabolity kyslíku; BAP: biologický antioxidační potenciál; BAP/dROMs: celkový antioxidační potenciál; O^{2-}: superoxidový aniont; SOD: superoxid dismutáza; T-AOC: celková antioxidační kapacita

Tabulka 4. Studie zaměřující se na změny vybraných ukazatelů pozátěžového poškození lidského organismu po inhalaci, koupeli a zvyšování střevního H_2

Metoda příjmu H_2	Studie	Počet účastníků	Množství přijatého vodíku	Cvičení	Markery	Efekt
Inhalace H_2 plynu	Shibayama et al. 2020	8 mužů	okamžitě po zátěži po dobu 60 min	30 min běh na úrovni 75 % VO_2max, vertikální skoky (5×10)	La	→
					d-ROMs	→
					BAP	→
					BAP/d-ROMs	→
					8-OHdG	↓
					CK	→
					LDH	→
					počet bílých krvinek	→
H_2 koupele	Kawamura et al. 2016	9 mužů	2×10 min s 3 min pauzou první den experimentu 15 min po zátěži následně každý den až do sedmého dne od zátěže	běh z kopce po dobu 30 min na úrovni 75-85 % VO2max	VAS	→
					CK	→
					Mb	→
					BAP	↓
					La	→
					d-ROMs	→
					IL-6	↓
					IL-17a	→
					MDA	→
					MPO	→
Zvyšování střevního H_2	Eda et al. 2022	10 mužů	3×200 ml H_2-mléka večer před experimentem a 1×200 ml 4 h před výkonem	jízda na kole po dobu 60 min na úrovni 75 % VO_2max	VAS	↓
					8-OHdG	↓
					La	↓

Vysvětlivky: La: laktát; CK: kreatinkináza; d-ROMs: diakronově reaktivní metabolity kyslíku; BAP: biologický antioxidační potenciál; BAP/dROMs: celkový antioxidační potenciál; 8-OHdG: 8-hydroxy-2-deguanosin; LDH: laktát dehydrogenáza; Mb: myoglobin; IL-6: interleukin 6; IL-17a: interleukin 17 a; MDA: malondyaldehyd; MPO: myeloperoxidáza

6 DISKUSE

V této práci jsem pomocí vyhledávací strategie a následném procesu eliminace nevyhovujících studií získal 8 relevantních studií zkoumajících účinky molekulárního vodíku na pozátěžové zotavení. Dané studie jsou však rozmanité ať už v provedení daných experimentů, použitých markerů zotavení a poškození organismu nebo v metodách aplikace H_2.

Ve všech studiích byly testy prováděny na mužích. Celkový počet účastníků studií byl 125 osob s průměrným věkem 22 let ve věkovém rozpětí od 15 do 30 let. Ve většině studií se výzkumu účastnilo od 8 do 12 účastníků. Výjimkou byl pouze výzkum, který provedli Sun & Sun (2017), do kterého bylo zařazeno šedesát účastníků. Ve výzkumech Aokiho et al. (2012), Dobashiho et al. (2020) a Sun & Sun (2017) jsou participanty trénovaní muži. Naopak výzkum Botka et al. (2022) se provádí s muži netrénovanými. Ve zbylých studiích nebylo specifikováno, zda jsou muži trénovaní, či nikoliv.

V akceptovaných studiích byl nejčetnější způsob zatížení jízda na kole, v menší míře byly použity běžecké testy. Ve studiích se nacházelo také plavecké zatížení a odporový trénink, tyto způsoby zatížení byly použity vždy pouze v jedné studii. U běhu a jízdy na kole byla intenzita zatížení 75 % VO_2max s délkou trvání 30 minut ve výzkumech Aokiho et al. (2012), Shibayamy et al. (2020) a Kawamuray et al. (2016) nebo s délkou 60 minut ve výzkumu Edy et al. (2022). Plavecké zatížení najdeme ve studii, kterou uvádí Sun & Sun (2017). V této studii trvá plavecké zatížení 2 hodiny v rámci plaveckého tréninku a opakuje se 8 po sobě jdoucích dní. Botek et al. (2022) ve svém výzkumu použili odporový trénink. Ve zbylých dvou studiích (Dobashi et al., 2020; Shibayama et al., 2017) byly prováděny opakované sprinty na kole ve třech po sobě jdoucích dnech. Ve studiích Aokiho et al. (2012) a Dobashiho et al. (2020) jsou zátěžové testy doplněné ještě o maximální isokinetické kontrakce a v případě druhé jmenované studie také o vertikální skoky.

Jak je již na začátku této kapitoly uvedené, je velmi složité přesně porovnat účinnost H_2, protože je v nalezených studiích rozmanitý způsob užívání H_2. Ve většině studií je použita metoda příjmu molekulárního vodíku pomocí hydrogenované vody (HRW). Pouze profylaktická dávka HRW před zátěží byla aplikována jen v experimentu Aokiho et al. (2012). Příjem vody před a po zátěži zvolili ve svých výzkumech Shibayama et al. (2017) a Dobashi et al. (2020). Botek et al. (2022) a Sun & Sun (2017) zvolili ve svých studiích příjem vody jak před a po zatížení, tak i v jeho průběhu.

V dalších třech studiích byly použity tři různé metody příjmu H_2. Shibayama et al. (2020) zkoumal účinky inhalace plynu s H_2 okamžitě po zátěži po dobu 60 minut. Kawamura et al. (2016) zvolil ve své studii příjem vodíku pomocí koupelí s obsahem H_2. Účastníci studie se koupali vždy

2×10 minut. První koupel proběhla 15 minut po zátěži a následně účastníci koupel opakovali ještě následujících sedm dní po zátěži. Eda et al. (2022) použil ke zkoumání účinnosti H_2 metodu zvýšení střevního H_2 pomocí pití speciálního H_2-mléka. Účastníci výzkumu mléko užívali pouze před zátěžovým testem. Z výše uvedených metod byly nejúčinnější aplikace H_2 pomocí pití HRW a zvyšování střevního H_2 pitím H_2-mléka. Aplikace H_2 inhalací a koupelí se jako účinné neprokázaly.

Snížení biomarkeru oxidativního poškození jsme zaznamenali pouze v případě dvou studií, (Eda et al., 2022; Shibayama et al., 2020) konkrétně redukci hladiny 8-OHdG. V ostatních studiích, které se zabývaly pozátěžovým oxidačním stresem nebyl zaznamenám signifikantní vliv H_2 na žádný ze sledovaných markerů oxidačního poškození. Mezi ukazateli oxidačního poškození jsme mohli nejčastěji pozorovat dynamiku markeru d-ROMs. Hodnota d-ROMs se však v žádné ze studií prokazatelně nezměnila (Aoki et al., 2012; Dobashi et al., 2020; Kawamura et al., 2016; Shibayama et al., 2020).

Nejčastěji použitými markery antioxidační kapacity byly BAP a BAP/d-ROMs (Aoki et al., 2012; Dobashi et al., 2020; Kawamura et al., 2016; Shibayama et al., 2017, 2020), v jedné studii se vyskytovala i hodnota T-AOC (Sun & Sun, 2017). Mezi výsledky antioxidační kapacity byly značné rozdíly, a tak nebyl účinek H_2 na tyto ukazatele signifikantní. Hodnoty markerů antioxidační kapacity jsou úzce spjaté s oxidačním poškozením a společně s markery oxidativního poškození určují celkovou míru oxidačního poškození (Shibayama et al., 2020).

Úroveň DOMS jsem hodnotil pomocí VAS, kreatinkinázy a myoglobinu. Hodnocení pomocí VAS škály se nacházelo ve třech studiích a ve dvou z nich se hodnota VAS snížila (Botek et al., 2022; Eda et al., 2022). VAS škála se dá považovat za dobrý ukazatel svalového poškození a pozátěžového zánětu, protože podle Kawamury et al. (2018) hodnota VAS koreluje s kreatinkinázou, myogobinem a IL-6, což jsou ukazatelé pozátěžového zánětu a svalového poškození (Lee et al., 2017). Změny nebyly signifikantní u kreatinknázy a myoglobinu (Aoki et al., 2012; Botek et al., 2022; Kawamura et al., 2016; Shibayama et al., 2020). Oproti tomu byl zjištěn signifikantní účinek H_2 na redukci IL-6 (Kawamura et al., 2016).

Na snížení pozátěžového poškození svalů se v porovnání s molekulárním vodíkem vyplatí více použít regenerační techniky jako je masáž, kontrastní vodní terapie kompresní terapie a kryoterapie. Při tomto tvrzení vycházím z porovnání požátěžoých hodnot kreatinkinázy z metaanalýzy Dupuyho et al. (2018) a hodnot zjištěných v mé práci. Oproti tomu jsem zjistil, že molekulární vodík má stejnou účinnost na pozátěžové svalové poškození jako užívání vitamínu C. Při tomto tvrzení opět vycházím z porovnání pozátěžových hodnot kreatinkinázy, tentokrát z metaanalýzy, kterou napsal Righi et al. (2020).

7 ZÁVĚRY

Po analýze výsledků práce jsem dospěl k závěru, že H_2 urychluje regeneraci po vytrvalostním tělesném zatížení. Podle hodnot ukazatele VAS aplikace H_2 signifikantně snižuje DOMS, tudíž dochází ke snížení bolestivost svalů v průběhu regenerace. Snížená hodnota VAS ale nebyla podpořena redukcí oxidačního poškození a zánětlivých markerů zkoumaných v akceptovaných studiích. Účinek H_2 byl signifikantně prokázán pouze u některých biomarkerů. U většiny biomarkerů účinek H_2 signifikantně prokázán nebyl. Pro přesné určení mechanismu vlivu aplikace H_2 na regeneraci po tělesném zatížení však bude potřeba dalších výzkumů.

Ze studií relevantních pro tuto práci mi vyšla jako nejúčinnější metoda aplikace H_2, zvyšování střevního H_2 pomocí mléka obsahujícího H_2 při aplikaci před výkonem po více menších dávkách o objemu 200 ml. Další účinnost nastala při aplikaci hydrogenované vody před, během a po výkonu opět při menších dávkách okolo 200 ml. Při nerealizovatelné aplikaci během výkonu lze hydrogenovanou vodu aplikovat v podobné účinnosti před a po zátěži ve větších dávkách okolo 500 ml. Metody aplikace inhalace a koupele se v mé práci neprokázaly jako účinné. Přesné určení nejúčinnější metody však není úplně možné, pro větší přesnost by bylo potřeba více studií se stejným testovacím protokolem a pro úplnou přesnost i se stejnými participanty výzkumů.

8 SOUHRN

Molekulární vodík je v posledním desetiletí jedno ze zajímavých témat výzkumu, které je na vzestupu. Výzkum účinků molekulárního vodíku se ve sportovním odvětví zkoumá hlavně pro jeho antioxidační schopnosti, které můžou napomoct ke zvyšování fyzické výkonnosti a k urychlení regenerace (Ohsawa et al., 2007). Tato práce se zabývá využitím molekulárního vodíku právě v regeneraci.

Pro výzkum účinnosti H_2 je v této práci vytvořen přehled studií, které se zabývají výzkumem H_2 jako prostředku pro zefektivnění regenerace. Studie jsem vyhledal pomocí modifikované vyhledávací strategie PICOT a následně jsem zredukoval jejich počet podle obsahu relevantního pro tuto studii. Ve výsledném počtu osmi akceptovaných studií jsem porovnával účinky H_2 oproti placebu na markery oxidativního poškození, zánětlivé markery a vliv H_2 na DOMS.

Po analýze výsledků jsem zjistil, že H_2 urychluje regeneraci a snižuje DOMS po vytrvalostním tělesném zatížení. Avšak výsledek se potvrdil pouze subjektivním ukazatelem bolestivosti svalů VAS. Většina zkoumaných biomarkerů oxidačního poškození a zánětlivých markerů signifikantně snížena nabyla. Je tedy potřeba dalších výzkumů ke zjištění mechanismu, jakým H_2 na regeneraci po vytrvalostním tělesném zatížení působí.

9 SUMMARY

Molecular hydrogen is one of the exciting research topics that has been on the rise in the last decade. Research on the effects of molecular hydrogen has been investigated in the sports sector mainly for its antioxidant capabilities that can help to enhance physical performance and accelerate recovery (Ohsawa et al., 2007). This thesis focuses on the use of molecular hydrogen specifically in recovery.

To investigate the efficacy of H_2, this thesis reviews studies that have examined H_2 as an instrument to enhance recovery. I searched for studies using a modified PICOT search strategy and then reduced the number of studies according to the content relevant to this study. In the resulting pool of eight accepted studies, I compared the effects of H_2 versus placebo on markers of oxidative damage, inflammatory markers, and the effect of H_2 on DOMS.

After the analysis of the results, I found that H_2 accelerates recovery and reduces DOMS after endurance exercise. However, the result was only confirmed by the subjective muscle soreness marker VAS. Most of the investigated biomarkers of oxidative damage and inflammatory markers were significantly reduced. Thus, further research is needed to determine the mechanism in which H_2 acts on recovery after endurance exercise.

10 REFERENČNÍ SEZNAM

Aoki, K., Nakao, A., Adachi, T., Matsui, Y., & Miyakawa, S. (2012). Pilot study: Effects of drinking hydrogen-rich water on muscle fatigue caused by acute exercise in elite athletes. *Medical Gas Research*, *2*(1), 12. https://doi.org/10.1186/2045-9912-2-12

Armstrong, R. B. (1984). Mechanisms of exercise-induced delayed onset muscular soreness: a brief review. *Medicine and science in sports and exercise*, *16*(6), 529–538. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6392811

Avela, J., Kyröläinen, H., Komi, P. V., & Rama, D. (1999). Reduced reflex sensitivity persists several days after long-lasting stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, *86*(4), 1292–1300. https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.4.1292

Bartůňková, S. (2006). *Fyziologie člověka a tělesných cvičení : učební texty pro studenty fyzioterapie a studia tělesná a pracovní výchova zdravotně postižených*. Nakladatelství Karolinum.

Bartůňková, S. (2013). *Fyziologie pohybové zátěže : učební texty pro studenty tělovýchovných oborů*. Univerzita Karlova v Praze.

Bayr, H. (2005). Reactive oxygen species. *Critical Care Medicine*, *33*(Suppl), S498–S501. https://doi.org/10.1097/01.CCM.0000186787.64500.12

Botek, M., Krejčí, J., McKune, A., Valenta, M., & Sládečková, B. (2022). Hydrogen Rich Water Consumption Positively Affects Muscle Performance, Lactate Response, and Alleviates Delayed Onset of Muscle Soreness After Resistance Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *36*(10), 2792–2799. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003979

Botek, M., Neuls, F., Klimešová, I., & Vyhnálek, J. (2017). *Fyziologie pro tělovýchovné obory : (vybrané kapitoly). Část I* (1. vydání). Univerzita Palackého v Olomouci.

Byrd, S. K. (1992). Alterations in the sarcoplasmic reticulum: a possible link to exercise-induced muscle damage. *Medicine and science in sports and exercise*, *24*(5), 531–536. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1569849

Cheung, K., Hume, P. A., & Maxwell, L. (2003). Delayed Onset Muscle Soreness. *Sports Medicine*, *33*(2), 145–164. https://doi.org/10.2165/00007256-200333020-00005

Davies, K. J. A., Quintanilha, A. T., Brooks, G. A., & Packer, L. (1982). Free radicals and tissue damage produced by exercise. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *107*(4), 1198–1205. https://doi.org/10.1016/S0006-291X(82)80124-1

Di Meo, S., Reed, T. T., Venditti, P., & Victor, V. M. (2016). Role of ROS and RNS Sources in Physiological and Pathological Conditions. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2016*,

1–44. https://doi.org/10.1155/2016/1245049

Di Meo, S., & Venditti, P. (2020). Evolution of the Knowledge of Free Radicals and Other Oxidants. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2020*, 1–32. https://doi.org/10.1155/2020/9829176

Dinet, J., Favart, M., & Passerault, J.-M. (2004). Searching for information in an online public access catalogue (OPAC): the impacts of information search expertise on the use of Boolean operators. *Journal of Computer Assisted Learning*, *20*(5), 338–346. https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.2004.00093.x

Dobashi, S., Takeuchi, K., & Koyama, K. (2020). Hydrogen-rich water suppresses the reduction in blood total antioxidant capacity induced by 3 consecutive days of severe exercise in physically active males. *Medical Gas Research*, *10*(1), 21. https://doi.org/10.4103/2045-9912.279979

Dole, M., Wilson, F. R., & Fife, W. P. (1975). Hyperbaric hydrogen Therapy: A Possible Treatment for Cancer. *Science*, *190*(4210), 152–154. https://doi.org/10.1126/science.1166304

Dovalil, J. (2012). *Výkon a trénink ve sportu* (4. vydání). Olympia.

Drobnic, F., Riera, J., Appendino, G., Togni, S., Franceschi, F., Valle, X., Pons, A., & Tur, J. (2014). Reduction of delayed onset muscle soreness by a novel curcumin delivery system (Meriva®): a randomised, placebo-controlled trial. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, *11*(1). https://doi.org/10.1186/1550-2783-11-31

Dubin, A. E., & Patapoutian, A. (2010). Nociceptors: the sensors of the pain pathway. *Journal of Clinical Investigation*, *120*(11), 3760–3772. https://doi.org/10.1172/JCI42843

Dupuy, O., Douzi, W., Theurot, D., Bosquet, L., & Dugué, B. (2018). An Evidence-Based Approach for Choosing Post-exercise Recovery Techniques to Reduce Markers of Muscle Damage, Soreness, Fatigue, and Inflammation: A Systematic Review With Meta-Analysis. *Frontiers in Physiology*, *9*. https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00403

Dylevský, I. (2009). *Funkční anatomie*. Grada Publishing.

Eda, N., Tsuno, S., Nakamura, N., Sone, R., Akama, T., & Matsumoto, M. (2022). Effects of Intestinal Bacterial Hydrogen Gas Production on Muscle Recovery following Intense Exercise in Adult Men: A Pilot Study. *Nutrients*, *14*(22), 4875. https://doi.org/10.3390/nu14224875

Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate Threshold Concepts. *Sports Medicine*, *39*(6), 469–490. https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003

Ge, L., Yang, M., Yang, N.-N., Yin, X.-X., & Song, W.-G. (2017). Molecular hydrogen: a preventive and therapeutic medical gas for various diseases. *Oncotarget*, *8*(60), 102653–102673. https://doi.org/10.18632/oncotarget.21130

Gulick, D. T., & Kimura, I. F. (1996). Delayed Onset Muscle Soreness: What Is It and How Do We Treat It? *Journal of Sport Rehabilitation*, *5*(3), 234–243. https://doi.org/10.1123/jsr.5.3.234

Gulick, D. T., Kimura, I. F., Sitler, M., Paolone, A., & Kelly, J. D. (1996). Various treatment techniques on signs and symptoms of delayed onset muscle soreness. *Journal of athletic training*, *31*(2), 145–152. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16558388

Halliwell, B. (1995). Antioxidant characterization. *Biochemical Pharmacology*, *49*(10), 1341–1348. https://doi.org/10.1016/0006-2952(95)00088-H

Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (2015). *Free Radicals in Biology and Medicine*. Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198717478.001.0001

Hong, Y., Chen, S., & Zhang, J.-M. (2010). Hydrogen as a Selective Antioxidant: A Review of Clinical and Experimental Studies. *Journal of International Medical Research*, *38*(6), 1893–1903. https://doi.org/10.1177/147323001003800602

Hošková, B., Majorová, S., & Nováková, P. (2015). *Masáž a regenerace ve sportu* (2. vydání). Univerzita Karlova v Praze, nakladatelství Karolinum.

Hough, T. (1902). Ergographic Studies in Muscular Soreness. *American Physical Education Review*, *7*(1), 1–17. https://doi.org/10.1080/23267224.1902.10649879

Howatson, G., & van Someren, K. A. (2008). The Prevention and Treatment of Exercise-Induced Muscle Damage. *Sports Medicine*, *38*(6), 483–503. https://doi.org/10.2165/00007256-200838060-00004

Jirka, Z. (1990). *Regenerace a sport*. Olympia.

Kajiya, M., Silva, M. J. B., Sato, K., Ouhara, K., & Kawai, T. (2009). Hydrogen mediates suppression of colon inflammation induced by dextran sodium sulfate. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, *386*(1), 11–15. https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2009.05.117

Kawamura, T., Gando, Y., Takahashi, M., Hara, R., Suzuki, K., & Muraoka, I. (2016). Effects of hydrogen bathing on exercise-induced oxidative stress and delayed-onset muscle soreness. *Japanese Journal of Physical Fitness and Sports Medicine*, *65*(3), 297–305. https://doi.org/10.7600/jspfsm.65.297

Kawamura, T., Higashida, K., & Muraoka, I. (2020). Application of Molecular Hydrogen as a Novel Antioxidant in Sports Science. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, *2020*, 1–7. https://doi.org/10.1155/2020/2328768

Kawamura, T., Suzuki, K., Takahashi, M., Tomari, M., Hara, R., Gando, Y., & Muraoka, I. (2018). Involvement of Neutrophil Dynamics and Function in Exercise-Induced Muscle Damage and Delayed-Onset Muscle Soreness: Effect of Hydrogen Bath. *Antioxidants*, *7*(10), 127. https://doi.org/10.3390/antiox7100127

Kubota, M., Shimmura, S., Kubota, S., Miyashita, H., Kato, N., Noda, K., Ozawa, Y., Usui, T., Ishida,

S., Umezawa, K., Kurihara, T., & Tsubota, K. (2011). Hydrogen and N -Acetyl- l -Cysteine Rescue Oxidative Stress-Induced Angiogenesis in a Mouse CornealAlkali-Burn Model. *Investigative Opthalmology & Visual Science*, *52*(1), 427. https://doi.org/10.1167/iovs.10-6167

Kyralová, M., & Matoušová, M. (1996). *Zdravotní tělesná výchova*. Onyx.

Lee, E. C., Fragala, M. S., Kavouras, S. A., Queen, R. M., Pryor, J. L., & Casa, D. J. (2017). Biomarkers in Sports and Exercise: Tracking Health, Performance, and Recovery in Athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*, *31*(10), 2920–2937. https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002122

Lehnert, M., Botek, M., Sigmund, M., Smékal, D., Šťastný, P., Malý, T., Háp, P., Bělka, J., & Neuls, F. (2014). *Kondiční trénink*. Univerzita Palackého v Olomouci.

Lehnert, M., Kudláček, M., Háp, P., Bělka, J., Neuls, F., Ješina, O., Hůlka, K., Viktorjeník, D., Langer, F., Kratochvíl, J., Rozsypal, R., & Šťastný, P. (2014). *Sportovní trénink I*. Univerzita Palackého v Olomouci.

Máček, M., & Radvanský, J. (2011). *Fyziologie a klinické aspekty pohybové aktivity*. Galén.

MacIntyre, D. L., Reid, W. D., & McKenzie, D. C. (1995). Delayed Muscle Soreness. *Sports Medicine*, *20*(1), 24–40. https://doi.org/10.2165/00007256-199520010-00003

McLellan, T. M., & Skinner, J. S. (1981). The use of the aerobic threshold as a basis for training. *Canadian journal of applied sport sciences. Journal canadien des sciences appliquees au sport*, *6*(4), 197–201. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/7318138

Noakes, T. D. (2006). The limits of endurance exercise. *Basic Research in Cardiology*, *101*(5), 408–417. https://doi.org/10.1007/s00395-006-0607-2

Nogueira, J. E., Passaglia, P., Mota, C. M. D., Santos, B. M., Batalhão, M. E., Carnio, E. C., & Branco, L. G. S. (2018). Molecular hydrogen reduces acute exercise-induced inflammatory and oxidative stress status. *Free Radical Biology and Medicine*, *129*, 186–193. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.09.028

O'Grady, M., Hackney, A. C., Schneider, K., Bossen, E., Steinberg, K., Douglas, J. M., Murray, W. J., & Watkins, W. D. (2000). Diclofenac sodium (Voltaren) reduced exercise-induced injury in human skeletal muscle. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *32*(7), 1191–1196. https://doi.org/10.1097/00005768-200007000-00001

Ohsawa, I., Ishikawa, M., Takahashi, K., Watanabe, M., Nishimaki, K., Yamagata, K., Katsura, K., Katayama, Y., Asoh, S., & Ohta, S. (2007). Hydrogen acts as a therapeutic antioxidant by selectively reducing cytotoxic oxygen radicals. *Nature Medicine*, *13*(6), 688–694. https://doi.org/10.1038/nm1577

Ohta, S. (2012). Molecular hydrogen is a novel antioxidant to efficiently reduce oxidative stress

with potential for the improvement of mitochondrial diseases. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, *1820*(5), 586–594. https://doi.org/10.1016/j.bbagen.2011.05.006

Ohta, S. (2014). Molecular hydrogen as a preventive and therapeutic medical gas: initiation, development and potential of hydrogen medicine. *Pharmacology & Therapeutics*, *144*(1), 1–11. https://doi.org/10.1016/j.pharmthera.2014.04.006

Patel, R. P., McAndrew, J., Sellak, H., White, C. R., Jo, H., Freeman, B. A., & Darley-Usmar, V. M. (1999). Biological aspects of reactive nitrogen species. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics*, *1411*(2–3), 385–400. https://doi.org/10.1016/S0005-2728(99)00028-6

Pipe, A., & Ayotte, C. (2002). Nutritional Supplements and Doping. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 245–249.

Powers, S. K., & Jackson, M. J. (2008). Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production. *Physiological Reviews*, *88*(4), 1243–1276. https://doi.org/10.1152/physrev.00031.2007

Powers, S. K., Ji, L. L., Kavazis, A. N., & Jackson, M. J. (2011). Reactive Oxygen Species: Impact on Skeletal Muscle. In *Comprehensive Physiology* (s. 941–969). Wiley. https://doi.org/10.1002/cphy.c100054

Powers, S. K., Nelson, W. B., & Hudson, M. B. (2011). Exercise-induced oxidative stress in humans: Cause and consequences. *Free Radical Biology and Medicine*, *51*(5), 942–950. https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2010.12.009

Reid, M. B. (2016). Reactive Oxygen Species as Agents of Fatigue. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *48*(11), 2239–2246. https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001006

Reid, M. B., Khawli, F. A., & Moody, M. R. (1993). Reactive oxygen in skeletal muscle. III. Contractility of unfatigued muscle. *Journal of Applied Physiology*, *75*(3), 1081–1087. https://doi.org/10.1152/jappl.1993.75.3.1081

Reinhard, U., Müller, P. H., & Schmülling, R.-M. (1979). Determination of Anaerobic Threshold by the Ventilation Equivalent in Normal Individuals. *Respiration*, *38*(1), 36–42. https://doi.org/10.1159/000194056

Righi, N. C., Schuch, F. B., De Nardi, A. T., Pippi, C. M., de Almeida Righi, G., Puntel, G. O., da Silva, A. M. V., & Signori, L. U. (2020). Effects of vitamin C on oxidative stress, inflammation, muscle soreness, and strength following acute exercise: meta-analyses of randomized clinical trials. *European Journal of Nutrition*, *59*(7), 2827–2839. https://doi.org/10.1007/s00394-020-02215-2

Riva, J. J., Malik, K. M. P., Burnie, S. J., Endicott, A. R., & Busse, J. W. (2012). What is your research question? An introduction to the PICOT format for clinicians. *The Journal of the Canadian*

Chiropractic Association, *56*(3), 167–171. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22997465

Shibayama, Y., Dobashi, S., Arisawa, T., Fukuoka, T., & Koyama, K. (2020). Impact of hydrogen-rich gas mixture inhalation through nasal cannula during post-exercise recovery period on subsequent oxidative stress, muscle damage, and exercise performances in men. *Medical Gas Research*, *10*(4), 155. https://doi.org/10.4103/2045-9912.304222

Shibayama, Y., Takeuchi, K., Dobashi, S., & Koyama, K. (2017). Hydrogen-rich Water Modulates Redox Status Repeated Three Consecutive Days Of Strenuous Exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *49*(5S), 941. https://doi.org/10.1249/01.mss.0000519562.97355.a8

Stauber, W. T. (1989). Eccentric Action of Muscles: Physiology, Injury, and Adaptation. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, *17*, 157–185.

Steimle, K. L., Mogensen, M. L., Karbing, D. S., Bernardino de la Serna, J., & Andreassen, S. (2011). A model of ventilation of the healthy human lung. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, *101*(2), 144–155. https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2010.06.017

Sun, Y.-P., & Sun, L. (2017). Selective protective effect of hydrogen water on free radical injury of athletes after high-intensity exercise. *Biomedical research-India*.

Svedahl, K., & MacIntosh, B. R. (2003). Anaerobic Threshold: The Concept and Methods of Measurement. *Canadian Journal of Applied Physiology*, *28*(2), 299–323. https://doi.org/10.1139/h03-023

Torre, M. F., Martinez-Ferran, M., Vallecillo, N., Jiménez, S. L., Romero-Morales, C., & Pareja-Galeano, H. (2021). Supplementation with Vitamins C and E and Exercise-Induced Delayed-Onset Muscle Soreness: A Systematic Review. *Antioxidants*, *10*(2), 279. https://doi.org/10.3390/antiox10020279

Torres, R., Ribeiro, F., Alberto Duarte, J., & Cabri, J. M. H. (2012). Evidence of the physiotherapeutic interventions used currently after exercise-induced muscle damage: Systematic review and meta-analysis. *Physical Therapy in Sport*, *13*(2), 101–114. https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2011.07.005

Wan, J., Qin, Z., Wang, P., Sun, Y., & Liu, X. (2017). Muscle fatigue: general understanding and treatment. *Experimental & Molecular Medicine*, *49*(10), e384–e384. https://doi.org/10.1038/emm.2017.194

Zainuddin, Z., Newton, M., Sacco, P., & Nosaka, K. (2005). Effects of massage on delayed-onset muscle soreness, swelling, and recovery of muscle function. *Journal of athletic training*, *40*(3), 174–180. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16284637

Zeng, C., Luo, G., Xu, S., & Li, Y. (2022). The Application of DOMS Mechanism and Prevention in Physical Education and Training. *Journal of Healthcare Engineering*, *2022*, 1–5. https://doi.org/10.1155/2022/9654919