

UNIVERZITA KARLOVA
Fakulta tělesné výchovy a sportu

**Sledování mozkové aktivity v prolongované zádrži dechu
u freediverů**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

MUDr. David Pánek, Ph.D.

Vypracovala:

Pavla Skopalová

Praha, srpen 2019

Prohlašuji, že jsem závěrečnou diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla 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 diplomanta

Evidenční list

Souhlasím se zapůjčením své diplomové práce ke studijním účelům. Uživatel svým podpisem stvrzuje, že tuto diplomovou práci použil ke studiu a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno a příjmení:

Fakulta / katedra:

Datum vypůjčení:

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala zejména vedoucímu své diplomové práce MUDr. Davidu Pánkovi, Ph.D. za věnovaný čas, rady a odborné vedení v průběhu celého zpracovávání zvoleného tématu. Za podporu a rady bych ráda poděkovala také Mgr. Milanu Martínkovi. V neposlední řadě děkuji všem probandům, kteří se výzkumu účastnili, jmenovitě pak Martinu Zajacovi.

Abstrakt

Název: Sledování mozkové aktivity v prolongované zádrži dechu u freediverů

Cíle: Cílem této práce je zmonitorování elektrické aktivity mozku v prolongované zádrži dechu u nádechových potapěčů. Srovnávány byly stavy při zádrži dechu ve vodě a na suchu vůči sobě a také oproti stavu klidovému, vždy se zavřenýma očima. Zdrojová aktivita mozku byla snímána ze skalpového EEG a vyhodnocena pomocí programu sLORETA.

Metody: Výzkum proběhl na 11 zdravých, dospělých osobách, jednalo se o muže ve věkovém rozmezí 26 – 51 let. Data byla získávána ze skalpového EEG. Záznam byl pořízen nejprve v klidovém stavu se zavřenýma očima a dále při maximální prolongované zádrži dechu na suchu a následně ve vodě se zavřenýma očima. Délky prolongovaných zádrží se u jednotlivých probandů pohybovaly od 2:15 min do 5:30 min. Mezi jednotlivými zádržemi byly dodržovány pauzy v minimální délce 3 minuty dle potřeb probanda. Porovnávány byly tři párové skupiny – prolongovaná zádrž dechu na suchu oproti klidovému stavu před zádrží; prolongovaná zádrž dechu ve vodě oproti klidovému stavu před zádrží a prolongovaná zádrž dechu ve vodě oproti prolongované zádrži dechu na suchu. Vybrané bezartefaktové úseky EEG záznamu byly zpracovány pomocí programu sLORETA. Ve statistickém modulu programu byla statistická diference při porovnávání jednotlivých stavů vypočítávána pomocí párového t-testu s logaritmickou transformací dat o parametru vyhlazení 0,2. Data byla randomizována s hodnotou 5000 na hladině významnosti $p \leq 0,10$ s korelací pro opakované testování. Zdrojová aktivita byla následně pro jednotlivá frekvenční pásma zobrazena v 3D Talarachově atlasu.

Výsledky: Získaná data prokázala statisticky významnou diferenci v aktivitě mozku u všech tří porovnávaných párových skupin. Při porovnání stavu při prolongované zádrži dechu na suchu oproti klidovému stavu došlo ke snížení proudové hustoty v pásmu beta a gama. Jednalo se o snížení aktivity v oblastech zj. premotorických, motorických a dále somatosensorických a v limbickém systému. Zvýšená proudová hustota byla v pásmu delta, zde se aktivovaly oblasti kortexu zodpovědné za

somatosensorické funkce, oblasti funkčně spojené s volní kontrolou dýchání, proprioceptivní stimulací a hlubokou viscerální percepcí. Porovnání stavu při prolongované zádrži dechu ve vodě oproti klidovému stavu prokázala v rámci pásem beta, gama a delta podobné výsledky jako při zádrži dechu na suchu. Navíc se aktivovaly oblasti spojené se zpracováním sluchových podnětů, pozorností, inhibičními procesy nebo vnitřní řečí. Pouze při zádrži dechu ve vodě pak byla v rámci frekvenčního pásma theta zvýšena aktivita v oblastech spojených se zpracováním negativních emocí, proprioceptí, předvídáním bolesti nebo motorickou exekutivní kontrolou chování. Na nižší statistické významnosti se ukázal také nárůst aktivity alfa frekvenčního pásma s lokalizací ve frontálních oblastech mozkové kůry a můžeme zde hledat souvislost s tzv. flow stavy. Stav prolongované zádrže dechu ve vodě oproti prolongované zádrži dechu na suchu ukazuje nárůst aktivity v pásmu delta a na nižší statistické významnosti také theta. Při zádržích dechu ve vodě se s vyšší mírou aktivovaly oblasti spojené se somatosensorikou, emocemi a jejich zpracováním nebo sebereflexí.

Klíčová slova: freediving, prolongovaná zádrž dechu, apnoe, EEG, sLORETA, hypoxie, hyperkapnie, Brodmannovy zóny

Abstract

Title: Prolonged apnea: monitoring brain activity in freedivers

Objectives: The aim of this study is to monitor the brain electrical activity during the prolonged apnea in freedivers. Prolonged apnea in the water and prolonged dry apnea were compared to each other and also to a resting state before the apnea, all states with the eyes closed. Brain activity was obtained from the scalp EEG and evaluated using the sLORETA program.

Methods: The research was conducted in 11 healthy men at the age of 23 – 51. The data was obtained from the scalp EEG. The record was first taken at a resting state before the apneas with eyes closed, then at maximum prolonged dry apnea with eyes closed and finally at maximum prolonged apnea in the water with eyes closed. The lengths of the prolonged apneas ranged from 2:15 minutes to 5:30 minutes in individual probands. There were pauses of at least three minutes between each apnea as by the proband's needs. The compared pair groups were following: prolonged apnea in the water against prolonged dry apnea, prolonged apnea in the water against resting state before the apnea and finally prolonged dry apnea against resting state before the apnea, all with the eyes closed. Selected sections of EEG record without artefacts were processed by sLORETA program. In the statistical module of the program, the statistical difference when comparing the individual states was calculated using a paired t-test with a logarithmic transformation of the data with smoothing parameter of 0,2. Data was randomized with a value of 5000 at a significance level $p \leq 0,10$ with a correlation for retesting. For each frequency band the source activity was then displayed in the 3D Talaraich Atlas.

Results: The obtained data proved statistically significant difference in brain activity in all three compared pair groups. The current density differences by voxels in the beta and gamma frequency bands was decreased when comparing the state of prolonged dry apnea with resting state. The reduction in activity was particularly in areas of premotor, motor and somatosensory functions and in limbic system. The increased current density differences by voxels was in the delta frequency band, where cortex regions responsible

for somatosensory functions, regions functionally associated with voluntary respiratory control, proprioceptive stimulation, and deep visceral perception was activated. Comparison of the prolonged apnea in water with the resting state showed similar results within the beta, gamma and delta frequency bands as in the case of prolonged dry apnea. In addition, areas associated with the processing of auditory stimuli, attention, inhibition processes or internal speech have been activated. Only in prolonged breath hold in the water, activity within areas associated with the processing of negative emotions, proprioception, pain prediction or motor executive behavior control was increased within the theta frequency band. The increase in alpha frequency band activity with localization in the frontal areas of the cerebral cortex also showed lower statistical significance. We can assume here a connection with the so-called flow states. The state of prolonged breath hold in the water versus prolonged breath hold on dry land shows an increase in delta activity and of lower statistical significance also in theta frequency band. In the case of prolonged apnea in the water, areas associated with somatosensory, emotions and their processing or self-reflection have become more active.

Keywords: freediving, prolonged apnea, apnea, EEG, sLORETA, hypoxia, hypercapnia, Brodmann areas

Seznam zkratek

AIH – acute intermittent hypoxia

APP – amyloidový prekurzorový protein

ATP – adenosintrifosfát

A β – beta-amyloid

BA – Brodmannovy arey

CMP – centrální mozková příhoda

CT – computer tomography

DM II – diabetes mellitus II. typu

EEG – elektroencefalografie

EMG – elektromyografie

fMRI – funkční magnetická rezonance

fMRI – funkční magnetická rezonance

LMC – loss of motor control

LOC – loss of consciousness

MEG – magnetoencefalografie

MRI – magnetická rezonance

NREM – non-rapid eye movement fáze spánku

PET – pozitronová emisní tomografie

QEEG – kvantitativní EEG

SF – srdeční frekvence

SIDS – sudden infant death syndrome

SPECT – jednofotonová emisní výpočetní tomografie

VEGF – vascular endothelial growth factor

Obsah

1. ÚVOD	1
2. TEORETICKÁ VÝCHODISKA PRÁCE	2
2.1. Freediving	2
2.2. Regulace dýchání.....	3
2.3. Fyziologie zádrže dechu.....	5
2.4. Ponořovací reflex.....	8
2.4.1. Faktory ovlivňující ponořovací reflex.....	9
2.4.2. Průběh autonomní regulace ponořovacího reflexu.....	11
2.5. Slezina	13
2.6. Vliv prodloužené zádrže dechu na lidské tělo	14
2.6.1. Elektrická aktivita mozku.....	14
2.7. Možné negativní události a vlivy doprovázející opakovaně prodloužené apnoe.....	21
2.7.1. Dlouhodobý vliv.....	24
2.8. Pozitivní účinky kontrolované hypoxie	25
2.9. Elektroencefalografie.....	26
2.9.1. Základní frekvenční pásma	29
2.10. sLORETA	31
2.11. Brodmannovy oblasti.....	32
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	34
3.1. CÍLE A ÚKOLY PRÁCE, HYPOTÉZY	34
3.1.1. Cíl práce	34
3.1.2. Úkoly práce	34
3.1.3. Výzkumné otázky.....	34
3.1.4. Hypotézy	35
3.2. METODIKA PRÁCE	35
3.2.1. Charakteristika souboru.....	35
3.2.2. Použité metody	35
3.2.3. Sběr dat.....	36
3.2.4. Průběh měření	36
3.2.5. Analýza dat.....	39
3.3. VÝSLEDKY	40
3.3.1. Porovnání stavů LAND CE x PRE CE	40
3.3.2. Porovnávání stavů WATER CE x PRE CE	45
3.3.3. Porovnávání stavů WATER CE x LAND CE.....	52
3.4. DISKUSE	56
3.4.1. Diskuse k hypotéze č. 1	56
3.4.2. Diskuse k hypotéze č. 2	60
3.4.3. Diskuse k hypotéze č. 3.....	63
4. ZÁVĚR	66
SEZNAM ZDROJŮ	68
PŘÍLOHY	87
SEZNAM TABULEK	87

1. ÚVOD

Lidské tělo je schopno dosahovat neuvěřitelných výkonů a hranice toho, co je možné, se i v profesionálním sportu neustále posouvají. Freediving neboli nádechové potápění je jednou z disciplín, která fascinuje odbornou i laickou veřejnost. Nejlepší jedinci dokážou zadržet dech i na 11 minut a také vlastními silami dosahovat hloubek až 130 metrů.

Fungování lidského organismu za takto extrémních podmínek je čím dál více v pozornosti odborníků z celého světa. Během volných prolongovaných zádrží dechu a tedy potlačování bazální potřeby dýchat se zkoumají mechanismy mentální kontroly, relaxace, modulace emocí, kardiovaskulárních nebo metabolických adaptací. Studium se zaměřuje také na odhalení vlivu zádrží dechu na aktivitu mozku.

Cílem této práce je zjištění případných změn v elektrické mozkové aktivitě během prolongovaných zádrží dechu prováděných aktivními nádechovými potapěči na suchu i ve vodě a jejich porovnání s klidovým stavem mozku před zádržemi. Poznatky o fungování mozku během prolongované apnoe mohou být užitečné v rámci freedivingu jako takového. Svůj přesah ale mohou mít také v rámci studia regulace dechového cyklu nebo v terapii např. obstrukční spánkové apnoe.

Porozumění klíčovému aspektu freedivingu – relaxaci – bylo důvodem výběru tématu této diplomové práce. Absolutní soustředění a zároveň uvolnění těla i mysli, stav podobný meditativním praxím, je základním předpokladem pro úspěšné prolongované zádrže dechu. Nádechoví potapěči často jako největší benefity jejich sportu zmiňují právě stav relaxace, zlepšení soustředění nebo pozornosti, dále pak jakousi psychosomatickou souhru a harmonizaci celého těla.

Pobyť ve vodě, dechová a protahovací cvičení a výše zmíněná práce s relaxací organismu jsou prvky, které jsou s úspěchem využívány ve fyzioterapii. Využití freedivingu nebo některých jeho aspektů v rámci fyzioterapeutické praxe bylo tedy také důvodem volby tématu.

2. TEORETICKÁ VÝCHODISKA PRÁCE

2.1. Freediving

V posledních třech desetiletích se freediving (označován také jako nádechové nebo volné potápění), stal populárním sportem, který lidé po celém světě provozují závodně i ve volném čase. Reakcí na stále stoupající počet členů freediverské komunity byl v roce 1993 vznik oficiální organizace AIDA (*Association Internationale pour le Développement de l'Apnée*). Zvyšující se zájem a snahy o stanovování nových rekordů vyžadovaly úpravu a sjednocení pravidel pro soutěže a standardizaci bezpečnostních směrnic (Pelizzari, Tovaglieri, 2004). Od té doby je AIDA orgánem pořádajícím soutěže, vedoucím statistiky rekordů, zastřešujícím kluby a také orgánem vydávajícím oficiální tréninkové a výukové materiály včetně bezpečnostních pravidel a jejich revizí.

Obecně lze všechny disciplíny freedivingu rozdělit na *bazénové* a *hloubkové*. Bazénové rozdělujeme na *statickou zádrž dechu (STA)*, kdy jedinec leží na hladině obličejem ve vodě, a *dynamické disciplíny* na vzdálenost (s ploutvemi – *DYN* a bez ploutví – *DNF*). Hloubkové disciplíny se pak liší vybavením, které je potapěči k dispozici. Rozlišujeme *konstatní váhu s ploutvemi (CWT)* a *konstatní váhu bez ploutví (CNF)*. *Free immersion (FIM)* je disciplínou, kdy je hloubky dosaženo pouze ručkováním po laně nahoru i dolů, bez ploutví. *Variabilní váha (VWT)* spočívá v dosažení hloubky pomocí speciálního zařízení – *sledu*, zpět na hladinu používá sportovec své vlastní síly (ručkování po laně s ploutvemi). Poslední hloubková disciplína je již vzhledem ke značným rizikům nezávodní a nazývá se *no limits (NLT)* – k sestupu do hloubky se používá sled, na hladinu je pak freediver tažen pomocí balónu (Pelizzari, Tovaglieri, 2004).

Současný rekord v disciplíně *STA* je u mužů 11 minut 35 sekund, 300 metrů v disciplíně *DYN* s monoploutví, a ponor do hloubky *CWT* –130 metrů (a zpět) taktéž s monoploutví¹. Ve stejných disciplínách u žen je to 9 minut 2 sekundy, 243 metrů a – 107 metrů².

¹ World Records: Current world record table - Man. *AIDA - International: Worldwide freediving community* [online]. Zürich SWITZERLAND: AIDA - International, 2018, 2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.aidainternational.org/worldrecords#recordsMan>.

² World Records: Current world record table - Woman. *AIDA - International: Worldwide freediving community* [online]. Zürich SWITZERLAND: AIDA - International, 2018, 2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.aidainternational.org/worldrecords#recordsWoman>.

Vzhledem ke zřejmému riziku utonutí během ponoru (zj. při disciplínách hloubkových) je freediving často označován jako sport extrémní nebo adrenalinový. Tomu odpovídá svými charakteristikami, kterými jsou extrémní fyzické výkony, určitý stupeň rizika, náročné nebo exotické přírodní prostředí či nutnost použití speciálního vybavení (Breivik, 2010). Ve své podstatě je ale nádechové potápění opakem adrenalinového zážitku. Při prodloužené zádrži dechu, ať už ve formě statické či dynamické, se sportovec chce vyplavení adrenalinu a jeho vlivu na kardiorespirační systém vyhnout. Před výkonem je naopak nutné uvést tělo i mysl do naprosto relaxovaného až meditativního stavu. To nádechoví potapěči často zmiňují jako klíčový aspekt jejich sportu – za prvé je to nejdůležitější dovednost, kterou je potřeba dobře zvládnout pro uspokojivé, příjemné a v neposlední řadě bezpečné potápění. Za druhé je to ten největší benefit, který tento konkrétní sport po výkonu přináší (Strandvad, 2018). Pozitivní emoční odpověď je u potapěčů obecně spojována také s haptikou – přímým dotekem vody a specifickým způsobem pohybu ve vodě. Straughan (2012) popisuje, že ponoření do vody u potapěčů mobilizuje pocity spokojenosti, klidu, vyrovnanosti, bezpečí a vodní prostředí tak samo o sobě může fungovat jako pozitivní činitel psychické pohody jedince.

2.2. Regulace dýchání

Dýchání je automatický mimovolně probíhající proces. Nádech a výdech se pravidelně rytmicky střídají v důsledku aktivity respiračních center uložených v mozgovém kmeni – prodloužené míše a pontu. Délka i frekvence dechu může být ovlivněna na několika úrovních různými mechanismy tak, aby byla co nejlépe přizpůsobena aktuálním požadavkům organismu (Slavíková, Švíglerová, 2012).

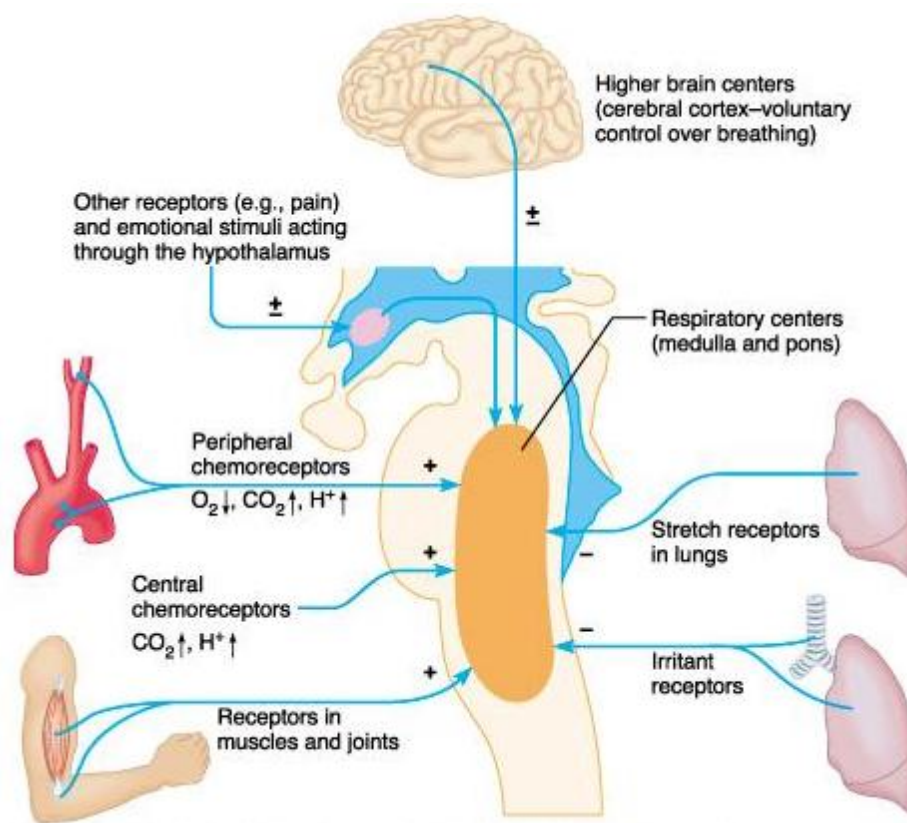
Chemické složení krve, tzn. koncentrace parciálního tlaku kyslíku (pO_2), parciálního tlaku oxidu uhličitého (pCO_2) a pH je udržováno dýcháním na konstantní úrovni. Změny v tomto složení jsou registrovány chemoreceptory – centrálními a periferními, jejichž aktivita ovlivňuje respirační centra. Centrální chemoreceptory rozpoznávají zvyšující se pCO_2 a vodíkových iontů v mozkomíšním moku a intersticiální tekutině. Jakmile hladina koncentrace CO_2 překročí mezní hodnoty (viz dále), dochází ke zvýšení plicní ventilace. Periferní chemoreceptory registrují zvyšování pCO_2 a vodíkových iontů (snížení pH arteriální krve) a snižování pO_2 v arteriální krvi.

V reakci na jeden i druhý podnět dochází taktéž ke zvýšení plicní ventilace (Skow, 2015, Slavíková, Švíglerová, 2012).

Dochází také k aferentaci z dýchacích cest. Receptory zde jsou tvořeny volnými nervovými zakončeními příslušných sensorických nervů. V hladké svalovině průdušnice a bronchů jsou pomalu adaptující se tahové receptory reagující na protažení. K jejich podráždění dochází v důsledku roztažení dýchacích cest při vdechu. Takto zaktivované receptory vedou zpětnou vazbou inhibiční signál do respiračních center v mozkovém kmeni a zabraňují dalšímu nádechu nebo nádech zkracují. To umožňuje a zajišťuje relaxaci a smrštění plic, zahájení výdechu a také ochranu plic proti přílišnému rozpínání. U člověka se tento reflex, který nazýváme *Heringův-Breuerův*, uplatňuje až když dechový objem stoupá nad 1,5 l. Nejedná se tedy o mechanismus klidové regulace dýchání (Skow, 2015, Slavíková, Švíglerová, 2012).

Dále jsou ve sliznici dýchacích cest rychle se adaptující dráždivé receptory, které jsou stimulovány chemickými látkami (např. histaminy, prostglandiny, kouřem z cigaret apod). Podráždění těchto receptorů vede ke zvýšené sekreci hlenu, zúžení laryngu a bronchů. V průduškách jsou bronchiální *C-receptory* – volná nervová zakončení vagových nemyelinizovaných vláken typu C, tyto v blízkosti plicních cév jsou označovány jako *J-receptory*, reagující zejména na mechanické, ale i chemické podráždění. Reflexní odpověď je zrychlené a mělké dýchání, bronchokonstrikce nebo dráždivý kašel. Aferentace také probíhá podrážděním karotických a aortálních baroreceptorů nebo proprioceptorů svalů a kloubů při aktivním i pasivním pohybu (Slavíková, Švíglerová, 2012).

Ovlivnění dechu je možné také z vyšších nervových center. Plicní ventilace je přirozeně vyšší v bdělém stavu než ve spánku v důsledku integrace informací z kortikální oblasti do procesu regulace dýchání. Při vynechání této složky regulace (nejenom během spánku, ale například i při anestezii), je dech řízen pouze na základě reflexů z chemoreceptorů ať už centrálních nebo periferních. Aferentní spoje z limbického systému a hypotalamu ovlivňují dech v souvislosti s emocemi nebo bolestí. Cílená modulace dechu např. při mluvení, hře na hudební nástroj nebo pak přímo zádrž dechu je otázkou volní kontroly – motoneurony dýchacích svalů jsou přímo ovlivněny drahami vycházejícími z mozkové kůry. Vlastní vůlí je dýchání možno regulovat do té doby, dokud nedojde k výrazným odchylkám v pO_2 , pCO_2 a koncentraci vodíkových iontů v arteriální krvi. Poté je tato kontrola nahrazena kontrolou automatickou, viz dále (Bartůňková, 2010, Skow, 2015, Slavíková, Švíglerová, 2012).



Obrázek č. 1 Schéma procesu regulace dýchání (převzato z Marieb, 2001).

2.3. Fyziologie zádrže dechu

Krátký úsek zádrže dechu je součástí každého dechového cyklu. Každý nádech a výdech je mimovolně oddělen krátkou apnoickou pauzou, označujeme ji jako fázi preinspirační a preexpirační. Fáze preinspirační, která následuje po výdechu, trvá asi 250 ms, fáze preexpirační následující nádech je kratší a trvá asi 50-100 ms (Véle, 1997). Konkrétní trvání této krátké apnoické periody je řízeno primárně hodnotami pCO_2 v arteriální krvi (Laurino, 2012, Pollock, 2008). Při cílené prolongované zádrži dechu jsou hodnoty pCO_2 a pO_2 jedněmi z faktorů, které ovlivňují délku apnoe. Během klidového dýchání se hodnoty pCO_2 pohybují podle různých autorů okolo 35-40 mmHg/4,6-5,3 kPa (Skow, 2015, Gyuenet, Bayliss, 2015, Pollock, 2008, Parkes 2005), hodnoty pO_2 pak okolo 90-100 mmHg/12-13,3 kPa (Pollock, 2008, Parkes 2005).

Obecný průběh prolongované apnoe můžeme shrnout do dvou až tří základních fází. Délka trvání první (anglicky *easy-going*) fáze je určena zejména fyziologickými parametry (měnicími se parciálními tlaky O_2 a CO_2). Trvání fáze druhé (anglicky *struggling*) fáze, se z velké části odvíjí také vzhledem k subjektivní schopnosti jedince

tolerovat vzrůstající potřebu obnovit respiraci a tréninkem lze její nástup oddálit (Dejours, 1965, Lin et al. 1974, Lin 1982, Hentsch, Ulmer, 1984). Někteří autoři pak uvádí ještě třetí (anglicky *fighting*) fázi, objevující se u závodních nádechových potapěčů.

Iniciální, easy-going fáze

Iniciální fáze zádrže dechu, obecně velmi dobře tolerovaná, trvá právě do té doby, kdy se hodnoty hromadícího se $p\text{CO}_2$ blíží těm při nevědomé apnoické pauze ve fázi preinspirační a preexpirační – 40-45 mmHg/5,3-6 kPa (Pollock, 2008). Následně koncentrace $p\text{CO}_2$ stoupá až nad hodnoty 50 mmHg/6,6 kPa, trénování a motivování jedinci se mohou přiblížit až k 60 mmHg/8 kPa (Pollock, 2008). Čím delší zádrž je, tím více $p\text{O}_2$ klesá a $p\text{CO}_2$ stoupá (Parkes, 2005). Významné a náhlé zvýšení $p\text{CO}_2$ (nejen při cílené prolongované zádrži dechu, ale také např. v důsledku spánkové apnoe, při obstrukci dýchacích cest, náhodném nebo experimentálním vystavení CO_2) vede k neovladatelnému nutkání obnovit dechový cyklus, dušnosti, nepříjemným pocitům paniky, v případě spánkové apnoe také k probuzení (Gyuenet, Bayliss, 2015). Ke vzrůstající potřebě obnovy dechového cyklu vede také klesající $p\text{O}_2$ (Pollock, 2008, Laurino, 2012).

Struggling fáze

Na počátku struggling fáze obvykle netrénovaní jedinci ukončují zádrž dechu. V důsledku absence dechových pohybů se v této pozdější fázi prolongované apnoe přidává také mimovolní aktivita inspiračního svalstva, především bránice. Nejprve je sporadická, postupně se ale tato aktivita mění ve výrazné, stále se zvětšující kontrakce. Určitá tonická aktivita bránice je spojována s udržováním objemu hrudníku v jeho nádechovém postavení při zádrži dechu. Agostoni (1963) ale nepřímo změřil aktivitu bránice pomocí EMG k hlubšímu objasnění její role v prolongované zádrži (katetry umožňující měření intrathorakálního tlaku testované subjekty spolply, jejich konce pak spočívaly v jícnu v blízkosti bránice a nepřímo měřily i EMG aktivitu). Prokázalo se, že v prvotní fázi žádná rytmická aktivita detekována nebyla. Objevovala se konci zádrže dechu s frekvencí odpovídající dechové, přičemž amplituda i frekvence této křivky se blíže ke konci zádrže dále zvětšovala (Parkes, 2005, Agostoni, 1963). Odpovídající svalová aktivita může být pozorovatelná při prolongované zádrži dechu pouhým okem, jedná se o rytmické záškuby v oblasti břicha a hrudníku, případně záškuby průdušnice proti zavřené glottis. Zjištěná funkce bránice je zřejmě důkazem neustále probíhajícího

centrálního dechového rytmu, který ani při volní prolongované zádrži dechu nepřestává fungovat. Respektive vyvstává otázka, zda tento na začátku zádrže dechu mizí a se stoupajícími koncentracemi $p\text{CO}_2$ v čase zádrže znovu nastupuje nebo je přítomen (ale na počátku tlumen) po celou dobu (Parkes, 2005). Jiné studie naznačují, že úloha kontrakcí bránice, respektive nádechového svalstva, má souvislost s obnovením žilního návratu. Kontrakce mají podpořit tok krve ve *v. cava inferior* a tím zvýšit systolický objem srdce s následnou normalizací minutového srdečního objemu. (Palada *et al.*, 2009). Pozitivní vliv kontrakcí inspiračního svalstva na hemodynamiku a zvýšení okysličení mozku ve svých studiích potvrzují také Dujic *et al.* (2009) a Cross *et al.* (2013).

Lidé běžně, ani za laboratorních podmínek, nejsou schopni natolik prolongované zádrže dechu, která by vedla ke ztrátě vědomí. To potvrzuje teorii o centrálním dechovém rytmu, který není zcela ovlivnitelný vůlí (Lindholm, Lundgren, 2009, Parkes, 2005). Uvádí se, že ke ztrátě vědomí dochází při $p\text{O}_2$ kolem 27 mmHg/3,6 kPa, a $p\text{CO}_2$ mezi 90-120 mmHg/12-16 kPa. I podobné mezí hodnoty byly ale při zádrži dechu dlouhé kolem 14 minut naměřeny (Parkes, 2006). U závodních nádechových potapěčů ke ztrátě vědomí může dojít, častěji ale při hloubkových disciplínách a v souvislosti se změnami parciálních tlaků O_2 a CO_2 při výstupu zpět na hladinu, při tzv. výstupové hypoxii, viz dále (Pollock, 2012, Mijacika, Dujic, 2016, Lindholm, Lundgren, 2009). V určitém bodě zádrže nastává tzv. *breakpoint*, kdy autonomní regulace dýchání převáží nad tou volní a dochází k ukončení zádrže a obnově respirace. Přesný mechanismus breakpointu není znám, kromě dosažení mezních hodnot hodnot parciálních tlaků O_2 a CO_2 se ale jako klíčová ukazuje právě i aktivita bránice (Parkes, 2006, Whitelaw *et al.*, 1981, Lin *et al.*, 1974).

Brániční kontrakce jsou v prolongované zádrži výrazné a vnímané velmi nepříjemně u trénovaných i netrénovaných jedinců. Opakovaným tréninkem lze ale citlivost ke stoupajícím koncentracím $p\text{CO}_2$ snížit. Tím dojde i ke zmenšení stahů bránice a inspiračních svalů a jejich lepší toleranci. Tréninkem lze ovlivnit i určitý psychologický faktor zádrže dechu, potapěči pak umějí lépe zpracovat neodbytné nutkání nadechnout se (Laurino, 2012, Ostrowski *et al.*, 2012).



Obrázek č. 2 Rytmická aktivita bránice ke konci zádrže dechu (její začátek a konec je označen šipkami v kroužku). Horní křivka odpovídá tlaku jícnu, spodní EMG aktivitě bránice (převzato z Parkes, 2006).

Fighting fáze

U profesionálních nádechových potapěčů pokračuje zádrž dechu až k fighting fázi. V této části prolongované apnoe je v důsledku hyperkapnie a hypoxie třeba velkého usilí pro ovládnutí nutkání nadechnout se. Oproti předchozím fázím se během této freediver již nesnaží relaxovat (relaxace není pro velké brániční kontrakce možná), ale naopak využívá svalovou sílu k udržení apnoe. Ukončení zádrže dechu je otázkou tréninku. Potapěč se snaží o maximální výkon, zároveň ale sleduje signály varující před hypoxickým stavem, např. tunelové vidění nebo změněné sluchové vjemy (Steinberg *et al.*, 2017, Schagatay, 2009).

2.4. Ponořovací reflex

Ponořovací reflex (také potápěcí nebo diving reflex, diving response, ponořovací odpověď) je u lidí považován za nejsilnější autonomní reflex (Panneton *et al.*, 2000). Aspekty ponořovacího reflexu byly poprvé popsány v roce 1786 Edmundem Goodywynem, v roce 1870 byly v publikaci Paula Berta shrnuty a popsány přímo fyziologické adaptace organismu během ponoření (Godek, Freeman, 2019). Spolu s *Kratschmerovým apnoickým reflexem* patří mezi reflexy ochraňující dýchací cesty

a plíce, ačkoliv spíše než o reflex se jedná o kombinaci změn, ke kterým v lidském těle dochází – bradykardii, volní či mimovolní apnoi, periferní vasokonstrikci, bronchokonstrikci, hlasivkovému uzávěru a kontrakci sleziny. Tato odpověď je vyvolána obvykle chladovým podrážděním nervových zakončení *n. trigeminus* v kůži střední části čela, okolo kořene nosu a úst – nejčastěji při ponoření obličeje do vody. Ponoření jiných částí těla tuto sérií reakcí nezpůsobí (Nepal *et al.*, 2015). Někteří autoři popisují ponořovací reflex závislý také na podnětech z mechanoreceptorů, ta se ale neukazuje jako tak významná (Kobayasi, Ogawa, 1973, Speck, Bruce, 1978). I prostá prolongovaná zádrž dechu na suchu vede ke zpomalení srdeční frekvence a dalším změnám, ty se ale v některých parametrech odlišují (viz dále).

Názory na primární roli ponořovací odpovědi se podle různých autorů liší (Foster, Sheel, 2005). Pro potřeby své práce budu proto vycházet ze studií, které za hlavní funkci divingu reflexu považují úsporu kyslíku (Lindholm *et al.*, 1999, Andersson *et al.*, 2002, Foster, Sheel, 2005). K tomu má docházet zj. v důsledku vasokonstrikce a bradykardie. Silná vasokonstrikce periferních a útrobních kapilár a snížení minutového srdečního objemu snižuje spotřebu – VO_2 – na periférii a šetří tak kyslík pro orgány citlivé na jeho nedostatek, zj. mozek a srdce. Dále bradykardie může sloužit ke snížení kyslíkových nároků myokardu a tím pádem šetření zásob kyslíku v krvi (Foster, Sheel, 2005, Bartůňková, Schuster, 2015).

Míru vyjádření ponořovací odpovědi a tedy míru s jakou organismus šetří O_2 ovlivňuje několik faktorů: věk, teplota vody, zádrž dechu, trénink a adaptace na hypoxii a také psychické faktory (Novomeský 2013, Bartůňková, Schuster, 2015).

2.4.1. Faktory ovlivňující ponořovací reflex

a. Věk

Ponořovací reflex se i u člověka vyvíjí již během intrauterinního vývoje. U novorozenců jej lze vyvolat i silnějším proudem chladného vzduchu působícím na obličej. V průběhu prvního roku života byl opakovaně sledován – u 2–6 měsíčních kojenců se reflex objevil ve 100 % případů, u starších, 6–12 měsíčních dětí pak v 90 % případů (Pedroso *et al.*, 2011). Je pak také známo, že s rostoucím věkem (zejména po 60. roce) tato autonomní reaktivita výrazně klesá (Goksör *et al.*, 2002).

b. Teplota vody

Ukazuje se, že pro bradykardii platí obecná zákonitost - čím je voda chladnější, tím je zpomalení srdeční frekvence (SF) významnější (Kobayasi, Ogawa, 1973). Někteří autoři dokonce tvrdí, že teplota vody nad 21°C ponořovací reflex nevyvolá (Nepal *et al.*, 2015). Na druhou stranu při přikládání ledových obkladů na obličej odpověď nebyla tak výrazná, zřejmě z toho důvodu, že extrémně studený podnět dráždí spíše nociceptory než chladové receptory a vjem je tak vnímán jako noxický (Speck, Bruce, 1978). Zpomalení srdeční frekvence bylo ve studii Kobayasiho a Ogawy (1973) také při teplotě vody 47°C významnější než při 40°C. Vzhledem k různým výsledkům studií s ohledem na teplotu vody je ještě potřeba zdůraznit důležitost toho, zda při experimentu šlo pouze o chladový podnět na obličej, ponoření do chladné vody se zadržením dechu nebo bez zadržení dechu (za použití šnorchlu). Jako neefektivnější pro úsporu kyslíku se ukazuje kombinace apnoe a ponoření do chladné vody (Speck, Bruce, 1978).

c. Zádrž dechu

Foster a Sheel (2005) ve své přehledové studii shrnují výsledky experimentů porovnávající pokles srdeční frekvence při prosté zádrži dechu na suchu a při ponoření obličeje do vody. Zatímco při prosté zádrži byl pokles SF v průměru o -25 %, při zádrži dechu s ponořením obličeje do vody to bylo v průměru o -34 %. Caspers *et al.* (2011) ve své studii popisující časový průběh nástupu změn srdeční frekvence při ponořovací odpovědi prokázal také to, že bradykardie při prosté zádrži dechu na suchu nastupuje později (za 16 s oproti 10 s při ponoření).

d. Trénink a adaptace na hypoxii

Výše zmíněná závislost poklesu SF na teplotě vody se ukázala jako významná u trénovaných jedinců (plavců, potapěčů), u netrénovaných subjektů byla ale významně nižší (Kobayasi, Ogawa, 1973). Jako další faktor ovlivňující ponořovací reflex proto můžeme uvést trénink. Schagatay (2000) ve své studii uvádí, že opakovaný trénink zádrže dechu i běžný fyzický trénink diving reflex zvýrazňuje. Bartůňková a Schuster (2015) v kontextu tréninku a jeho vlivu na míru ponořovací odpovědi zmiňují také

adaptaci na hypoxii, respektive schopnost co nejdéle udržet aerobní metabolismus, zejména v srdci a mozku. Tréninkem je možné zvýšit vazbu O₂ na svalový myoglobin a také sílu kontrakcí sleziny, které následně vyplavují větší počet erytrocytů a tím pádem zlepšit schopnost organismu kumulovat kyslík (Schagatay *et al.*, 2007).

e. Fyzická aktivita

Fyzická zátěž obecně ponořovací reflex potencuje. Lindholm a Lundgren (2009) uvádí, že fyziologické změny spojené s ponořením jsou u člověka výraznější při fyzické aktivitě než v klidu. To potvrzuje i studie Anderssona *et al.* (2002). Ta prokázala, že pokles srdeční frekvence následkem ponoření do vody je výraznější při fyzické aktivitě v porovnání s ponořením v klidu (o -41 % oproti -17 %).

f. Psychické faktory

Ukazuje se, že na ponořovací reflex mají poměrně významný vliv také emoce. Gooden (1994) ve své studii shrnuje poznatky ze studií především z 80. let minulého století. Například v experimentu, kde testované osoby prováděly ponor na povel, bylo prokázáno vyvolání sympatické poplachové reakce, která snížila efekt ponořovací bradykardie. Naproti tomu vlastní rozhodnutí ponořit se zpomalení srdeční frekvence neovlivnilo. V jiné studii, kde byly osoby cíleně různými způsoby rozptylovány, údajně k bradykardii jako součásti ponořovacího reflexu vůbec nedošlo. Snaha pozitivně ovlivnit vyšší mozkové funkce poslechem prózy byla bez efektu (Gooden, 1994, Bartůňková, Schuster, 2015).

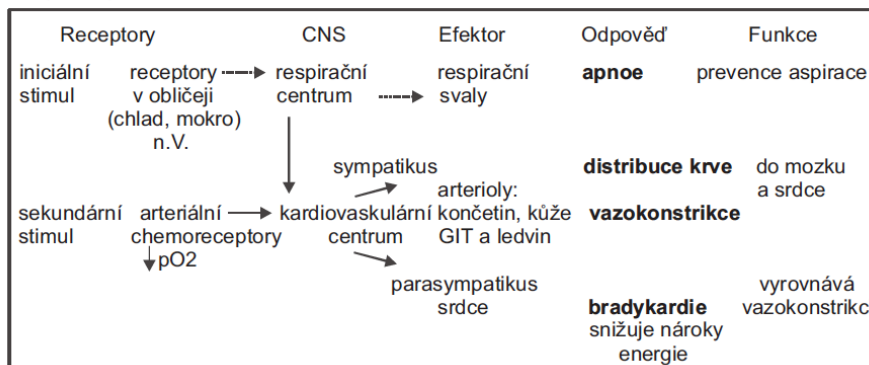
2.4.2. Průběh autonomní regulace ponořovacího reflexu

Mechanismus ponořovací odpovědi probíhá po základní ose: *specifické informace z receptorů – centrální zpracování těchto informací v mozku – výstup zprostředkovaný efektorovými orgány*. Zcela jednotný popis průběhu jednotlivých autonomních regulací v čase neexistuje, odlišnosti se týkají zejména návazností aktivit antagonistických částí autonomního systému (Gooden, 1994, Panneton, 2013, Bartůňková, Schuster, 2015). Níže uvádím popis tří os, po kterých dochází k ponořovacímu reflexu, respektive k ponořovací bradykardii (Bartůňková, Schuster, 2015):

1. *Vyvolání baroreflexu* – podráždění chladových receptorů *n. trigeminus* vyvolá vasokonstrikci a zvýšení periferního tlaku krve s následným baroreflexem. Tím dochází ke stimulaci zj. *nc. ambiguus* a jádra *n. vagus* (vazomotorických center v mozkovém kmeni). Rychlá sympatická reakce vedoucí k vasokonstrikci a zvýšení tlaku nastupuje z antagonistické dvojice autonomního nervového systému jako první. Parasympatická odpověď vzniká po podráždění baroreceptorů, které prostřednictvím aferentních vláken vede k aktivaci vagového jádra a poklesu srdeční frekvence (Bartůňková, Schuster, 2015).
2. *Podráždění kardiorespiračních center* – bradykardie je vyvolaná také současnou integrací vstupních podnětů z *n. trigeminus* v respiračním a kardiovaskulárním centru v prodloužené míše, kde vznikají impulsy pro plíce, srdce a arterioly. Zahrnují odpovědi obou antagonistických složek autonomního nervového systému současně (Hiebert, Burch, 2003, Bartůňková, Schuster, 2015).
3. *Zprostředkování trigeminokardiálním reflexem* – svou roli ve spuštění ponořovací bradykardie má i trigeminokardiální (trigeminovagální) reflex, nejčastěji se hovoří o okuloradiálním reflexu, klinické studie ale prokázaly možnost stimulovat jakoukoliv větev *n. trigeminus*. Aferentní signály ze senzitivních receptorů *n. trigeminus* jdou přes *ganglion Gasseri* do sensorického jádra trojklanného nervu prodloužené míchy, odtud pokračují přes interneurony retikulární formace k eferentní dráze motorického jádra *n. vagus* k *nc. ambiguus*. Informace se pak integrují v *n. solitarii*. Následně dochází k inhibici sympatiku - k vasodilataci i ke snížení chronotropie i ionotropie srdce a také k excitaci *nc. ambiguus* - posílení parasympatiku v působení na sinoatriální uzlík (Bartůňková, Schuster, 2015, Singh *et al.*, 2016)

Trigeminokardiální efekt je v posledních letech zkoumán vzhledem ke komplikacím, které zaznamenávají neurochirurgové např. při očních operacích, operacích v oblasti spodiny lební nebo jiných zákrocích v obličeji. Bylo totiž prokázáno, že podrážděním jakékoliv větve *n. trigeminus* dochází ke zvýšení parasympatické aktivity s následnou náhlou bradykardií, hypotenzí, apnoí, ale i možnou fatální zástavou srdeční činnosti. Stejnému mechanismu se přikládá i bradykardie s centrální apnoí známou jako *syndrom náhlého úmrtí malých dětí (SIDS)*. Tento reflex může být totiž vyvolán i omýváním obličeje chladnou vodou nebo ponořením do vody. Na druhé straně je trigeminokardiální reflex využitelný k léčbě supraventrikulární tachykardie. Ponořovací reflex se používá také k odhalení

latentních arytmií (Smith *et al.*, 2012, Bartůňková, Schuster, 2015 Singh *et al.*, 2016).



Obrázek č. 3 Základní komponenty ponořovacího reflexu – plné šipky označují excitační roli, přerušované inhibiční (převzato z Hiebert, Burch, 2003).

2.5. Slezina

Slezina v lidském těle funguje mimo jiné jako dynamická zásobárna krve, obsahuje 8 % celkového objemu všech červených krvinek. Její schopnost kontrakce je popisována jako součást diving reflexu (Espersen *et al.*, 2002). V reakci na podněty, které organismus vyhodnotí jako fyziologický stres (především hypoxie a hyperkapnie, fyzická námaha, zádrž dechu, ponoření nebo pobyt v nadmořských výškách), se slezina smrští, zmenší svůj celkový objem a uvolní červené krvinky do oběhu. Dojde tím ke zvýšení cirkulujícího hemoglobinu (Hb) a tedy podpoře transportu kyslíku. U trénovaných potapěčů může dojít k nárůstu Hb až o 10 % (Inoue *et al.*, 2013, Schagatay, 2014). Zvýšení množství Hb v důsledku slezinných kontrakcí je také jedním z vysvětlení, proč mají opakované zádrže dechu (s krátkými pauzami mezi jednotlivými pokusy) u člověka tendenci narůstat v čase. Zhruba po deseti minutách bez zádrže dechu se pak červené krvinky ukládají zpět do sleziny (Schagatay *et al.*, 2005, Schagatay, 2014).

Studie potvrzují, že je slezina u profesionálních nádechových potapěčů větší než u jednotlivců z kontrolní skupiny a že má také schopnost silnější kontrakce (po pěti opakovaných zádržích dechu došlo u potapěčů ke zmenšení sleziny o 25 % oproti

žádnému rozdílu ve velikosti u kontrolní skupiny). Potvrzena byla také korelace mezi velikostí sleziny a závodními úspěchy (Espersen *et al.*, 2002, Inoue *et al.*, 2013, Schagatay, 2014). Velikost sleziny je tak zřejmě spojená s navýšením zásob ukládaného kyslíku a umožňuje také rychlejší zotavení mezi jednotlivými ponory. Dlouhodobé vystavení hypoxii v podobě pobytu ve vysoké nadmořské výšce ale i závažné případy chronické obstrukční choroby plic mají také za následek zvětšení sleziny a její schopnosti kontraktility (Schagatay, 2014). Efekt tréninku na velikost sleziny ale nebyl zcela prokázán. Ve studii, kde začátečníci podstoupili dvoutýdenní trénink s každodenními zádržemi dechu, nedošlo ke zvýraznění kontrakcí sleziny, změně velikosti, ani zvýšení hemoglobinu. Autoři studie shrnují, že dvoutýdenní trénink zřejmě není dostačující (Engan *et al.*, 2013). Espersen *et al.* (2002) výše zmíněný mechanismus zvýšení zásob hemoglobinu a tudíž efektivnější využitelnosti kyslíku testovali jako nástroj zlepšení výkonu v cysklistice (zvýšení Hb v oběhu v důsledku např. hypoxického tréninku, krevních transfúzí nebo hormonální stimulace sportovní výkonu potencuje). Opakované zádrže dechu přímo před výkonem – 4km trasou však neměly na výkon žádný vliv, nedošlo ke zvýšení hodnot Hb a hematokritu, O₂ saturaci, ani využitelnosti kyslíku oproti normálnímu dýchání. Efekt prolongovaných zádrží dechu na slezinu má tak zřejmě dlouhodobější charakter a také výraznou souvislost s dalšími složkami diving reflexu (Espersen *et al.*, 2002, Engan *et al.*, 2013, Schagatay, 2014).

2.6. Vliv prolongované zádrže dechu na lidské tělo

V následující kapitole shrnu poznatky současné literatury ohledně působení prolongované zádrže dechu na lidský organismus, často studie zkoumající jednotlivé fyziologické parametry před a po zádrži dechu. Zmíním také některé možné nežádoucí stavy a události vznikající v důsledku extrémní prolongované apnoe a možné negativní vlivy obecně.

2.6.1. Elektrická aktivita mozku

Respirační cyklus

Je známo, že elektrická aktivita mozku odráží změny během respiračního cyklu. Změny v oscilaci amplitud elektrické aktivity mozku v důsledku respiračního cyklu

u člověka popsal již Faber *et al.* v roce 1970. Průběh EEG v závislosti na dechové frekvenci podrobně popsali Bušek a Kemlink (2015), viz Obrázek č. 4 níže. Obecně lze shrnout, že nádech zvyšuje výkon pásma delta v anteriorní části temporálního regionu s nárůstem celkového výkonu v této oblasti během bradypnoe a spontánního dechového rytmu. V porovnání s nimi má tachypnoe a eupnoe na elektrickou aktivitu mozku opačný efekt. Během eupnoe nádech způsobuje redukci aktivity v pásmu delta v parietálním regionu a v celkovém výkonu frontálního regionu, u tachypnoe nádech redukuje aktivitu v pásmu beta v centrální oblasti a dále snižuje aktivitu pásma theta posteriorně v temporální oblasti a v okcipitální oblasti. Tedy změny v respiračním cyklu byly patrné hlavně u spektrálního výkonu pomalejších EEG frekvencí; rychlejší dechový cyklus vede k jejich snížení, pomalejší dechový cyklus ke zvýšení (během nádechu v porovnání s výdechem). Autoři studie vyslovují hypotézu, že nádech během pomalejšího dechového cyklu zvýrazňuje synchronizaci thalamokortikálního okruhu, zatímco nádech při rychlejším dechovém cyklu má opačný efekt (Bušek, Kemlink, 2015).

	Tachypnoe	Eupnoe	Bradypnoe
Total power			
<i>over the whole skull</i>	4813 ±1013	4893 ±824	5170 ±916*
<i>frontal region</i>	318 ±61	325 ±47	348 ±61*
<i>occipital region</i>	499 ±121	504 ±120	540 ±116*
The beta band			
<i>frontal region</i>	90.2 ±29.1	94.4 ±27.3	101.4 ±32.1**
<i>central region</i>	74.8 ±26.9	77.6 ±23.4	82.6 ±29.1*
<i>parietal region</i>	94.7 ±30.3	101.2 ±30.5	105.4 ±31.4*
<i>occipital region</i>	155.0 ±58.6	165.8 ±56.5	167.8 ±56.6*
The alpha band			
<i>over the whole skull</i>	83.3 ±29.1	93.4 ±27.7*	94.1 ±26.4**
<i>frontal region</i>	63.5 ±22.1	72.7 ±23.2**	73.1 ±22.7**
<i>central region</i>	51.8 ±17.6	56.9 ±17.3*	57.3 ±17.1*
<i>anterior temporal region</i>	52.1 ±14.4	56.8 ±11.7	59.3 ±13.8*
<i>parietal region</i>	71.9 ±25.7	83.3 ±24.4*	85.0 ±23.2*
<i>occipital region</i>	157.6 ±65.9	176.6 ±67.6**	174.7 ±62.9**
The theta band			
<i>frontal region</i>	30.7 ±4.8	31.6 ±5.2	33.7 ±7.3**
<i>central region</i>	24.0 ±3.4	27.1 ±5.5*	25.9 ±4.6
<i>posterior temporal region</i>	37.6 ±10.8	39.7 ±10.2	41.9 ±12.9*
<i>occipital region</i>	43.5 ±15.3	45.3 ±15.5	47.2 ±17.1*

Obrázek č. 4 Střední hodnoty výkonu v (μ V) spektrálních pásmech v regionech, kde došlo k významným rozdílům mezi eupnoí (0.25 Hz), bradypnoí (0.1 Hz) a tachypnoí (0.5 Hz). Převzato z Bušek, Kemlink, 2015.

Stavy hypoxie a hyperkapnie

Podoba elektrické aktivity mozku přímo při prolongovaných apnoích a při zádrži dechu obecně není příliš dobře prozkoumána. Je ale známo, že aktivita mozku je ovlivněna stavy hypoxie a hyperkapnie. Vdechování směsi chudé na kyslík prokazatelně zpomaluje EEG (Papadelis *et al.*, 2007, Schellart a Reits, 2001, Ratmanova *et al.* 2016). Obdobně pak byly zkoumány vlivy na aktivitu mozku při vdechování směsi s vyšší koncentrací CO₂. Prokázal se nárůst výkonu elektrické aktivity mozku v pásmu delta a naopak útlum v pásmu alfa, beta a nízkých gama frekvencích (Halpern *et al.*, 2003, Hall *et al.* 2011). O vlivu CO₂ na konkrétní oblasti mozku pak existují data získaná pomocí pozitronové emisní tomografie (PET) – obličejovou maskou byla dýchána směs 8 % CO₂ a 92 % O₂. To v organismu způsobilo hyperkapnii a tedy dušnost a neodkladnou potřebu nadechnout se. Oproti stavu, kdy byla vdechována běžná směs kyslíku, se významně regionálně aktivovaly oblasti paralimbické/limbické, subkortikální – např. anteriorní, mediální a posteriorní cingulární kortex – Broadmanovy arey (BA) – 24, 32 a 23. Dále se ukázala bilaterální aktivace anteriorních temporálních pólů (BA20), anteriorní insuly a claustra, pravého gyrus fusiformis (BA37), bilaterálně gyrus lingualis (BA19). Aktivovaly se také regiony pravé amygdaly a nucleus pulvinar vpravo, hypothalamus a tegmentum středního mozku. Dále oblasti neokortexu – lobulus parietalis inferior vpravo (BA40) a dorzolaterální část prefrontální kůry vpravo (BA9). Deaktivace se týkala inferiorní části orbitofrontální a prefrontální kůry (BA47/10/11), levého thalamu, levého nucleus caudatus a nucleus lentiformis, lobulus parietalis inferior vlevo (BA40), mediální insuly vpravo a pravého gyrus precentralis (BA4), viz Obrázek č. 5 níže (Liotti *et al.*, 2001).

Activations area	BA	x	y	z	Size	Z-score
R cingulate gyrus	24	0	4	22	81	4.56
R cingulate gyrus	24	2	-10	26	68	4.44
R cingulate gyrus	24	1	22	12	60	3.93
L cingulate gyrus	24	-16	22	26	51	4.01
R ant temp pole	20	42	-4	-20	106	4.36
L ant temp pole	21	-40	-2	-20	86	4.17
L ant temp pole	21	-34	-2	-27	43	3.90
L ant insula		-34	8	18	57	4.40
R ant insula/claustrium		22	26	10	90	4.05
R fusiform gyrus	37	42	-54	-10	75	4.25
L lingual gyrus	19	-16	-78	-2	103	4.79
L lingual gyrus	17	-20	-90	-10	55	4.21
R lingual gyrus	19	20	-76	-4	75	4.64
R amygdala		24	-12	-8	54	3.86
R thalamus (pulvinar)		20	-28	4	50	4.36
R thalamus (pulvinar)		2	-36	8	59	4.01
Periaqueducal grey		2	-18	-10	52	4.25
Hypothalamus		0	-6	-15	71	4.21
R inf parietal lobule	40	42	-46	28	45	4.17
R mid frontal gyrus	9	32	10	22	80	3.86
Deactivations						
L inf frontal gyrus	47	-26	34	-10	88	-5.67
L medial frontal gyrus	10	-12	20	-18	75	-4.85
L medial frontal gyrus	11	-18	38	-12	81	-4.58
R medial frontal gyrus	11	21	34	-11	58	-4.15
R ventr cingulate	32	2	24	-8	84	-3.87
L thalamus		-11	-28	12	101	-5.04
L thalamus		-14	-21	8	58	-4.54
L thalamus		-2	-14	4	93	-4.22
L caudate		-12	-4	14	69	-4.65
L lentiform nucleus		-28	-18	2	45	-3.87
R lentiform nucleus		19	0	-5	72	-3.79
L inf parietal lobule	40	-52	-26	24	92	-4.46
R somatosensory cortex	4	57	-12	32	67	-3.91
R insula		38	-4	8	42	-3.76

Regions shown have significance $|Z| > 3.75$ and a large cluster size (voxels > 40; voxel volume 8 mm³).

Obrázek č. 5 Kortikální subkortikální aktivace a deaktivace z porovnání mezi vdechováním CO₂ obličejovou maskou nebo náustkem. Převzato z Liotti *et al.*, 2001.

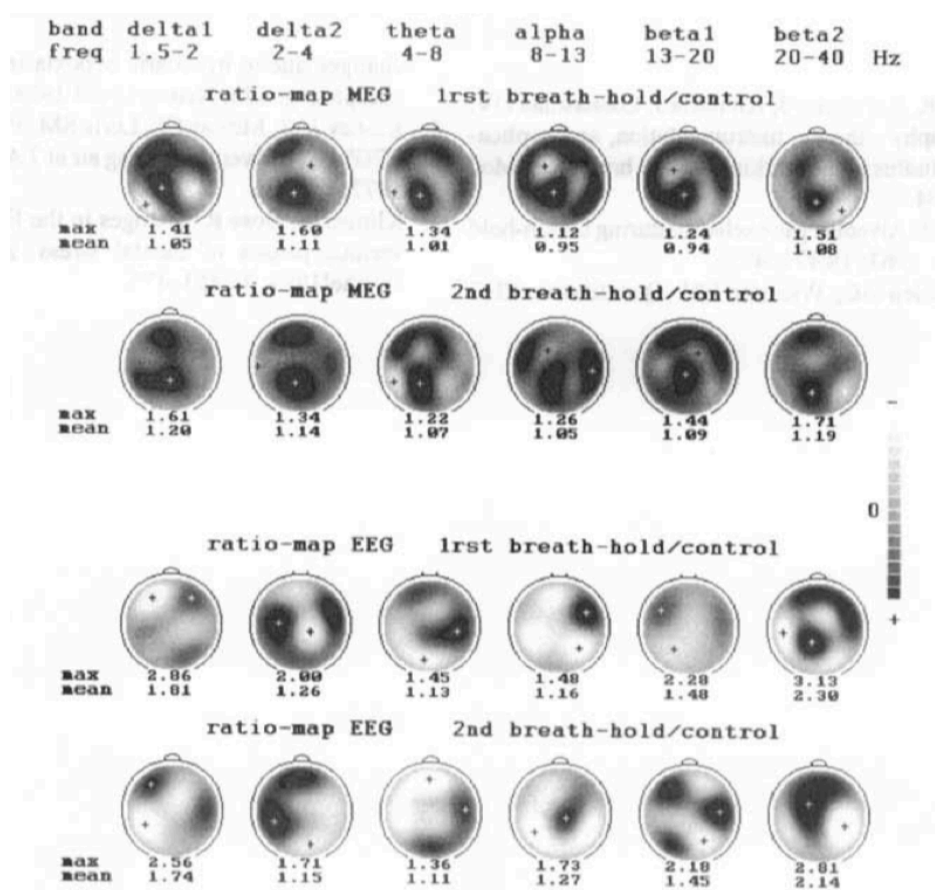
O vlivu CO₂ na elektrickou aktivitu mozku v pásmu alfa a delta ve své studii hovoří také Morelli *et al.* (2015). Byla zjištěna negativní korelace mezi hyperkapnií a EEG v pásmu alfa a pozitivní korelace mezi hyperkapnií a EEG v pásmu delta. Tedy že hyperkapnie zvyšuje aktivitu v pásmu delta a poměr aktivity v pásmu delta vůči alfa a dále snižuje aktivitu v alfa pásmu. Ukazuje se také, že hyperkapnie může mít na zpomalení elektrické aktivity mozku větší vliv než hypoxie (Morelli *et al.*, 2015, Wang *et al.*, 2015).

Apnoe, prolongovaná apnoe

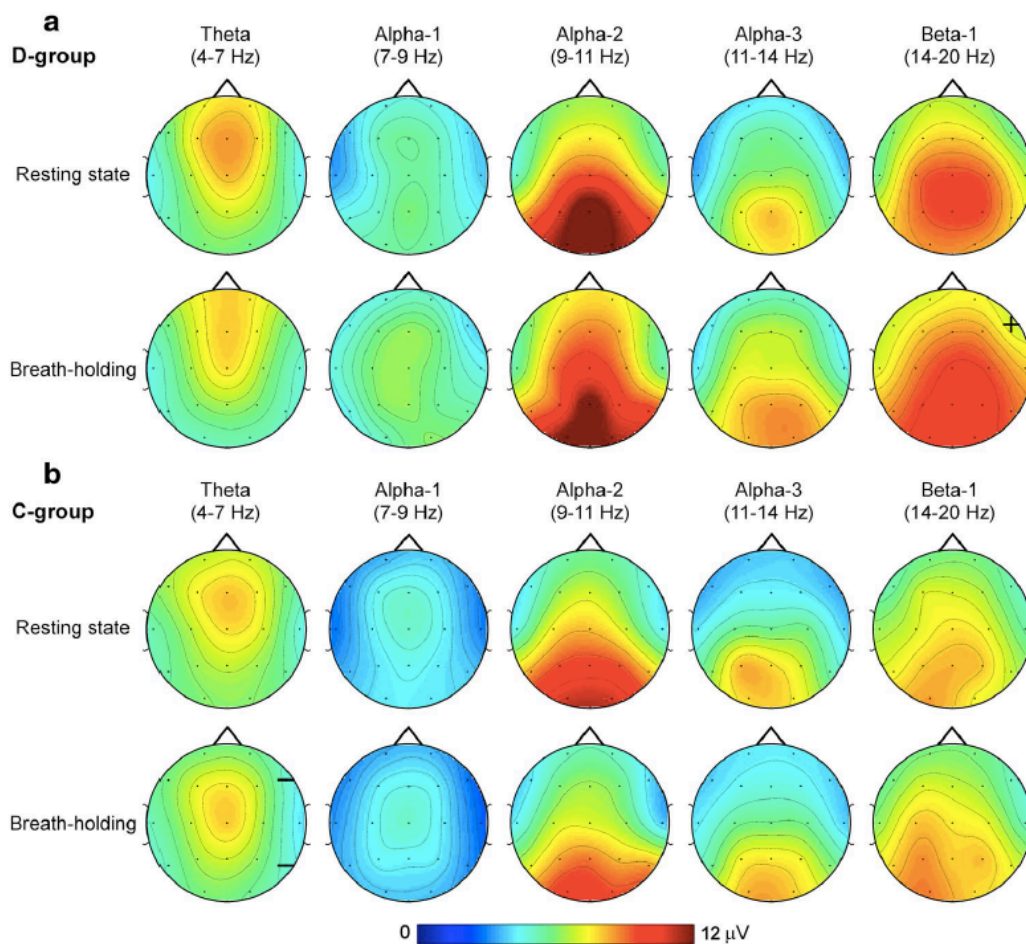
Jak již bylo zmíněno, v současné době není k dispozici mnoho dat hovořících o vlivu zádrže dechu na elektrickou aktivitu mozku. Ani centrální mechanismus regulace dýchání obecně není zcela kompletně zmapován. Autoři tomuto se věnující proto zdůrazňují, že informace o aktivitě mozku během cílených zádrží dechu mohou být užitečnými pro objasnění oblastí, které se do regulace dechového cyklu zapojují (Morelli *et al.*, 2015). Prospěšné mohou být tyto informace také při studiu poruch respirace ve spánku, např. obstrukční spánkové apnoe (Wang *et al.*, 2015). Získávání dat o aktivitě mozku při zádrži dechu je také komplikováno poměrně omezeným časem i při (sub)–maximálních pokusech. Dále také v důsledku přítomnosti významných zj. svalových artefaktů při mimovolních kontrakcích bránice a inspiračního svalstva obecně v pozdější fázi zádrže dechu. Ty mohou EEG záznam znehodnotit (Morelli *et al.*, 2015).

Změny elektrické aktivity mozku při zádrži dechu v porovnání se spontánním dýcháním se týkají zejména pásem alfa a delta. Dochází ke zvýšení výkonu pásma delta a změnám ve vrcholových frekvencích alfa aktivity (Morelli *et al.*, 2015). Schellar a Reits (1999) ve své studii změny při zádrži dechu popisují také zejména se vztahem k pásmům alfa a delta (kromě EEG byla používána také magnetoencefalografie – MEG). Zádrže dechu se zavřenými očima (s otevřenými očima při vyšetření EEG i MEG) jsou vrcholy alfa příliš nízké pro správnou kvantifikaci) vedou ke zvýšení maximálních frekvencí v pásmu alfa v okcipitálním regionu (Obrázek č. 6 a 7). Tyto změny se prokazují zejména při prvních desítkách sekund zádrže dechu, v druhé polovině zádrže nejsou změny příliš významné (Schellar, Reits, 2019). Navíc se zhruba v polovině zádrže alfa aktivita vrací na výchozí úroveň a podobá se klidové spontánní aktivitě mozku se zavřenými očima (Ratmanova *et al.*, 2016). Dále se aktivita alfa pásma při zádržích dechu přesunuje více fronto–temporálně (Schellar, Reits, 1999, Ratmanova *et al.*, 2016, Steinberg *et al.*, 2017).

Pokud ale porovnáme EEG aktivitu při zádrži dechu u profesionálních potapěčů a noviců, nalezneme rozdíly (Ratmanova *et al.*, 2016, Steinberg *et al.*, 2017). Počáteční zvýšení alfa aktivity bylo patrné pouze u profesionálů, u začátečníků dochází naopak k jejímu snížení. Autoři toto spojují s přípravnou fází u profesionálních potapěčů, které zahrnuje hluboké rytmické dýchání a zřejmě způsobuje nárůst aktivity v alfa pásmu (Ratmanova *et al.*, 2016, Steinberg *et al.*, 2017). I klidové EEG měřené před zádržemi dechu, s otevřenými i zavřenými očima, vykazovalo u profesionálů jisté zvláštnosti běžně pro nativní EEG netypické. Ukazovaly se ostřejší alfa rytmy, pomalejší alfa rytmy s frekvencí blíže k pásmu theta, nebo prostorově netypický vzorec alfa aktivity (viz Obrázek č. 8).

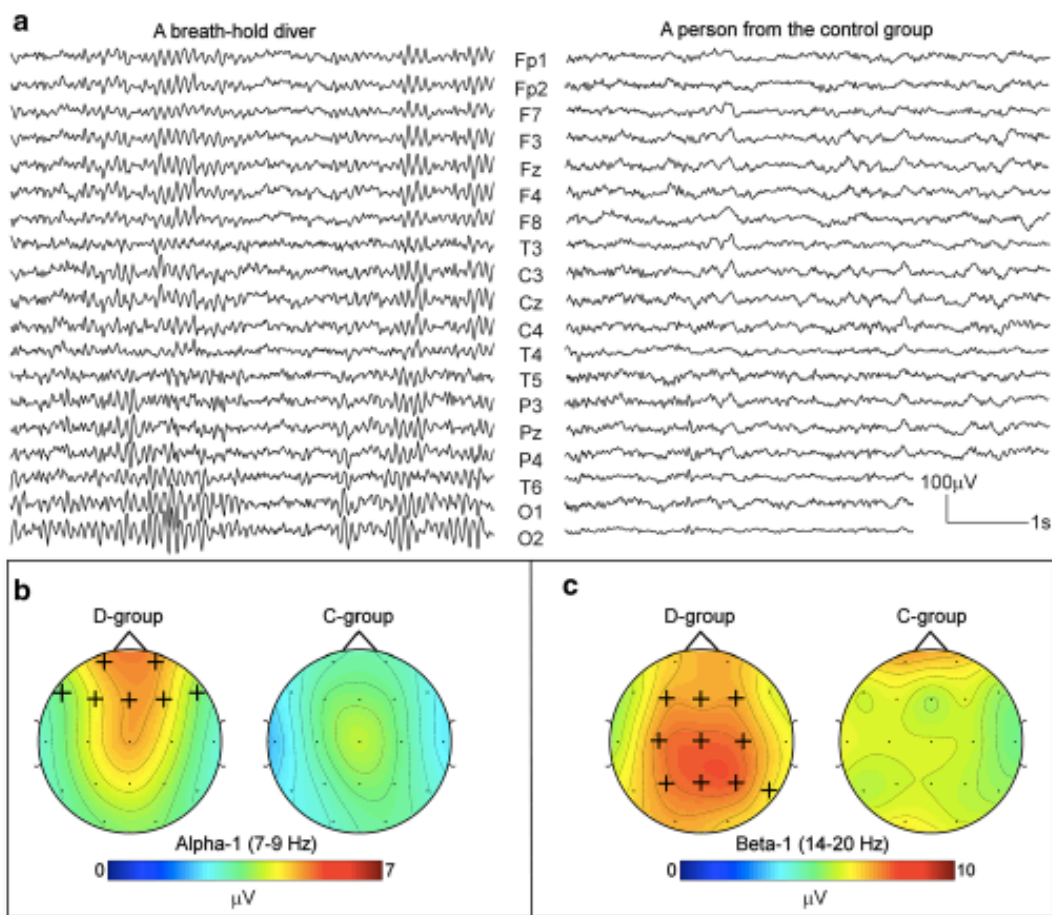


Obrázek č. 6 Topografické mapy pásem frekvencí měřených pomocí MEG (nahore) a EEG (dole). Šest frekvencí ukazuje změny elektrické aktivity mozku při první a druhé zádrži dechu u subjektu č. 3. Převzato z Schellar a Reits, 1999.



Obrázek č. 7 Topografické mapy EEG ukazující na distribuci spektrálních amplitud napříč různými pásmy frekvencí během klidového stavu se zavřenýma očima a zadržede dechu do první kontrakce ispiračního svalstva u skupiny D, potapěčů, a skupiny C, noviců. Převzato z Ratmanova *et al.*, 2016.

I u profesionálních potapěčů ale dochází ke snížení alfa aktivity v centro–parietálních oblastech obou hemisfér, ale až od 4. minuty zadržede dále (Steinberg *et al.*, 2017). Toto může souviset s korovými nároky motorického systému účastníciho se na konci zadržede. Přesun alfa aktivity frontálně zmíněný výše pak může být v důsledku vyšších nároků na kognitivní mechanismy mající prolongovanou zadržede dechu a tedy samotný výkon pod kontrolou. To zvyšuje účast fronto–kortikálních sestupných drah (Steinberg *et al.*, 2017, Ratmanova *et al.*, 2016).



Obrázek č. 8 EEG během klidového stavu před zádržemi dechu s otevřenými očima. Vlevo, sk. D, profesionální potapěč, vpravo, sk. C, kontrolní skupina, novic. Nativní EEG s otevřenými očima většiny trénovaných nádechových potapěčů není typické. Topografické mapy EEG ukazují distribuci spektrálních amplitud alfa-1 (b) a beta-1 (c) frekvenčních pásem. Převzato z Ratmanova *et al.*, 2016.

2.7. Možné negativní události a vlivy doprovázející opakované prolouvané apnoe

Pro pochopení možných negativních vlivů, které opakované prolouvané zádrže dechu mohou mít na lidský organismus, je nejprve důležité správně diferencovat mezi *ischemií*, *hypoxií* a *hypoxémií* (Ridgway, McFarland, 2006). Ischemie je porucha toku krve, která má za následek nedokrvenost tkáně nebo orgánu, odpadní látky nejsou odplavovány z buněka a může dojít k poškození nebo odumření tkáně. Hypoxie je souhrnný název pro nedostatek kyslíku v jednotlivých tkáních. Podle toho, kde dochází k poruše přenosu kyslíku, rozlišujeme hypoxickou hypoxii, anemickou hypoxii,

stagnační hypoxii a histotoxickou hypoxii. Úplný nedostatek kyslíku v organismu označujeme jako *anoxii* (Bartůňková, 2010). Hypoxémie je pak nedostatek kyslíku v arteriální krvi. Tok krve není omezen, cévní zásobení mozku je díky kompenzačním a adaptačním mechanismům organismu zachováno. Nadále dochází také k odplavování odpadních látek. Jinak nekomplikovaná hypoxémie jako taková tedy nezpůsobí odumření mozkových buněk. Narozdíl od ischemie, kde k odumírání mozkových buněk dochází a míra hypoxie pak určuje míru možného poškození. Tento rozdíl je významný vzhledem k tomu, že pouhé dvě minuty mozkové ischemie vedou k odumírání buněk, zatímco organismus vystavený hypoxémii po dobu minut až několika dní (např. při pobytu ve vysokých nadmořských výškách, při závažných případech spánkové apnoe) je schopen úplné regenerace (Ridgway, McFarland, 2006, Bartůňková, 2010, Dujic, Breskovic, 2012).

Studie prokazují, že energetický metabolismus nervové tkáně vzhledem k množství kyslíku zůstává beze změny i při hodnotách pO_2 35-40 mmHg/4,6-5,3 kPa a saturaci kolem 50 %, respektive že nedochází k nekróze nervové tkáně ani k poruše metabolismu kyslíku (Lindholm, Lundgren, 2006, Dujic, Breskovic, 2012). Při prolongované zádrži dechu ale nepochybně k negativním událostem a stavům dochází. Známa data ze závodů ve freedivingu (ať už ve statických, dynamických či hloubkových disciplínách) uvádí, že cca 10 % závodníků bylo diskvalifikováno vzhledem ke klinickým známkám hypoxie. Aby se závodní pokus počítal jako úspěšný, musí potapěč během stanoveného času po vynoření – 15 až 20 sec v závislosti na soutěži – splnit tzv. *surface protocol*, kdy dá “OK” signál rozhodčímu a musí udržet vertikální pozici těla s dýchacími cestami nad hladinou. Jiná data říkají, že až 60 % freediverů (profesionálních nebo amatérů) má s různými projevy hypoxie zkušenost (Lindholm, 2007, Dujic, Breskovic, 2012). Někteří autoři proto tyto negativní události spojené s nedostatkem kyslíku nevysvětlují odumíráním nervové tkáně ani poruchou metabolismu kyslíku v mozku a nabízejí jiné teorie. Ve vysvětlení klinických projevů hypoxie se zaměřují na roli, kterou má kyslík ve fungování neurotransmiterů na synapsích, zj. GABAergních a acetylcholinových. Tyto neurotransmitery se totiž zdají být nedostatkem kyslíku, byť krátkodobě, ovlivněny. Regenerace přichází v řádu dnů až týdnů. Poškození v důsledku omezeného přísunu kyslíku s následnými možnými klinickými projevy hypoxie se tak týká ne přímo neuronů, ale metabolismu některých centrálních neurotransmiterů (Gibson *et al.*, 1981, Kumar, 2011, Leonard *et al.*, 2018).

Stavy nedostatku kyslíku může freediver vnímat jako pocity malátnosti, náhlé únavy, brnění periferie horních i dolních končetin, poruchy zraku – např. náhlé tunelové vidění, dále pocity euforie, velmi silné nebo naopak náhle snížené nutkání k obnově respirace. Navenek se pak tyto stavy mohou projevovat ztrátou koordinace, dezorientací, náhlým zpomalením nebo zastavením pohybu, nepřítomným pohledem, cyanotickými rty, potížemi s obnovou dechového cyklu na hladině nebo ztrátou motorické kontroly. Nejčastějšími negativními událostmi je pak blackout – ztráta vědomí (*loss of consciousness, LOC*) a ztráta motorické kontroly (*loss of motor control, LMC*), freedivery přezdívaná jako *SAMBA* (Lundgren, Lindholm, Pollock, 2006, Ridgway, McFarland, 2006, Pollock, 2008).

Úplná ztráta vědomí, blackout, je často specifikována přívlastky jako *surface* nebo *ascent blackout* (případně *výstupová hypoxie*) vzhledem k mechanismu vzniku. První jmenovaný vzniká v okamžiku, kdy potapěč na hladině ukončuje zádrž dechu a při výdechu dochází ke snížení thorakálního tlaku a ještě většímu poklesu tlaku kyslíku. Blackout tak často přichází ve chvíli ještě před prvním nádechem a obnovou respirace. Výstupová hypoxie pak vzniká při návratu zpět na hladinu při hloubkových ponorech (10 metrů a více) v důsledku změn atmosférického tlaku, který prostřednictvím vodního sloupce působí na tělo potapěče. Tak, jak se freediver přibližuje zpět na hladinu, klesá okolní tlak a tím se i snižují hodnoty pO_2 a pCO_2 v krvi. Klesající hodnoty pCO_2 náhle sníží nutkání k obnově respirace, naopak rozpínající se objem hrudníku způsobí “nasávávání” kyslíku zpět z krve a hladina pO_2 v krvi tak ještě více klesá. Již kritická hypoxie tak může vzniknout poměrně náhle, obvykle pak přichází 10-15 s před vynořením nebo krátce po vynoření (Maas, 2006, Lundgren, Lindholm, Pollock, 2006, Pollock, 2008).

Ztráta motorické kontroly se projevuje bilaterálním tremorem horních i dolních končetin, deviací očních bulbů, rychlým pohupováním hlavy v trvání asi 10 s. Potapěč si je přitom svého stavu vědom, je schopen uposlechnout pokyny rozhodčích nebo záchranářů. Přesný mechanismus vzniku LMC není znám, předpokládá se spojitost s výše zmíněnými GABAergními neurotransmitery a také náchylnost post-hypoxického mozku k záchvatovité aktivitě neuronů (Lundgren, Lindholm, Pollock, 2006, Ridgway, McFarland, 2006, Pollock, 2008).

Vzhledem ke značným rizikům utonutí v případech výše zmíněných událostí platí při freedivingu pravidlo tzv. buddy systému, kdy se potápí zásadně ve dvou, na soutěžích pak funguje sofistikovaný systém záchrany.

2.7.1. Dlouhodobý vliv

Dlouhodobý vliv prolongovaných zádrží dechu a zejména možný negativní kumulativní efekt prodělaných hypoxických stavů na lidský organismus, zvláště pak na mozkovou tkáň, není zcela dobře prozkoumán. Andersson *et al.* (2009) ve své studii například přináší důkazy o zvýšeném markeru *SI00B*, jehož koncentrace stoupají při různých poškozeních mozku, např. ischemické CMP nebo v důsledku zástavy srdce. U freediverů testovali jeho hodnoty těsně po zádrži dechu (v průměru trvající déle než 5:30 min) se zjištěním, že došlo ke zvýšení oproti stavu před zádrží. To je pak autory zdůvodňováno možným přechodným porušením hematoencefalické bariéry v důsledku fyziologických změn, které zádrž dechu doprovázejí. Ačkoliv hodnoty markeru po cílené prolongované zádrži dechu zdaleka nedosahovaly těch zjištěných u výše zmíněných poškozeních mozku, autoři zdůrazňují možný kumulativní efekt a nabízejí srovnání s hypoxií, ke které dochází během spánkové apnoe. Ta může vést k neuropatologickým změnám a také zhoršení psychomotorických funkcí, např. pozornosti nebo krátkodobé paměti (Andersson *et al.*, 2009, Zeljko, Breskovic, 2012). V jiné studii byl pomocí zobrazovacích metod – magnetické rezonance (MRI) a jednofotonové emisní výpočetní tomografie (SPECT) zkoumán mozek u pěti freediverů s historií více než 1000 ponorů do hloubek 30 m a více, přičemž žádný z nich neměl neurologické obtíže. Zatímco výsledky MRI byly v normě, vyšetření SPECT ukázalo u všech testovaných subjektů abnormality. Ty se týkaly zejména velkých difúzních, ale i ložiskových oblastí s hypoperfúzí a naopak hyperperfúzí ve frontálním a temporálním laloku a mozečkových hemisférách (Potkin, Uszler, 2006, Andersson *et al.*, 2009).

Další studie se zabývala hypotézou, zda hypoxie, ke které během prolongovaných zádrží dechu může docházet, eventuálně ovlivní metabolismus amyloidů nebo markery ukazující na strukturální poškození mozku. Přitom právě zpracování *amyloidového prekurzorového proteinu (APP)* pomocí β - a γ - *sekretázy* formuje β -*amyloid (A β)*, který se shlukuje do nerozpustných extracelulárních plaků. To je pak považováno za klíčový patologický proces při vzniku Alzheimerovy choroby (Gren *et al.*, 2016). Při experimentu byly zjišťovány hodnoty $A\beta$ u nádechových potapěčů po disciplínách statická apnea a dynamická apnea s a bez ploutví. Ukázalo se, že po statické zádrži dechu došlo k významnému nárůstu hodnot $A\beta$ v plasmě (ačkoliv zvýšení $A\beta$ touto přechodnou hypoxií nebylo takových rozměrů, jako např. při

závažných selháních krevního zásobení mozku při srdečních zástavách). Naopak hodnoty po dynamických disciplínách oproti výchozím hodnotám zvýšeny nebyly. To lze zřejmě zdůvodnit tím, že při statických disciplínách je zádrž dechu delší než při disciplínách dynamických, což může vést k závažnější hypoxii. Autoři studie dávají zjištěné do souvislosti jednak s epidemiologickými studiemi ukazujícími spojitost mezi poruchami dýchání ve spánku a demencí a také obstrukčním syndromem spánkové apnoe, kde postupující závažnost hypoxie koreluje s vyššími hodnotami A β v séru (Gren *et al.*, 2016).

2.8. Pozitivní účinky kontrolované hypoxie

Přes veškerá výše zmíněná úskalí hypoxie existují důkazy o tom, že přechodná kontrolovaná hypoxie může mít řadu pozitivních účinků. Ty se týkají zejména adaptačních mechanismů, které mají organismus připravit na lepší toleranci hypoxických stavů a poskytnout tak ochranu tkáním citlivým na nedostatek kyslíku. Hypoxického tréninku se využívá ve sportu, i v medicíně ale existují doklady o pozitivních přínosech hypoxické terapie. Dechových technik zahrnujících zádrže dechu využívá také prastarý systém jógy v rámci *pranayama* cvičení, např. Nisshesha rechaka pranayama, Viloma pranyama nebo Kumbhak pranayama (Telles, Naveen, 2008, Malshe, 2011, Lysebeth, 1999).

Cílené kontrolované hypoxie se obvykle dosahuje třemi možnými způsoby: pobytem v hypobarických komorách, rychlým výstupem do vysokých nadmořských výšek s krátkou dobou pobytu (u tréninkových programů sportovců tzv. systém *“live low train high”*, McLean *et al.*, 2014) a dýcháním normobarické hypoxické směsi (Malshe, 2011). Vystavení hypoxii má obvykle intermitentní charakter, tzn. opakující se vystavování hypoxii po dobu od 3 do 90 minut (v závislosti na designu studie, typu tréninku, terapie) s normoxickými přestávkami.

Obecné benefity kontrolované akutní intermitentní hypoxie (AIH) zahrnují např. zvýšené hladiny hemoglobinu v důsledku tvorby erytropoetinu, nárůst růstových faktorů, např. VEGF (*vascular endothelial growth factor*), který může vést k angiogenezi, tvorbě nových krevních kapilár (v myokardu např. kononárních kolaterál). Uvádí se také, že hypoxie indukuje enzym NO-syntázu, který má v různých tkáních různou úlohu, významná je jeho role v mechanismech proti oxidativním poškozením (Ponsot *et al.*, 2006, Steiner *et al.*, 2010, Malshe, 2011). O benefitech

hypoxického tréninku u profesionálních sportovců např. vytrvalostních běžců, hovoří Ponsot *et al.* (2006) ve své studii. Konkrétně bylo zjištěno zlepšení mitochondriální funkce zvýšením respirační kontroly kreatinem, s výslednou efektivnější integrací potřeby a zásobování organismu ATP (adenosintrifosfátem). Mackenzie *et al.* (2010) ve svém experimentu zkoumali efekt akutní hypoxie (během cvičení a v klidovém stavu) na sensitivitu organismu k inzulinu u jedinců s diagnostikovaným diabetem typu II. Ukázalo se, že sensitivita vůči inzulinu byla v porovnání s normoxickými podmínkami vyšší jak po klidovém stavu, tak po cvičení při vystavení hypoxii. Autoři studie tedy shrnují, že akutní hypoxie může krátkodobě zlepšovat glykemickou kontrolu u pacientů s DM II. Studie Hayes *et al.* (2014) dokonce přináší data o pozitivním efektu akutní intermitentní hypoxie při terapii (rehabilitaci) pacientů s inkompletní míšní lézí (iSCI). AIH zřejmě podporuje spinální plasticitu a posiluje po nekompletní lézi náhradní dráhy motoneuronů a může být tak účinným doplňkem ostatních terapeutických strategií a metod.

Jóga o účincích kontrolovaných zádrží dechu a dechových cvičení obecně hovoří zejména v kontextu inhibičních mechanismů tahových receptorů v dýchacích cestách. Tyto mechanismy mají synchronizovat neurální elementy a ovlivňovat tak napětí autonomního nervového systému a tím pádem ladění celého organismu (Telles, Naveen, 2008).

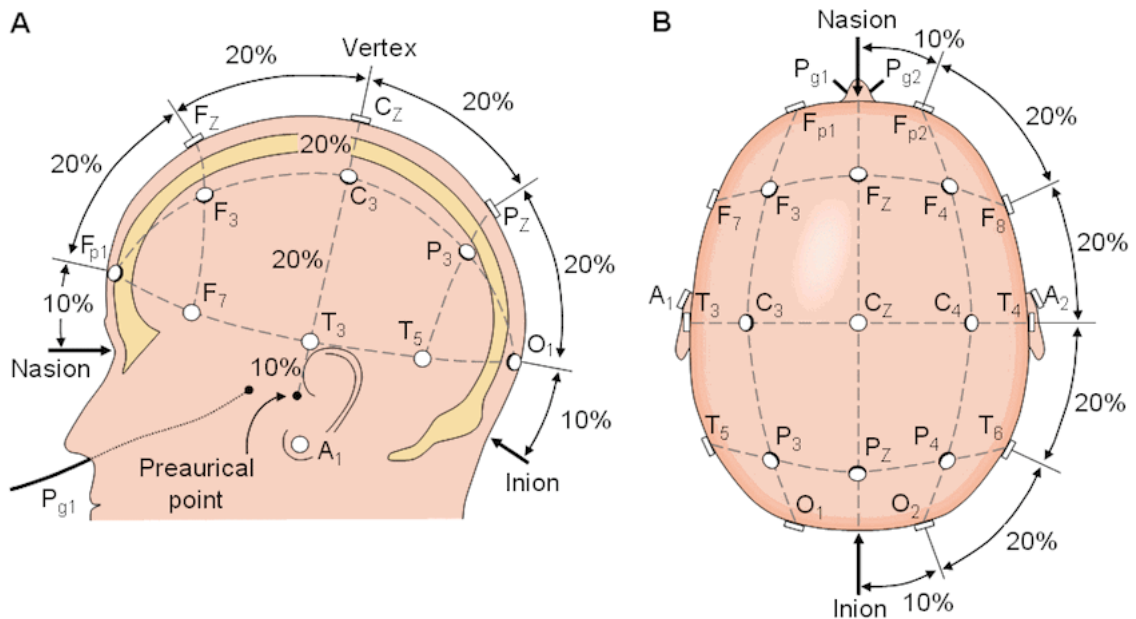
2.9. Elektroencefalografie

Elektroencefalografie je neinvazivní diagnostická metoda, při které jsou zaznamenávány bioelektrické potenciály mozku. Sledována je elektrická aktivita mozku v definovaném pásmovém rozmezí, která pochází zejména ze synaptodendritických membrán v povrchových vrstvách mozkové kůry. Pro vznik každého elektrického potenciálu je klíčové rozložení kationtů a aniontů ve vnitřním a vnějším prostředí buňky, respektive jejich pohyb přes membrány. To způsobuje změny elektrického napětí, které mohou být zaznamenány povrchovými elektrodami umístěnými na skalpu (pro měření je stanoveno rozložení elektrod dle *systému 10–20* vycházející z mezinárodní nomenklatury, Obrázek č. 9). Za vznik EEG jsou zodpovědné především korové neurony a thalamokortikální okruhy. Získaný záznam spontánní aktivity v určitém časovém pásmu je nazýván elektroencefalogram. EEG bylo

u lidí použito poprvé v roce 1920 Hansem Bergrem, který popsal základní dva typy mozkových vln – alfa a beta. V budoucnu pak došlo k objevení a popsání dalších typů frekvenčních pásem (Orel, Procházka, 2017, Pánek 2016, Faber, 2001).

V dnešní době je elektroencefalografie běžnou neurofyziologickou vyšetřovací metodu používanou zj. v diagnostice funkčních a morfologických lézí mozku. Výhodou této metody je neinvazivnost s možností bezproblémového opakování v průběhu delšího časového období bez větší zátěže pacienta (např. ve srovnání s výrazně nákladnějšími metodami MRI nebo CT). Využití EEG je ale také na ose výzkumné. V porovnání s užitím EEG v klinické praxi a hodnocením elektrické aktivity mozku v experimentálních podmínkách je ale třeba vnímat určité rozdíly. Zatímco pro klinickou praxi existují ustálená pravidla pro registraci, hodnocení a interpretaci získaného elektroencefalogramu, v experimentálních podmínkách je třeba určitých modifikací v závislosti na designu výzkumu (Pánek, 2016, Orel, Procházka, 2017).

Výsledný elektroencefalografický signál představuje sumační postsynaptické korové neurální potenciály. Platí, že zaznamenávaná je aktivita zejména z povrchových mozkových struktur a to pomocí plochých skalpových nepolarizovatelných elektrod potažených chloridem stříbřitým umístěných ve speciální EEG čepici z pružné látky (Obrázek č. 10). Mezi samotnou elektrodou a mozkovou kůrou může být tedy vzdálenost až čtyři centimetry (tento prostor je vyplněn mozkovými plenami, kostní tkání, podkožím, kůží). Snímané elektrické potenciály jsou tak velmi slabé (10mA, potenciál 5 – 100 μ V) a zesilovačem jsou pak mnohonásobně zvětšovány. Pro snížení elektroodových odporů se po navléknutí čepice aplikuje horními otvory elektrod vodivý gel. Standardní EEG čepice obsahuje 19 elektrod, využívá se ale až počtu 128. Jejich rozmístění je dle výše zmiňovaného *systemu 10 – 20* vycházejícího z antropometrického měření dle Herberta Jaspera. Název je odvozen od procentuální vzdálenosti elektrod, kdy v obou rovinách – frontální i sagitální – je to 10 % nebo 20 %. Elektrody jsou pak rozmístěny proporcionálně mezi čtyřmi body: nasion (kořen nosu), inion (protuberantia occipitalis externa) a body pod ušními boltci. Dále v tomto systému nalezneme označení F (frontální kůra), Fp (frontální pole), P (parietální kůra), T (temporální kůra), O (okcipitální kůra), C (centrální část). Elektrody jsou dále označeny číslem určujícím laterality – liché číslice pro umístění nad levou hemisférou, sudé číslice nad pravou hemisférou. *Index z* dále označuje pozici ve střední čáře a *index p* umístění na čele (Orel, Procházka, 2017, Mišurec, Chmelař, 1990, Pánek, 2016).



Obrázek č. 9 Mezinárodně platný systém rozmístění elektrod 10–20. Zdroj: *TDCS – Electrode Positioning – The 10-20 System* [online]. NYC: Adafruit, 2017 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://blog.adafruit.com/2017/06/19/tcds-electrode-positioning-the-10-20-system/>.



Obrázek č. 10 EEG čepice s 19 elektrodami. Zdroj: WaveGuard Connect - 19 Channel EEG Cap. Bio-medical [online]. Clinton Township, MI, 2019 [cit. 2019-06-12]. Dostupné z: <https://bio-medical.com/review/product/list/id/2761/>.

Technicky lze EEG záznam získávat unipolárním nebo bipolárním zapojením. Bipolární zapojení porovnává elektrické potenciály mezi dvěma body – elektrodami, zapojení je tedy diferenční. Dále rozlišujeme u bipolárního zapojení směr, tzn. zapojení longitudinální nebo trasnversální, případně jejich kombinace. Při unipolárním (referenčním) zapojení, je zjištěné napětí určováno mezi aktivní a referenční elektrodou. Spojena je jedna konkrétní elektroda s tzv. nulovou G (Goldmanovou) elektrodou, která představuje spojení všech elektrod přes odpor k zemi. Spojení elektrod ke svorce, např. ušnímu lalůčku, nazýváme pseudounipolární (Pánek, 2016, Orel, Procházka, 2017, Faber, 1992).

2.9.1. Základní frekvenční pásma

Při běžném EEG záznamu registrovaném v pásmovém rozmezí 0,5 – 70 Hz při vzorkovací frekvenci 256 Hz rozlišujeme čtyři základní frekvenční pásma: alfa (8–12,5 Hz), beta (12,5–30 Hz), theta (4–8 Hz) a delta (0–4 Hz). Za normální EEG aktivitu považujeme přítomnost základních frekvencí, tato aktivita je většinou rytmická a má sinusoidní tvar (Faber, 2001, Pánek, 2016). Rozlišení a pojmenování pásem vychází z historie spíše než logického uspořádání – jak již bylo zmíněno výše, frekvence alfa a beta byly pojmenovány Hansem Bergrem v roce 1929, pásmo gama bylo definováno později v roce 1938 Herbertem Jasperem a Howardem Andrewsem (jednalo se o označení frekvence nad 30 Hz, dnes je součástí frekvence beta). V roce 1936 byl Greyem Walterem zaveden termín delta pro frekvenci pod alfa pásem. Později pak Walter v tomto pásmu oddělil ještě frekvenci theta (Pánek, 2016, Moráň, 1995).

Aktivita alfa je vlastností mozku který je zdravý, bdělý, zralý a při zavřených očích (Faber, 2001). Je definována svou frekvencí v rozmezí 8–12 Hz a lokalizací především nad zadními oblastmi hlavy s maximem amplitudy okcipitálně nebo okcipitoparietálně (za střední hodnoty je považováno 20–80 μ V). Při onemocnění CNS, organických lézích např. v důsledku tumoru, encefalitidy, cévní příhody apod. se alfa aktivita mění nebo úplně ztrácí. Ztrácí a rozpadá se také při spánku a bezvědomí. Od narození do 5 až 7 let je alfa aktivita pomalá. Biologicky nezralý mozek, nezávisle na věku, pravidelnou alfa aktivitu nemá. Amplituda alfa se snižuje také s otevřením očí v důsledku desynchronizace v thalamokortikálních okruzích. Tento fenomén nazýváme reakce zástavy (RZ), reakce blokády (RB) nebo alfa atenuační reakce (AAR). Při

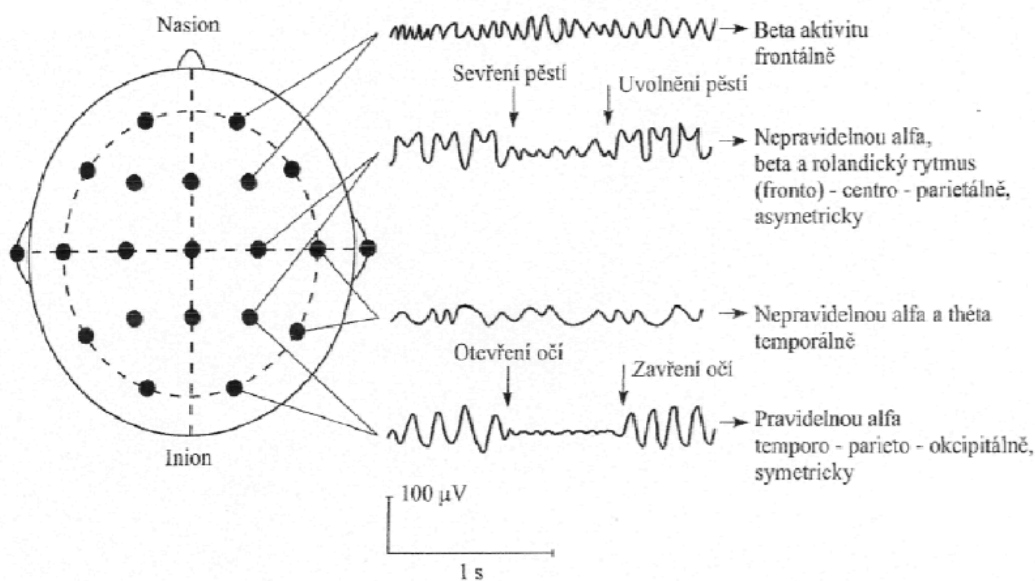
opětovném zavření očí dochází k tzv. rebound fenoménu (RF), kdy dojde ke zvýšení amplitudy. Alfa aktivitu dnes rozdělujeme na subpásma alfa-1 (8–10 Hz) a alfa-2 (10–12 Hz). Z psychofyziologického hlediska se předpokládá účast alfa aktivity v procesech zahrnujících pozornost, nejrůznější kognitivní a paměťové děje (Faber, 2001, Pánek, 2016, Orel, Procházka, 2017, Cannon, 2012, Jobert *et al.*, 2012).

Beta aktivita je dominantní nad frontálními oblastmi mozku. Frekvence pásma je 14–30 Hz, amplituda 10–30 μV , téměř vždy však nižší než 20 μV (amplituda je tedy oproti alfa pásmu nižší). Fyziologicky se tato aktivita objevuje za bdělého stavu při otevřených očích. Změny amplitudy lze pozorovat při vystavení taktilním nebo algickým podnětů nebo při volní hybnosti, obecně je odrazem senzomotorické činnosti. S přibývajícím věkem se podíl aktivity beta zvyšuje (Moráň, 1995, Faber, 2001, Pánek, 2016). Spojována je také se zvýšením afektivní odezvy jedince, exekutivních a kognitivních funkcí a pozornosti (Cannon, 2012). Beta-1 aktivita je důsledkem percepčního vnímání vznikajícího spojením různých sensorických kvalit, např. integrace vizuálních a zvukových podnětů (Hanslmayr *et al.*, 2007, Von Stein *et al.*, 1999). Beta-2 aktivita je patrná při aktivním zpracování složitější úkolů nebo úkonů vyžadujících vysokou míru pozornosti a soustředění (Razumnikova, 2007).

Frekvence 30–70 Hz je označována jako **gama pásmo** a je součástí beta aktivity. Amplituda se pohybuje v rozmezí 2–10 μV . Výskyt této aktivity je nestabilní (Moráň, 1995, Pánek, 2016).

Aktivita pásma delta je rytmická a sinusoidální, frekvence je nejnižší ze všech pásem 0,5–4 Hz, s vysokou amplitudou 20–200 μV . Fyziologicky se tato aktivita objevuje u dětí do do tří let, v dospělosti v hlubokém stadiu III–IV NREM spánku (Hovorka *et al.*, 2003, Pánek, 2016). Delta aktivita se předpokládá také v souvislosti s kódováním a uvolňováním informací a tím s celkovou inteligencí jedince (Cannon, 2012, Pánek, 2016).

Aktivita theta se objevuje většinou nad temporální krajinou s frekvencí 4–7,5 Hz a průměrnou amplitudou 30 μV . Nereaguje většinou na otevření očí, lze ji pozorovat v pozdních fázích NREM spánku a amplituda se může zvyšovat také při usínání. Výraznější může být tato aktivita také při emočním vzrušení (Faber, 2001, Hovorka *et al.*, 2003, Pánek, 2016). Theta frekvence je také spojována s paměťovými procesy – kódováním informací a jejich následným vybavením a také exekutivní pozorností (Cannon, 2012, Pánek, 2016).



Obrázek č. 11 Přehled základních frekvenčních pásem a míst jejich výskytu ze skalpových elektrod. (Převzato z Faber, 2001).

2.10. sLORETA

Metoda sLORETA (*Standardized Low-Resolution Brain Electromagnetic Tomography*) je moderní kvantitativní EEG (QEEG) metodou (spolu např. s EEG koherencí nebo EEG kordancí). Základem QEEG metod je vizuální hodnocení bezartefaktových úseků a jejich následné kvantitativní zpracování v příslušných programech (Orel, Procházka, 2017, Pánek, 2016).

sLORETA umožňuje z povrchového EEG vypočítat zdroje dané elektrické aktivity v mozkové tkáni a tu zobrazit jako trojrozměrnou vizualizaci. Autorem programu je Roberto Pascual-Marqui, poprvé byla metoda představena v roce 1994. sLORETA představuje řešení tzv. inverzního problému, tzn. nemožnosti výpočtu distribuce a amplitudy zdrojů snímaných potenciálů, který byl po dlouhou dobu nevýhodou EEG. Hamalainen a Ilmoniemi se pokoušeli o řešení tohoto problému v roce 1984 svojí metodou *minimum norm solution*, ovšem tato metoda měla své limity a to vzhledem ke schopnosti detekovat a správně vypočítat pouze povrchové signály (Cannon, 2012, Pánek, 2016, Pascual-Marqui, *et al.*, 1994, 2002). V porovnání s ostatními způsoby hodnocení zdrojové aktivity se sLORETA prokázala jako jediná schopná správné lokalizace, ostatní metody selhávaly zj. v určování zdrojové aktivity

v hlubších strukturách mozku. Prokázalo se také fungování programu sLORETA s minimální prostorovou chybou (Pascual–Marqui, 1999, 2002).

Důležitým předpokladem pro správný výpočet zdrojové aktivity je fakt, že sousední neurální struktury vykazují synchronní aktivitu, čehož Pascual–Marqui využil při správném výpočtu. Distribuce proudových hustot je počítána ve voxelch – prostorových objemových jednotkách, které jsou definovány pomocí Talaraichova atlasu. sLORETA stanovuje proudové hustoty v celkem 6239 voxelch s prostorovým rozlišením 5 mm. Metoda zachovává reálné elektrodové koordináty pro trojrozměrný sférický model hlavy se současným zobrazením elektrické aktivity ve standardním MRI atlasu. To umožňuje zlepšení odhadu zdrojů elektrické aktivity i v hlubokých anatomických strukturách jako např. cingulum, hippokampus nebo amygdala (Pascual–Marqui, 1999, Talarach, Tournoux, 1998, Pánek, 2016).

Metoda sLORETA dokáže tedy velmi přesně určit místo vzniku neurální aktivity v čase. V porovnání s jinými metodami, např. pozitronovou emisní tomografií (PET) nebo funkční magnetickou rezonancí (fMRI) není nákladná a pro pacienta nepředstavuje větší zátěž. Nevýhodou je limitace programu sLORETA pouze na kortikální struktury, metoda nedokáže zobrazit zdrojovou aktivitu např. mozkového kmene nebo míchy (Cannon, 2012, Pascual–Marqui, 1999, 2002, Pascual–Marqui *et al.*, 1994, Pánek 2016, Pánek *et al.*, 2014).

2.11. Brodmannovy oblasti

Brodmannovy oblasti (*Brodmann Areas – BA*) jsou systematicky rozdělené regiony mozkové kůry. Na základě specifické cytoarchitektury nebo histologické struktury a buněčné organizaci jim přísluší odlišné funkce.

Tyto oblasti byly původně definovány a očíslovány německým neurologem Korbianem Brodmannem. Ten začal svou práci koncem 19. století a první cytoarchitektonická mapa lidského mozku byla publikována v jeho monografii v roce 1909. Tato mapa představovala rozdělení kortexu na původních 48 částí s počáteční myšlenkou, že odlišné části mozkové kůry (cytoarchitektonicky, histologicky) slouží odlišným funkcím. Brodmann navíc porovnával dané oblasti i z pohledu neuroanatomického, hledal strukturálně–funkční korelace. Zamýšlel se také nad ontogenezí a možnými patologickými aspekty. Dalšími současníky zabývajícími se kortikálními funkcemi na podkladě morfologických odlišností kortexu byli Australan

Walter Campbell nebo Němec Oskar Vogt (Clarke, Dewhurst, Aminoff, 1996, Zilles, Amunts, 2010).

Jednotlivé korové oblasti jsou označeny čísly v rozmezí 1 až 52, oblasti 12–16 a 48–51 nebyly původně v mapě obsaženy. Byly vynechány z toho důvodu, že u člověka sice tyto oblasti nejsou rozpoznatelné, u jiných druhů savců jsou ale velmi dobře rozvinuty – jedná se především o olfaktoriální, limbický a insulární kortex (Zilles, Amunts, 2010).

Brodmannova práce byla samozřejmě v průběhu let diskutována, označení oblastí pozměňováno, nicméně i přes možnou kontroverzi nadále zůstává široce užívanou a standardizovanou nomenklaturou jednotlivých struktur lidského kortexu. Rozlišujeme osm základních skupin oblastí: *exekutivní funkce*, *motorické funkce*, *somatosenzorické funkce*, *pozornost*, *vizuální funkce*, *paměť*, *regulace emocí*, *zvuk* (Cortical Functions, 2012). V Příloze č. 3 uvádím přehled nejvýznamnějších Brodmannových oblastí, jejich umístění a některých funkcí (Polonara *et al.*, 1999, Cortical Functions, 2012, Lavin, 2013, Bell, Gaillard, 2015, Čihák, 2016). Dále pak v Příloze č. 4 a č. 5 pak přehled Brodmannových oblastí členěn na základě jednotlivých funkcí (Cortical Functions, 2012).

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1. CÍLE A ÚKOLY PRÁCE, HYPOTÉZY

3.1.1. Cíl práce

Cílem práce je zjistit, zda dochází v průběhu prolongované zádrže dechu na suchu a ve vodě ke změnám intracerebrální elektrické aktivity hodnocené prostřednictvím sLORETA programu. Elektrická aktivita byla registrována ze skalpového EEG a následně byla data zpracována v programu sLORETA a byla vyhodnocena aktivita ve statisticky významných Brodmannových oblastech.

3.1.2. Úkoly práce

1. Vytvoření literární rešerše k tématu prolongované zádrže dechu a jejího vlivu na lidský organismus.
2. Vytvoření metodického postupu, podoby experimentu, výběr probandů.
3. Provedení vlastního měření.
4. Zpracování, vyhodnocení a interpretace získaných dat.
5. Vytvoření diskuze s konfrontací stanovených hypotéz, zhodnocení a shrnutí experimentu.

3.1.3. Výzkumné otázky

V1: Existují statisticky významné změny v elektrické aktivitě jednotlivých mozkových oblastí (Brodmannových areí) hodnocené pomocí sLORETA programu mezi klidovým stavem předcházejícím zádrž dechu a stavem při prolongované zádrži dechu na suchu?

V2: Existují statisticky významné změny v elektrické aktivitě jednotlivých mozkových oblastí (Brodmannových areí) hodnocených pomocí sLORETA programu mezi klidovým stavem předcházejícím zádrž dechu a stavem při prolongované zádrži dechu ve vodě?

V3: Existují statisticky významné změny v elektrické aktivitě jednotlivých mozkových oblastí (Brodmannových areí) hodnocených pomocí sLORETA programu

mezi stavy prolongované zádrže dechu na suchu se zavřenýma očima a prolongované zádrže dechu ve vodě se zavřenýma očima?

3.1.4. Hypotézy

H1: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference mezi elektrickou aktivitou mozku hodnocenou pomocí sLORETA programu v jednotlivých oblastech mozku při prolongované zádrži dechu na suchu a při klidovém stavu před zádrží dechu.

H2: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference mezi elektrickou aktivitou mozku hodnocenou pomocí sLORETA programu v jednotlivých oblastech mozku při prolongované zádrži dechu ve vodě a při klidovém stavu před zádrží dechu.

H3: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference mezi elektrickou aktivitou mozku hodnocenou pomocí sLORETA programu v jednotlivých oblastech mozku při porovnání prolongované zádrže dechu ve vodě se zavřenýma očima oproti prolongované zádrži dechu na suchu se zavřenýma očima.

3.2. METODIKA PRÁCE

3.2.1. Charakteristika souboru

Výzkum proběhl na 11 zdravých, dospělých osobách, jednalo se o muže ve věku 23–51 let. Probandi pocházeli z řad aktivních nádechových potapěčů, kteří pravidelně trénují a v tréninku statické zádrže dechu dosahují běžně časů 2:30 minut a výše. Všichni byli před samotným měřením seznámeni s charakterem studie, byli o poučení o průběhu experimentu. Účastníci studie souhlasili s anonymním zpracováním výsledků prostudováním a podpisem informovaného souhlasu (Příloha č. 2). Experiment byl schválen Etickou komisí FTVS UK s jednacím číslem 247/2018 (Příloha č. 1).

3.2.2. Použité metody

Elektrická aktivita mozku byla registrovaná pomocí povrchového telemetrického 32 kanálového EEG přístroje *Nicolet™EEG Wireless Amplifier 32/64* firmy Natus Neurology z USA. EEG záznam byl na suchu, i ve vodě snímán pomocí EEG čepice (Electro–Cap) s plochými registračními elektrodami. Celkový počet elektrod na čepici je 19 (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F8, T5, T3, C3, Cz, C4, T4, T6, P3, Pz,

P4, O1, O2) s rozmístěním dle mezinárodně platného systému 10–20. Impedanční odpor elektrod nepřevyšoval 10 k Ω , vzorkovací frekvence byla 512 Hz a pásmová propustnost 0,5–70 Hz. Získaná data byla následně zpracována pomocí programu NeuroGuide. Byl vybrán 30s bezartefaktový úsek, který byl následně exportován do sLORETA programu.

3.2.3. Sběr dat

Teoretická část práce byla zpracována na základě tištěných, zejména zahraničních elektronických zdrojů. Ty byly získávány pomocí online databází EBSCOhost, PubMed a Medline, prostřednictvím přístupu Karlovy Univerzity a Národní lékařské knihovny.

3.2.4. Průběh měření

Měření probíhalo ve dvou dnech v lednu 2019 v prostorách bazénu FTVS UK s vedoucím práce MUDr. Davidem Pánkem, Ph.D. a doktorandem Mgr. Milanem Martínkem, kteří zajišťovali správnost přípravy a průběhu měření EEG. První den bylo naměřeno pět probandů, druhý den šest. Každý proband byl po svém příchodu seznámem s organizací a časovým průběhem, průměrný čas měření jednoho probanda byl 1,5 hodiny.

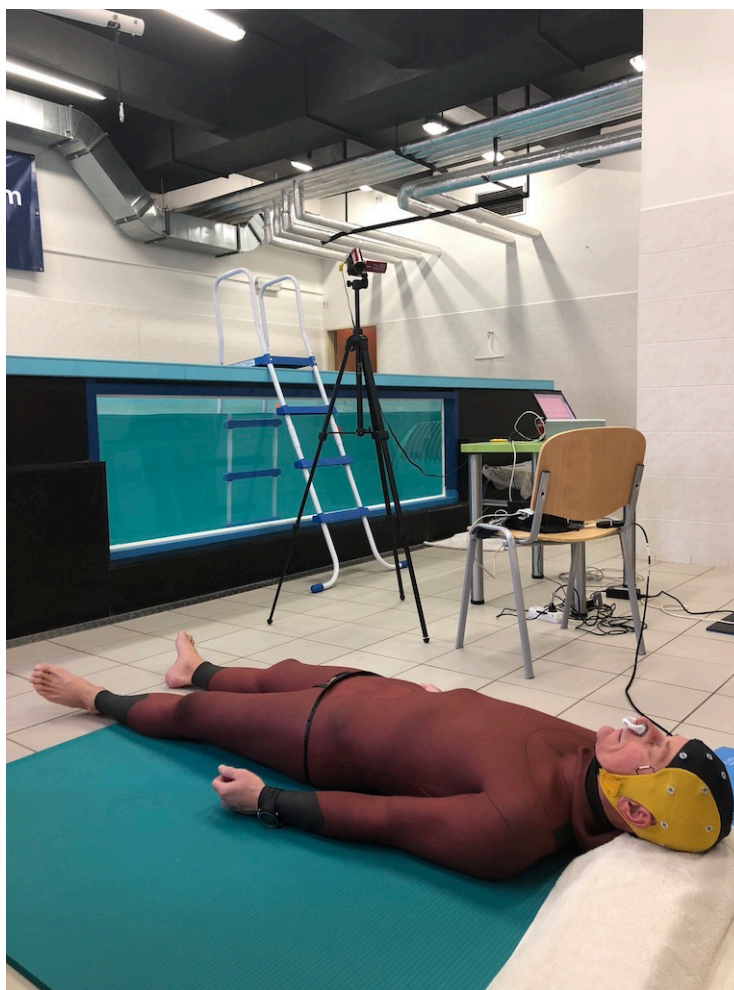
Před vlastním měřením se probandi oblékli do neoprenů, rozcvičili se dle svých zvyklostí a absolvovali dvě přípravné prolongované zádrže dechu na suchu. Vsedě pak byla probandovi aplikována EEG čepice s 19 registračními elektrodami v systému 10–20 (před měřením ve vodě pak byla čepice dále zajištěna a utěsněna plaveckou čepicí a fólií). Nejprve bylo vleže na zádech naměřeno pětiminutové klidové EEG se zavřenýma očima (PRE CE). Vlastní experiment se pak skládal ze dvou částí: prolongovaná zádrž na suchu vleže na zádech se zavřenýma očima (LAND CE). Poté následovala prolongovaná zádrž dechu ve vodě, v pronační poloze na hladině s ponořeným obličejem se zavřenýma očima (WATER CE).

Délky prolongovaných zádrží dechu se pohybovaly od 2:15 min do 5:30 min (podrobnější popis viz Tabulka č. 1 dále). Pauzy mezi jednotlivými zádržemi byly v minimální délce 3 minuty podle potřeb probanda. Při měření prolongovaných zádrží dechu ve vodě byla v bazéně spolu s probandem přítomna řešitelka práce pro zajištění bezpečnosti. I při zádržích dechu na suchu pak byly mezi řešitelkou práce a probandem domluveny tzv. safety signály dle zvyklostí ve freedivingu. S postupující zádrž dechu

se provádí jednoduché kontrolní úkony, na poklepání na rameno proband odpovídal zvednutím ukazováčku. Ke konci zádrže pak byla i na verbální výzvu vyžadována kontrolní reakce, např. zabubnování prsty na okraj bazénu. Součástí bezpečnostních úkonů byla i poloha potapěče ve vodě, nejprve volné splývání, dále přiblížení se okraji bazénu, kterého se pak potapěč zachytil rukama a navíc byl jištěn zezadu probandkou.

Tabulka č. 1 Přehled informací o jednotlivých probandech, délky jejich zádrží dechu a zkušenosti s nádechovým potápěním

Proband	Výška/váha	Věk	Délka zádrže dechu na suchu	Délka zádrže dechu ve vodě	Zkušenosti s nádechovým potápěním
I.	168 cm/ 82 kg	46	2:13	3:25	2 roky aktivně
II.	181 cm/ 81 kg	44	3:52	5:32	profesionální trenér, instruktor, závodník
III.	186 cm/ 80 kg	29	3:11	4:25	4 roky aktivně, 1 rok závodně
IV.	170 cm/ 70 kg	40	3:28	4:36	3 roky, poslední rok závodně
V	179 cm/70 kg	26	3:22	5:23	2 roky, 1 rok závodně
VI	175 cm/83 kg	51	2:37	4:15	4 roky aktivně
VII	182 cm/80 kg	34	3:12	4:54	aktivně 4 roky, 2 roky závodně
VIII.	185 cm/ 70 kg	43	2:43	2:15	9 let aktivně
IX.	189 cm/ 78 kg	43	3:15	4:05	1 rok aktivně
X.	180 cm/ 80 kg	41	3:06	3:50	4 aktivně roky
XI	181 cm/70 kg	34	3:05	4:26	aktivně 3 roky



Obrázek č. 12 Měření EEG při prolongované zádrži dechu ve vodě se zavřenýma očima. Zdroj: autorka práce.



Obrázek č. 13 Měření EEG při prolongované zádrži dechu ve vodě se zavřenýma očima. Zdroj: autorka práce.

3.2.5. Analýza dat

Data získaná z každé části experimentu (PRE CE, LAND CE, WATER CE) byla exportována do programu NeuroGuide, kde byly vybrány 30 sekundové bezartefaktové úseky. Tyto úseky v podobě textového souboru byly dále vyhodnoceny prostřednictvím programu sLORETA, kde se jednotlivá měření každého probanda rozdělená na epochy převedla pomocí parametrického modelu pro multikanálové EEG na výsledné vzájemné spektrum. Výpočet vzájemného spektra byl vyhodnocen pro všechna pásma elektroencefalografického záznamu, tedy: *delta* (0,5 – 4 Hz), *theta* (4 – 7 Hz), *alfa-1* (7 – 10 Hz), *alfa-2* (10 – 13 Hz), *beta-1* (13 – 18 Hz), *beta-2* (18 – 21 Hz), *beta-3* (21 – 30 Hz) a *gama* (více než 30 Hz). Vzájemná spektra vytvořená pro jednotlivá frekvenční pásma byla následně převedena do speciálního souboru programu sLORETA ve formátu “.slor”, který umožňuje zobrazení v trojrozměrném Talaraichově atlasu.

Součástí programu sLORETA je i statistický modul, ve kterém byla získaná data porovnávána. Statisticky významná diference při porovnávání jednotlivých stavů byla v programu vypočítávána pomocí párového t-testu s logaritmickou transformací dat o parametru vyhlazení 0.2. Vybrány byly soubory sLORETA bez normalizace, s porovnáváním párové skupiny (test A=B). Zvolena byla možnost randomizování dat s hodnotou 5000 na hladině významnosti $p \leq 0,10$ s korelací pro opakované testování. Data statisticky významná byla pak zobrazena v programu sLORETA modulem *viewer* ve dvoudimenzionálním (frontální, horizontální a transverzální řezy) i trojdimenzionálním (3D sférický model) zobrazení mozku. Statisticky významné změny proudové hustoty v jednotlivých Brodmannových oblastech mozku zde byly pro jednotlivá frekvenční pásma barevně zobrazeny. Jako oblasti se zvýšenou aktivitou byly označeny místa se zvýšenou proudovou hustotou voxelů v daném místě. Snížená aktivita naopak představuje sníženou proudovou hustotu voxelů oblasti. Ke statistickému porovnání byly vybrány tři párové skupiny:

- I. Porovnání dat získaných u všech probandů během prodloužené zadržky dechu na suchu se zavřenými očima oproti klidovému stavu se zavřenými očima – LAND CExPRE CE.
- II. Porovnání dat získaných u všech probandů během prodloužené zadržky dechu ve vodě se zavřenými očima oproti klidovému stavu se zavřenými očima – WATER CExPRE CE.

- III. Porovnání dat získaných u všech probandů během prolongované zádrže dechu ve vodě se zavřenými očima oproti zádrži dechu na suchu se zavřenými očima – WATER CExLAND CE.

3.3. VÝSLEDKY

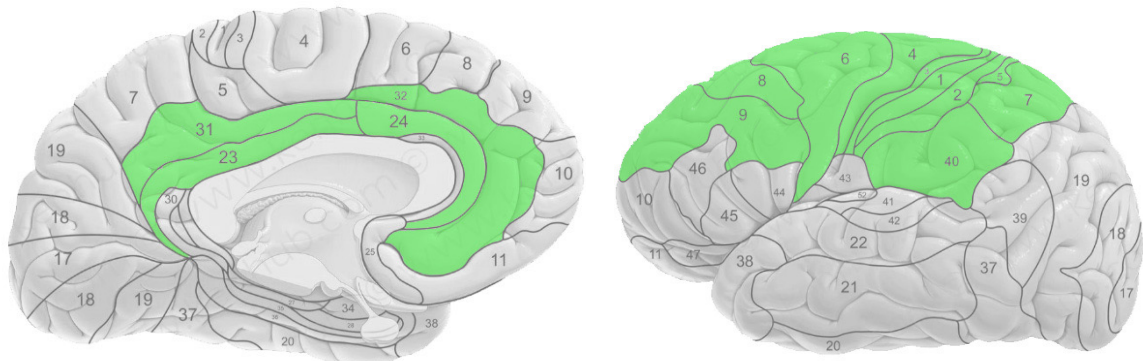
3.3.1. Porovnání stavů LAND CE x PRE CE

Prvními porovnávanými daty jsou ta získaná z měření EEG záznamu u všech probandů během prolongované zádrže dechu na suchu se zavřenými očima oproti počátečnímu klidovému EEG se zavřenými očima. Statistickým zpracováním v sLORETA programu byla prokázána signifikantní diference v aktivaci mozkových oblastí na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčních pásmech *delta*, *beta-1*, *beta-2*, *beta-3* a *gama*.

Níže je souhrnná tabulka se zaznamenanými výsledky všech aktivovaných Brodmannových zón (seřazených dle významnosti) v jednotlivých frekvenčních pásmech. Žlutě jsou vyznačena čísla oblastí se zvýšenou aktivitou v dané oblasti, modře naopak místa se sníženou aktivitou. Tučně je u frekvenčního pásma *beta-2* vyznačena BA6, u které se prokázala signifikantní diference i na hladině statistické významnosti $p \leq 0,01$.

Tabulka č. 2 Souhrnný přehled všech aktivovaných Brodmannových zón v daných frekvenčních pásmech ($p \leq 0,05$)

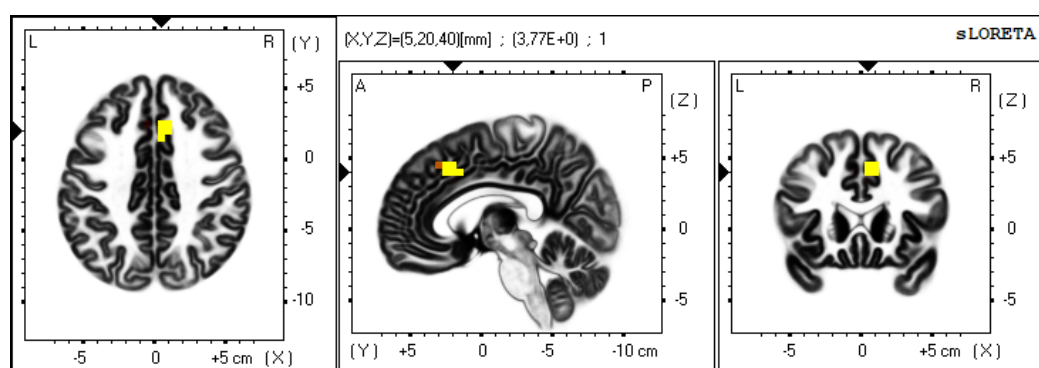
Frekvence	Brodmannovy arey
Delta	32, 8, 6
Theta	–
Alfa-1	–
Alfa-2	–
Beta-1	4, 1, 3, 6, 2, 24, 31, 40
Beta-2	6, 31, 24, 4, 32, 3, 8, 5, 23, 1, 40
Beta-3	6, 24, 4, 31, 3, 32, 2, 5, 8, 40, 9, 23, 7
Gama	24, 31, 4, 3, 6, 23, 2, 40



Obrázek č. 14 Souhrnné zobrazení všech Brodmannových zón aktivovaných napříč frekvenčními pásmy delta, beta-1, beta-2, beta-3 a gama při porovnání stavů LAND CE x PRE CE.

1. Frekvenční pásmo delta

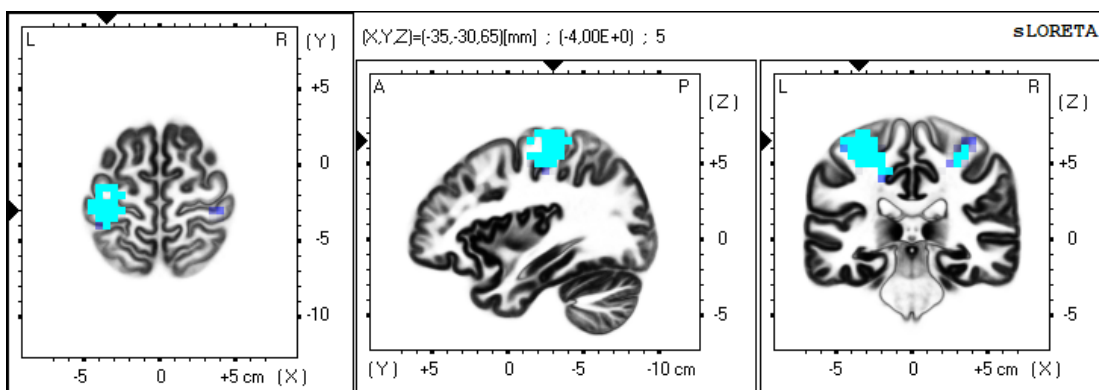
V pásmu delta se signifikantní diference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 32 (cingulární korová oblast), BA 8 (prefrontální kortex) a BA 6 (gyrus precentralis).



Obrázek č. 15 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu delta u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zádrž dechu na suchu se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

2. Frekvenční pásmo beta-1

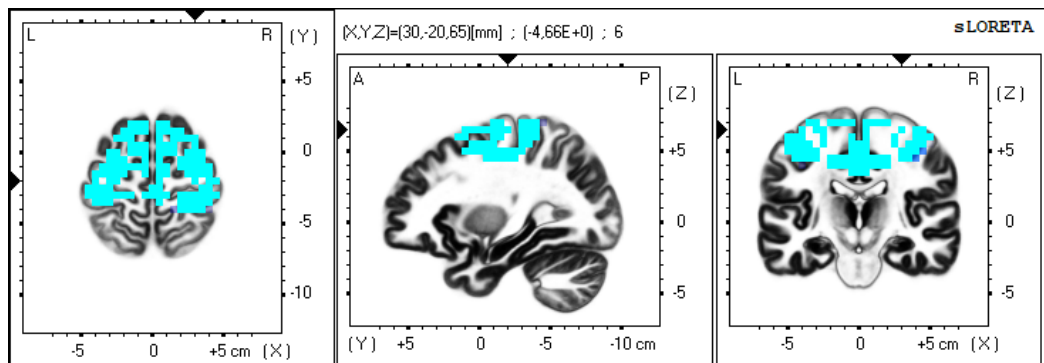
V pásmu beta-1 se signifikantní difference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 4 (gyrus precentralis), BA 1 a 3 (gyrus postcentralis), BA 6 (gyrus precentralis), BA 2 (gyrus postcentralis), BA 24 (cingulární korová oblast), BA 31 (gyrus cingularis posterior) a BA 40 (lobulus parietalis inferior – gyrus supramarginalis).



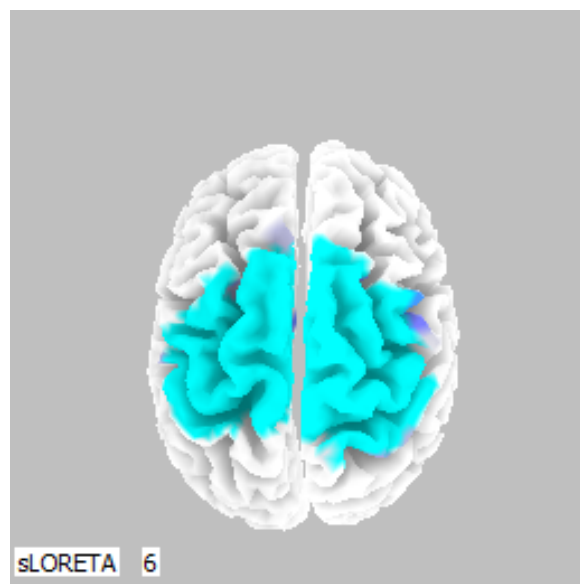
Obrázek č. 16 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta-1 u porovnávané EEG aktivity při stavech prodloužená zadrž dechu na suchu se zavřenými očima a klidové EEG se zavřenými očima (modrá a fialová barva voxelů značí sníženou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

3. Frekvenční pásmo beta-2

V pásmu beta-2 se signifikantní difference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 6 (precentrální gyrys), BA 31 (gyrus cingularis posterior), BA 24 (cingulární korová oblast), BA 4 (gyrus precentralis), BA 32 (cingulární korová oblast), BA 3 (gyrus postcentralis), BA 8 (prefrontální kortex), BA 5 (lobulus parietalis superior), BA 23 (gyrus cingularis posterior), BA 1 (gyrus postcentralis), BA 40 (lobulus parietalis inferior – gyrus supramarginalis).



Obrázek č. 17 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta–2 u porovnávání EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí sníženou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

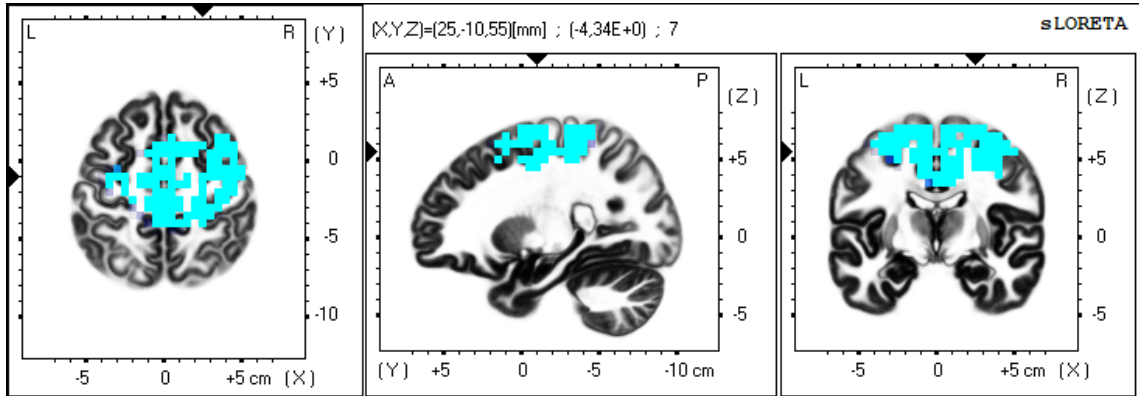


Obrázek č. 18 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta–2 u porovnávání EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí sníženou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

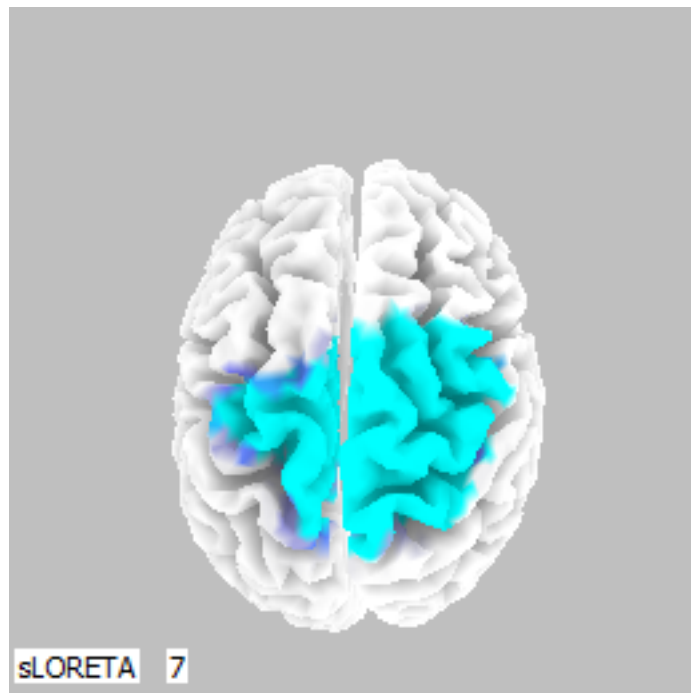
4. Frekvenční pásmo beta–3

V pásmu beta–3 se signifikantní diference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 6 (precentrální gyrus), BA 24 (cingulární korová oblast), BA 4 (gyrus precentralis), BA 31 (gyrus cingularis posterior), BA 3 (gyrus postcentralis), BA 32 (cingulární korová oblast), BA 2 (gyrus postcentralis), BA 5 (lobulus parietalis)

superior), BA 8 (prefrontální kortex), BA 40 (lobulus parietalis inferior – gyrus supramarginalis), BA 9 (gyrus frontalis medialis), BA 23 (gyrus cingularis posterior), BA 7 (lobulus parietalis superior).



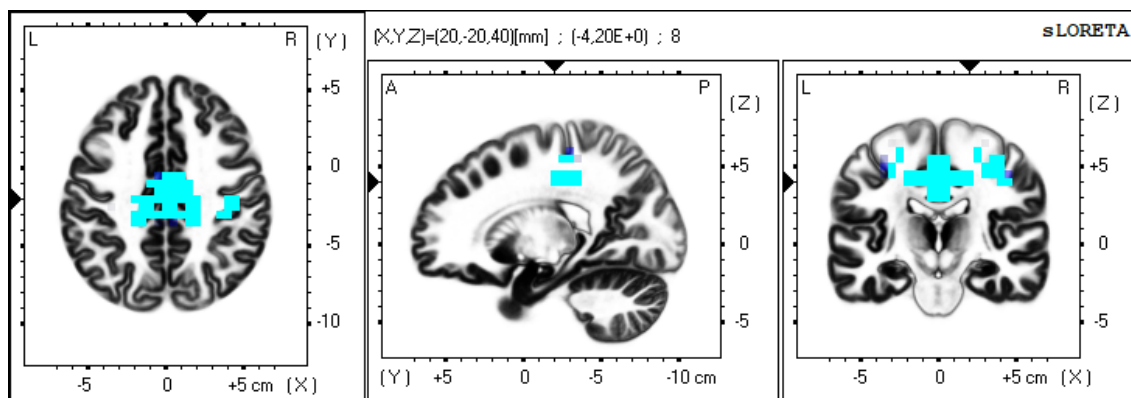
Obrázek č. 19 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta-3 u porovnané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí sníženou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).



Obrázek č. 20 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta-3 u porovnané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí sníženou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

5. Frekvenční pásmo gama

V pásmu gama se signifikantní difference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 24 (cingulární korová oblast), BA 31 (gyrus cingularis posterior), BA 4 (gyrus precentralis), BA 3 (gyrus postcentralis), BA 6 (precentrální gyrus), BA 23 (gyrus cingularis posterior), BA 2 (gyrus postcentralis), BA 40 (lobulus parietalis inferior – gyrus supramarginalis).



Obrázek č. 21 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu gama u porovnané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí sníženou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

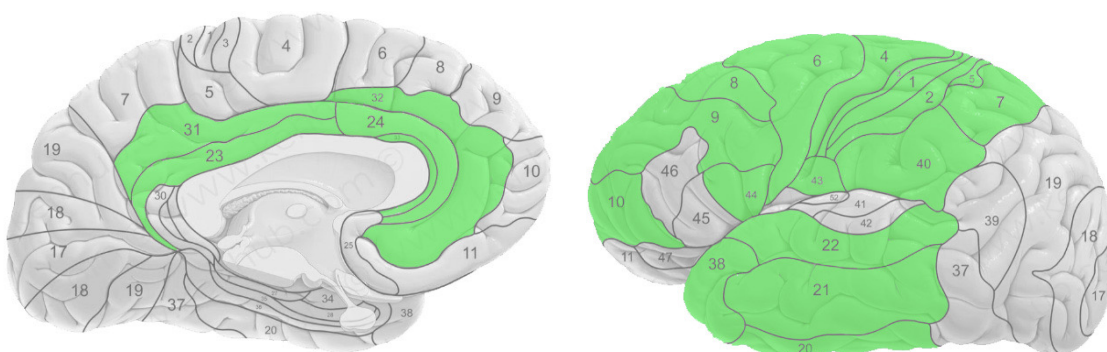
3.3.2. Porovnávání stavů WATER CE x PRE CE

Dalšími porovnáváními daty byly výsledky z měření EEG záznamu u všech probandů během prolongované zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima oproti počátečnímu klidovému EEG se zavřenýma očima. Statistickým zpracováním v sLORETA programu byla prokázána signifikantní difference v aktivaci mozkových oblastí na hladině statistické významnosti $p \leq 0,01$ ve frekvenčních pásmech *delta*, *theta*, *beta-2* a *beta-3*. Prokázána byla na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ také signifikantní difference v pásmu *alfa-1* i *alfa-2*, v obou případech se zvýšenou proudovou hustotou voxelů ve frontálních oblastech mozku

Níže je souhrnná tabulka se zaznamenanými výsledky všech aktivovaných Brodmannových zón (seřazených dle významnosti) v jednotlivých frekvenčních pásmech. Žlutě jsou vyznačena čísla oblastí se zvýšenou aktivitou v dané oblasti, modře naopak místa se sníženou aktivitou.

Tabulka č. 3 Souhrnný přehled všech aktivovaných Brodmannových zón v daných frekvenčních pásmech ($p \leq 0,01$)

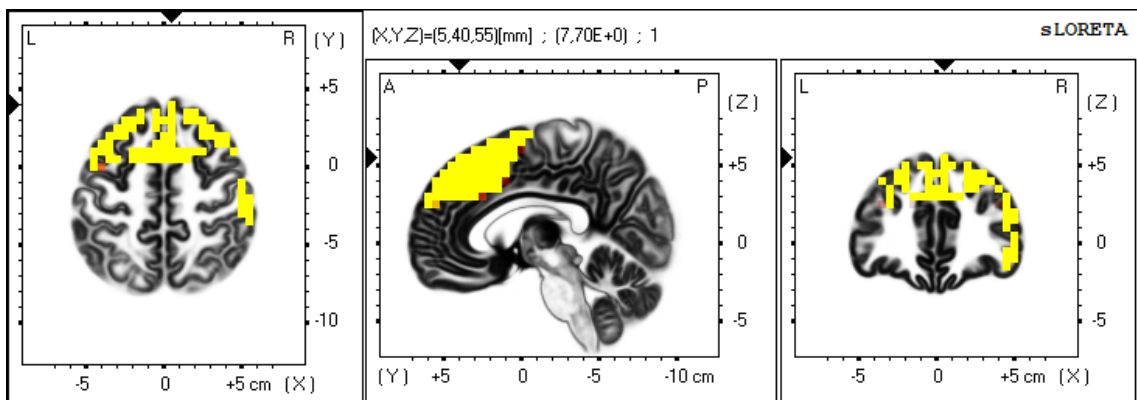
Frekvence	Brodmannovy arey
Delta	8, 6, 3, 4, 21, 22, 43, 20, 1, 44, 38, 32, 40, 45, 9, 42, 13, 2, 36, 47, 20, 35, 28, 46, 10
Theta	9, 10, 8
Alfa-1	–
Alfa-2	–
Beta-1	–
Beta-2	4, 24, 31, 3, 6, 23, 2, 40, 7, 1, 5, 32, 8, 9
Beta-3	23, 24, 31, 3, 33, 2, 4, 40, 6
Gama	–



Obrázek č. 22 Souhrnné zobrazení všech Brodmannových zón aktivovaných napříč frekvenčními pásmy delta, theta, beta-2 a beta-3 při porovnání stavů WATER CE x PRE CE.

1. Frekvenční pásmo delta

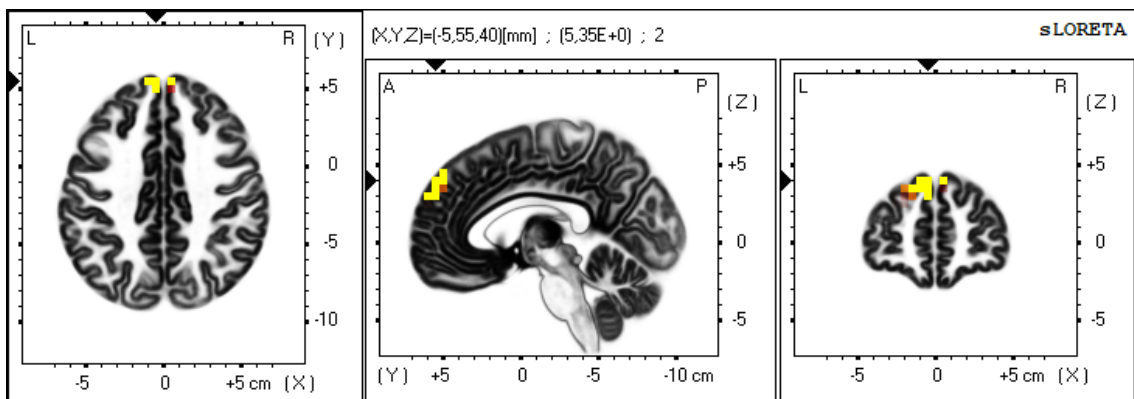
V pásmu delta se signifikantní diference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 8 (prefrontální kortex), BA 6 (gyrus precentralis), BA 3 (postcentrální gyros), BA 4 (gyrus precentralis), BA 21 (gyrus temporalis medialis), BA 22 (gyrus temporalis superior), BA 43 (area subcentralis), BA 20 (gyrus fusiformis, gyros parahippocampalis), BA 1 (gyrus postcentralis), BA 44 (gyrus frontalis inferior–pars opercularis), BA 38 (polus temporalis), BA 32 (cingulární korová oblast).



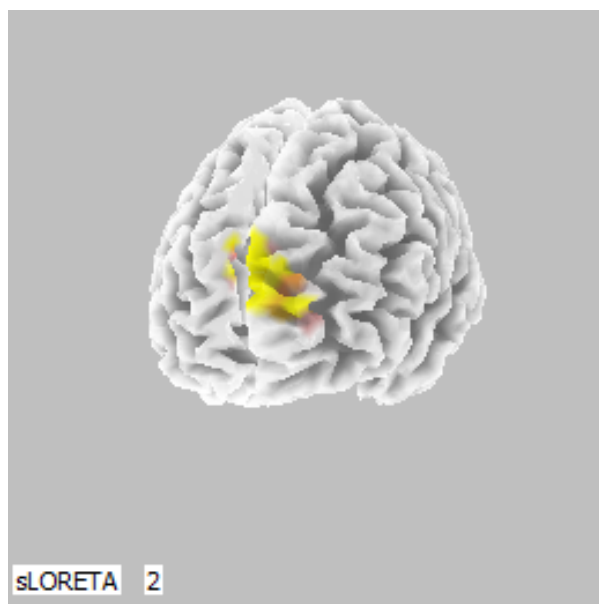
Obrázek č. 23 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu delta u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

2. Frekvenční pásmo theta

V pásmu theta se signifikantní difference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 9 a BA 10 (gyrus frontalis medialis), BA 8 (prefrontální kortex).



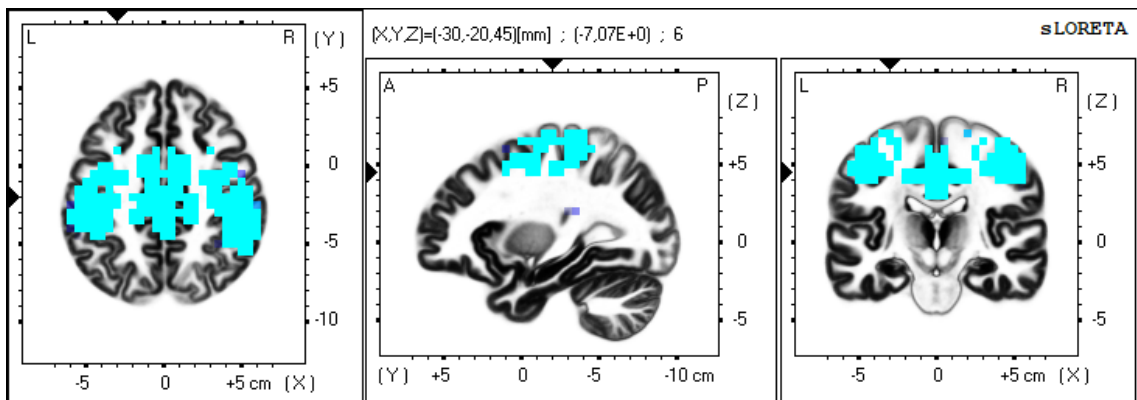
Obrázek č. 24 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu theta u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).



Obrázek č. 25 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu theta u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

3. Frekvenční pásmo beta-2

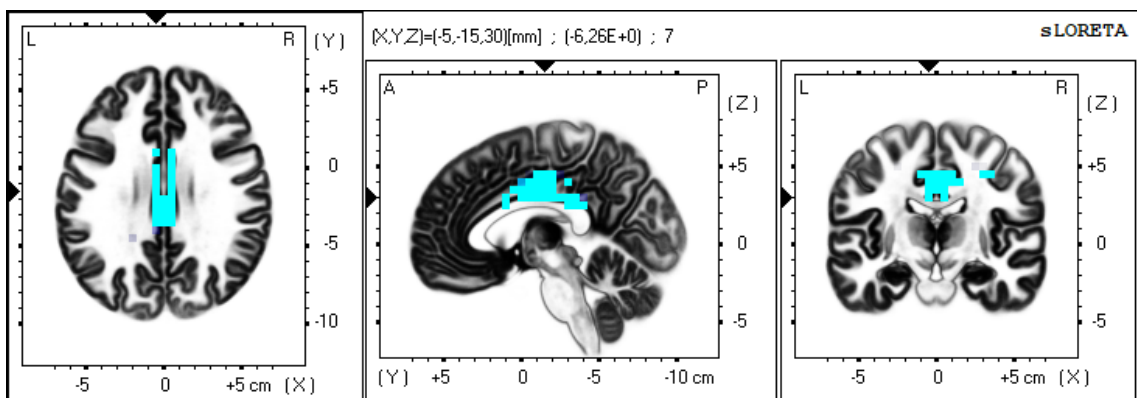
V pásmu beta-2 se signifikantní diference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 4 (gyrus precentralis), BA 24 (cingulární korová oblast), BA 31 (gyrus cingularis posterior), BA 3 (postcentrální gyros), BA 6 precentrální gyros), BA 23 (gyrus cingularis posterior), BA 2 (postcentrální gyros), BA 40 (lobulus parietalis inferior – gyros supramarginalis), BA 7 (lobulus parietalis superior), BA 1 (gyrus postcentralis), BA 5 (lobulus parietalis superior), BA 32 (cingulární korová oblast), BA 8 (prefrontální kortex), BA 9 (gyrus frontalis medialis).



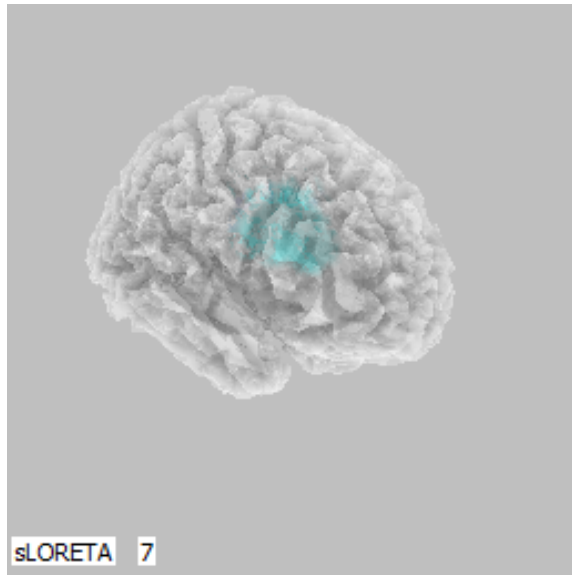
Obrázek č. 26 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta-2 u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

4. Frekvenční pásmo beta-3

V pásmu beta-3 se signifikantní diference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 23 (gyrus cingularis posterior), BA 24 (cingulární korová oblast), BA 31 (gyrus cingularis posterior), BA 3 (postcentrální gyrus), BA 33 (cingulární korová oblast), BA 2 (postcentrální gyrus), BA 4 (gyrus precentralis), BA 40 (lobulus parietalis inferior – gyrus supramarginalis), BA 6 (gyrus precentralis).



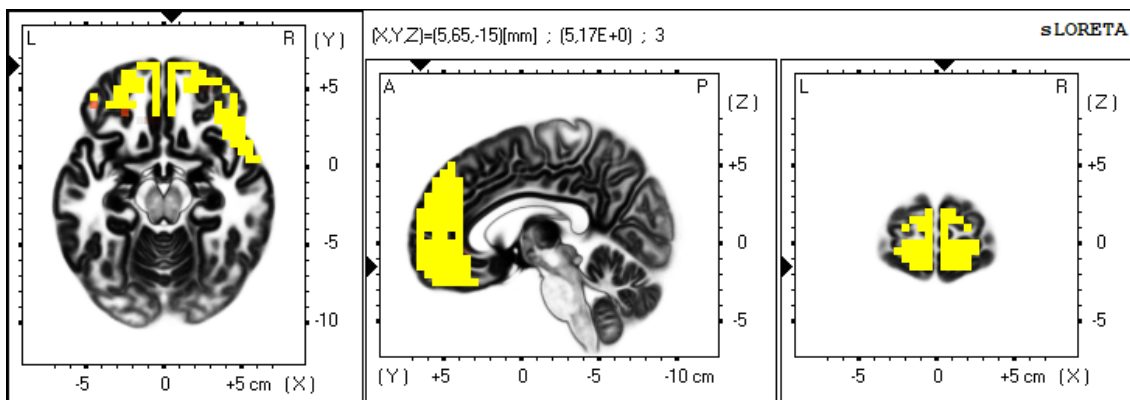
Obrázek č. 27 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta-3 u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).



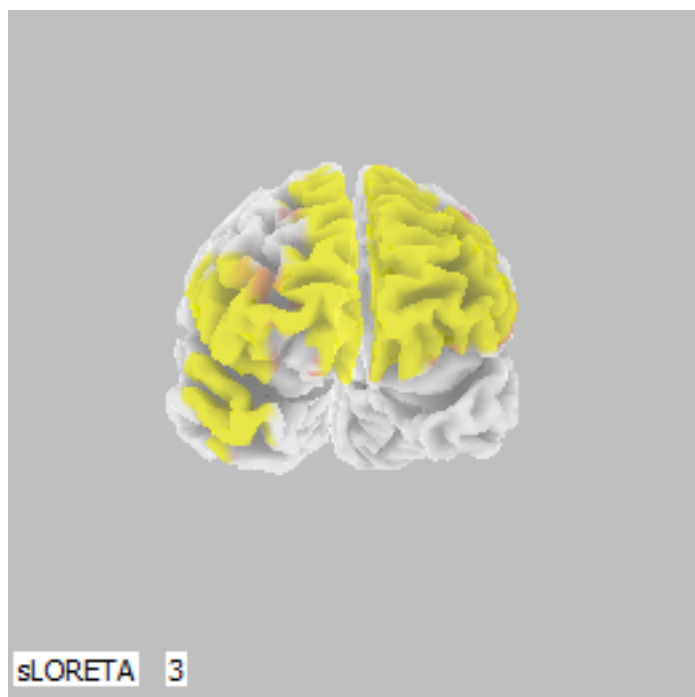
Obrázek č. 16 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu beta-3 u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (modrá a fialová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

5. Frekvenční pásmo alfa

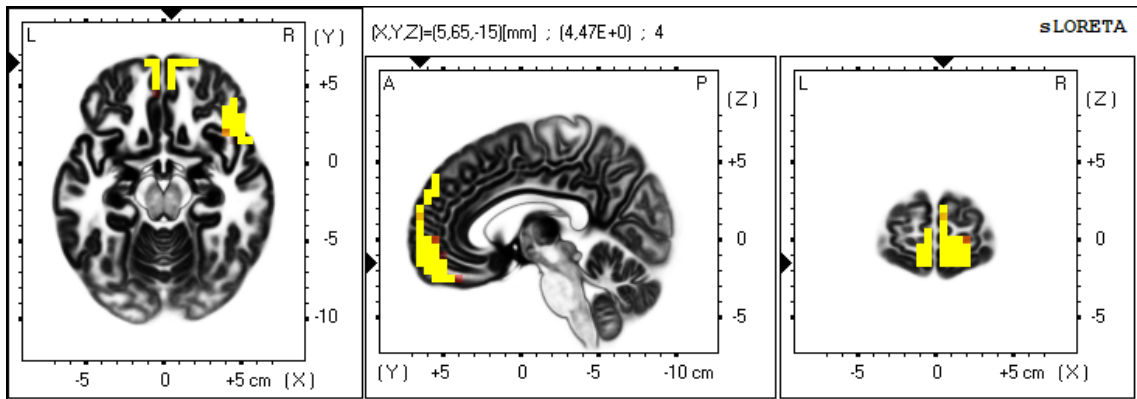
Během zadrž dechu ve vodě v porovnání s klidovým stavem před zadrž dechu se na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ objevila signifikantní difference v pásmu alfa-1 i alfa-2. V obou případech se zvýšenou proudovou hustotou voxelů ve frontálních oblastech mozku, zj. BA 11 (orbitofrontální oblast), BA 10 (gyrus frontalis medialis), BA 9 (gyrus frontalis medialis), BA 32 (cingulární korová oblast), BA 47 (gyrus frontalis inferior), BA 38 (polus temporalis), BA 21 (gyrus temporalis medialis), BA 45 (gyrus frontalis inferior) a BA 46 (gyrus frontalis medialis), pořadí dle významnosti



Obrázek č. 29 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu alfa-1 u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).



Obrázek č. 30 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu alfa-1 u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).



Obrázek č. 31 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu alfa-2 u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).



Obrázek č. 32 Statisticky významné voxely ve frekvenčním pásmu alfa-2 u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a klidové EEG se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

3.3.3. Porovnávání stavů WATER CE x LAND CE

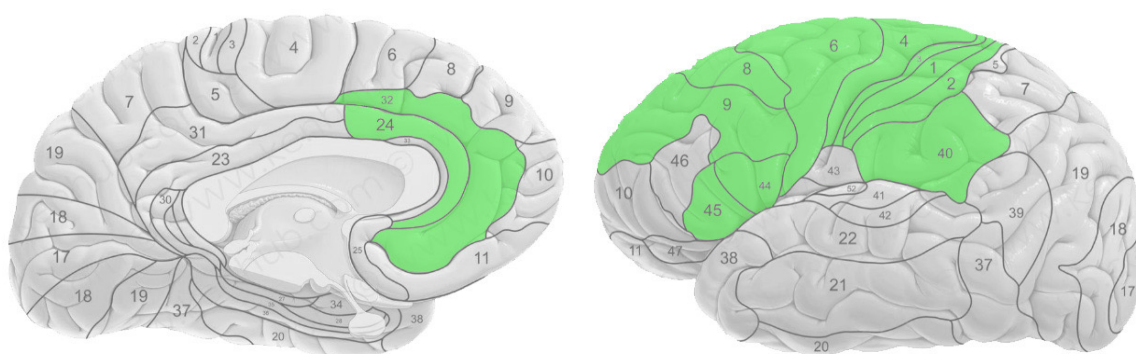
Porovnávány byly také výsledky z měření EEG záznamu u všech probandů během prolongované zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima oproti prolongované zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima. Statistickým zpracováním v sLORETA

programu byla prokázána signifikantní diference v aktivaci mozkových oblastí na hladině statistické významnosti $p \leq 0,10$ ve frekvenčních pásmech *delta* a *theta* (na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ a $0,01$ byla prokázána signifikantní diference pouze v pásmu delta).

Níže je souhrnná tabulka se zaznamenanými výsledky všech aktivovaných Brodmannových zón (seřazených dle významnosti) v jednotlivých frekvenčních pásmech. Žlutě jsou vyznačena čísla oblastí se zvýšenou aktivitou v dané oblasti. Aktivované Brodmannovy arey v pásmu delta se shodují napříč statistickými významnosti $p \leq 0,10$, $p \leq 0,05$ i $p \leq 0,01$.

Tabulka č. 4 Souhrnný přehled všech aktivovaných Brodmannových zón v daných frekvenčních pásmech ($p \leq 0,10$)

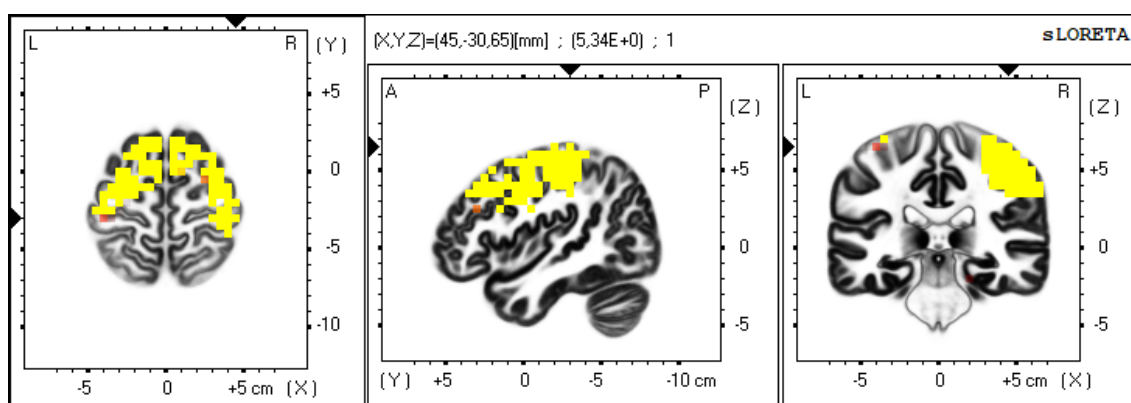
Frekvence	Brodmannovy arey
Delta	1, 3, 6, 4, 8, 9, 2, 40, 32, 46, 45, 24, 44, 13
Theta	8, 9
Alfa-1	–
Alfa-2	–
Beta-1	–
Beta-2	–
Beta-3	–
Gama	–



Obrázek č. 33 Souhrnné zobrazení všech Brodmannových zón aktivovaných napříč frekvenčními pásmy delta a theta při porovnání stavů WATER CE x LAND CE.

1. Frekvenční pásmo delta

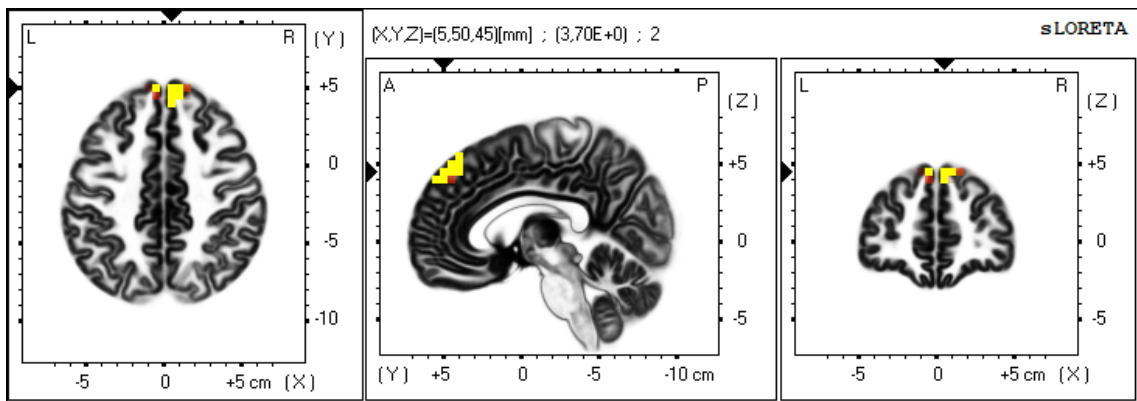
V pásmu delta se signifikantní difference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 1 (postcentrální gyrus), BA 3 (postcentrální gyrus), BA 6 (gyrus precentralis), BA 4 (gyrus precentralis), BA 8 (prefrontální kortex), BA 9 (gyrus frontalis medialis), BA 2 (postcentrální gyrus), BA 40 (lobulus parietalis inferior – gyrus supramarginalis), BA 32 (cingulární korová oblast), BA 45 (gyrus frontalis inferior), BA 46 (gyrus frontalis medialis), BA 24 (cingulární korová oblast), BA 44 (gyrus frontalis inferior – pars opercularis) a BA 13 (insulární korová oblast).



Obrázek č. 34 Statisticky významné voxely (významnost 0,10) ve frekvenčním pásmu delta u porovnávané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a prolongovaná zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

2. Frekvenční pásmo theta

V pásmu theta se signifikantní difference ukazuje, v pořadí dle významnosti, v oblastech BA 8 (prefrontální kortex) a BA 9 (gyrus frontalis medialis).



Obrázek č. 35 Statisticky významné voxely (významnost 0,10) ve frekvenčním pásmu theta u porovnané EEG aktivity při stavech prolongovaná zadrž dechu ve vodě se zavřenýma očima a prolongovaná zadrž dechu na suchu se zavřenýma očima (žlutá a oranžová barva voxelů značí zvýšenou aktivitu v daných Brodmannových oblastech).

3.4. DISKUSE

Jak již bylo zmíněno výše, mechanismus regulace a kontroly dechového cyklu není kompletně znám. Ani sledování elektrické aktivity mozku během prolongovaných zádrží dechu tak není v současné době příliš zmapovaným tématem. Data z provedeného experimentu této diplomové práce a výše zmíněné výsledky jsou do jisté míry ojedinělé, zejména co se týče měření elektrické aktivity mozku ve vodě. Pro interpretaci výsledků budou použity mimo jiné známé studie týkající se elektrické aktivity mozku a volní regulace dechového cyklu, hypoxických a hyperkapnických stavů, stavů relaxace a meditace nebo obstrukční spánkové apnoe. Všechny funkce jednotlivých Brodmannových oblastí byly vyhodnoceny a popsány pomocí kortikálního atlasu (Cortical Functions, 2012).

3.4.1. Diskuse k hypotéze č. 1

H1: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference mezi elektrickou aktivitou mozku hodnocenou pomocí sLORETA programu v jednotlivých oblastech mozku při prolongované zádrži dechu na suchu a při klidovém stavu před zádrží dechu při zavřených očích.

Během maximální volní prolongované zádrže dechu na suchu došlo v porovnání s klidovým stavem před zádrží k signifikantní diferenci v aktivaci mozkových oblastí ve frekvenčních pásmech *delta*, *beta-1*, *beta-2*, *beta-3* a *gama* na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$. Stanovená hypotéza tak byla potvrzena.

V pásmu *delta* došlo k signifikantní diferenci v aktivaci Brodmannových oblastí **32**, **8** a **6**. Ve všech třech areích došlo ke zvýšení proudové hustoty. BA 32, anteriorní část cingulární korové oblasti, spadá funkčně pod limbický systém. Předpokládá se tedy její účast při emocích, ale také při motorickém plánování, představě pohybu a motorické inhibici. Somatosensoricky má tato oblast spojitost s bolestí, výdrží nebo odolností. Některé studie také naznačují spojitost s udržováním pojmu o čase, např. při úkolech zahrnujících odhad plynutí času (Stevens *et al.*, 2007). V průběhu prolongovaných zádrží dechu se tak tato oblast mohla aktivovat vzhledem k nepříjemným pocitům, které s postupující zádrží dechu přicházejí nebo v souvislosti s odhodláním dosáhnout v zádrži dechu aktuálního možného maxima. Pojetí o čase trvání apnoe během zádrže dechu může mít také ve zdůvodnění aktivace této oblasti své místo. Aktivace této

oblasti koresponduje s poznatky studie Liotti *et al.* (2001), kdy se při navozeném pocitu potřeby nadechnout se BA 32 na MRI projevila taktéž zvýšenou aktivitou. BA 8 je částí prefrontálního kortexu, zahrnuje laterální a mediální část suplementární motorické oblasti. Kromě funkcí spojených s motorikou souvisí také s exekutivní kontrolou chování, připisuje se jí také odpověď na proprioceptivní stimulaci nebo předvídání bolesti (Radanovic *et al.*, 2002). BA 6 je premotorickou korovou oblastí, lokalizovanou v gyrus precentralis. Kromě aktivace při složitých volních pohybech se motoricky účastní také v rámci volní kontroly dýchání, což jasně vysvětluje její podíl během prolongovaných zádrží dechu (Šmejkal, Druga, Tintěra, 2000). Zvýšená aktivita v oblasti BA 6 je dle studie Lehmann *et al.* (2001) prokázána také např. v porovnání s klidovým stavem při meditativní technice zahrnující představu “rozpuštění sebe sama v nekonečnou neohraničenou entitu”. Stav, který můžeme označit za podobný tomu při koncentrované pozornosti na zvládnutí zádrže dechu a relaxaci během maximální volní prolongované zádrží dechu.

Nárůst aktivity v delta frekvenčním pásmu při zádrží dechu (a tedy zvýšených hodnotách CO₂ – hyperkapnii) ve své studii prokázali také Morelli *et al.* (2018) nebo Halpern *et al.* (2003). V porovnání se stavem při volném dechovém cyklu byl patrný nárůst aktivity delta v anteriorních a centrálních částech kortexu. Aktivita pásma delta je u lidí obvykle spojována s autonomními a metabolickými procesy a integrací homeostatických procesů v mozkové aktivitě. Stav, kdy dochází k posunu elektrické aktivity mozku z vysokých frekvencí (spojovaných spíše s komplexními úkony) k nízké frekvenci delta (související více s kontrolou vitálních funkcí, právě např. respirační nebo hemodynamikou), autoři popisují v souvislosti se zádrží dechu (Morelli *et al.*, 2018, Morelli *et al.*, 2015).

V pásmu *beta-1* byly se signifikantní diferencí aktivovány Brodmanovy arey **4, 1, 3, 6, 2, 24, 31 a 40**. Ve frekvenci *beta-2* došlo k signifikantní diferencí v aktivaci Brodmannových zón **6, 31, 24, 4, 32, 3, 8, 5, 23, 1** (a dále 40). V pásmu *beta-3* pak byly se signifikantní diferencí aktivovány Brodmannovy zóny **6, 24, 4, 31, 3, 32, 2, 5, 8, 40** (a dále 9, 23 a 7). Ve všech třech pásmech *beta* to tedy byly oblasti **4, 1, 3, 6, 2, 24, 31 a 40**, v pásmu *beta-2* pak oproti *beta-1* a *beta-3* nebyla aktivována BA 2, dále pak v pásmech *beta-2* a *beta-3* byly v porovnání s *beta-1* navíc aktivovány oblasti 32, 8 a 5. Ve všech případech došlo ke snížení proudové hustoty.

BA 4, oblast precentrálního gyru, je primárním motorickým kortexem. V první řadě se tato oblast účastní při tvorbě podnětů vedoucích k pohybu opačné poloviny těla a představě pohybu. Dále se účastní somatosensoricky např. v kinestetické percepci pohybů končetin, propiocepci prstů, odpovědi na dotek apod. Oblast je také spojována s volní kontrolou dýchání (Šmejkal, Druga, Tintěra, 2000). Oblasti BA 1, 2 a 3, v postcentrálním gyru, jsou primárním somatosensorickým kortexem. Tyto části mozkové kůry jsou tradičně spojovány se somatosensorickou percepcí, účastní se tak např. při lokalizaci pohybu, hluboké propiocepci, diskriminačním čítí, lokalizaci vibrace nebo bolesti. Dále se také oblast podílí na organizaci pohybu, volních pohybech ruky a účastní se při motorickém učení. Předpokládá se také spojitost se somatosensorickým systémem zrcadlových neuronů. BA 6 je, jak již bylo zmíněno výše, premotorickou korovou oblastí, lokalizovanou v gyrus precentralis. Zahrnuje ale také suplementární motorickou oblast. Funkčně je zapojena do okruhu *striatum – palidum – thalamus – mozková kůra*. Zásadní je napojení oblasti na ostatní struktury řídicí motoriku, funkčně se oblast účastní při plánování, představě, zahájení složitých volních pohybů a koordinaci mezi jednotlivými končetinami. Účastní se také při procesech souvisejících s pozorností, při exekutivní kontrole chování a v neposlední řadě také v rámci volní kontroly dýchání. BA 40 tvoří gyrus supramarginalis v oblasti lobulus parietalis inferior. Dominantní funkce oblasti je spojena s komplexními lingvistickými procesy. Účastní se ale také při komplexních motorických úkolech – při plánování pohybu nebo exekutivní kontrole chování. Somatosensoricky pak oblast integruje např. taktilní a propioceptivní informace. Funkce související určitým způsobem s motorikou a somatosensorikou jsou společné pro všechny výše zmíněné oblasti. Sníženou proudovou hustotu oblastí lze vysvětlit v kontextu relaxovaného stavu během maximální volní zádrže dechu, minima pohybu a specifické koncentrace a snahy o eliminaci pozornosti k nejrůznějším podnětům.

BA 24 představuje část gyrus cinguli anterior, funkčně cingulární korovou oblast. Ta spadá pod limbický systém. Kromě účasti při emocích a výše zmíněných funkcích se předpokládá aktivita také v rámci motorické přípravy, plánování, představě a zahájení pohybu a pozornosti v rámci zrakové orientaci v prostoru. BA 31 je součástí gyrus cinguli posterior a spadá také pod limbický systém, narozdíl od výše zmíněné oblasti gyrus cinguli anterior se ale neúčastní při iniciaci pohybu. Oblast je aktivní při učení komplexních motorických dovedností a také v souvislosti s orientací v prostoru.

Významná je také aktivace v souvislosti s paměťovými procesy. Studie (Denton *et al.*, 1999, Peiffer *et al.*, 2007) naznačují, že některé základní nepříjemné pocity, například bolest nebo žízeň, se projeví jako pokles nebo dokonce úplné vymizení aktivity v oblastech souvisejících s percepcí těchto pocitů (oblasti cingulární, amygdaly nebo parahippocampu). Můžeme tedy hypotetizovat, že snížená proudová hustota voxelů v těchto oblastech souvisí kromě s relaxovaným stavem a minimem motorických úkonů také právě s nepříjemnými pocity, které jistě s postupující zádrží dechu přicházely. Pokles aktivity v některých výše zmíněných oblastech, např. BA 3, 4, 6, 31 nebo 40 je popsán také v souvislosti s bolestí. Se zajímavostí je to, že voxely během bolestivého stimulu signifikantně deaktivovány významně převyšují ty, během stimulace se signifikantně aktivovány (Kong *et al.*, 2009).

Aktivita pásma beta je tradičně spojována se stavy zvýšené pozornosti, sensomotorickým chováním, jazykovým zpracováváním nebo paměťovými procesy (Kan *et al.*, 2018). Snížená aktivita ve výše zmíněných Brodmannových zónách během prolongované zádrže dechu v porovnání s klidovým stavem tak může naznačovat nízkou účast výše zmíněných funkcí v tomto stavu. Obecné snížení výkonu v pásmu beta je pak spojováno také s hyperkapnií (Hall *et al.*, 2011), ke které v prolongované zádrži dechu jistě dochází.

V pásmu *gamma* došlo k signifikantní diferencí v aktivaci Brodmannových areí **24, 31, 4, 3, 6, 23, 2 a 40**, proudová hustota byla snížena. Všechny oblasti, včetně BA 23, která funkčně spadá k Brodmannovým areám 29 a výše zmíněné 31, korespondují s obrazem signifikantní difference v aktivitě oproti klidovému stavu napříč pásmy beta–1, beta–2, beta–3 viz výše, tedy i interpretace těchto výsledků bude shodná.

Některé výše zmíněné deaktivované oblasti v pásmech beta a gama, konkrétně BA 9, 23, 32, 4 nebo 24 byly zkoumány také v souvislosti s obstrukční spánkovou apnoí. Chen *et al.* (2017) ve své studii prokázali u pacientů s touto diagnózou signifikantně snížený průtok krve ve výše zmíněných oblastech (společně s BA 9, 38, 18, 47, 44 – všechny tyto oblasti souvisejí s kognitivními funkcemi). Vzhledem k přerušovaným hypoxiím, ke kterým při tomto onemocnění dochází, z toho plynoucích posunů v arteriálním tlaku, oxidativnímu stresu a hemodynamickým změnám obecně, existuje riziko vzniku strukturálních a funkčních deficitů ve vícečetných oblastech mozku.

3.4.2. Diskuse k hypotéze č. 2

H2: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference mezi elektrickou aktivitou mozku hodnocenou pomocí sLORETA programu v jednotlivých oblastech mozku při prodloužené zádrži dechu ve vodě a při klidovém stavu před zádrží dechu při zavřených očích.

Při maximální volní prodloužené zádrži dechu ve vodě došlo v porovnání s klidovým stavem před zádrží k signifikantní diferenci v aktivaci mozkových oblastí ve frekvenčních pásmech *delta*, *theta*, *beta-2* a *beta-3* na hladině statistické významnosti $p \leq 0,01$. Stanovená hypotéza tak byla potvrzena.

V pásmu *delta* došlo k signifikantní diferenci v aktivaci Brodmannových oblastí **8, 6, 3, 4, 21, 22, 43, 20, 1, 44** (a dále 38, 32, 40, 45, 9, 42, 13, 2, 36, 47, 20, 35, 28, 46, a 10). Ve všech oblastech byl zvýšena proudová hustota. BA 8 byla popsána již výše, její funkce souvisí s motorikou, exekutivní kontrolou chování, odpovědí na proprioceptivní stimulaci, také s určitými procesy pozornosti a paměti. Signifikantní diference v aktivitě oproti klidovému stavu byla zaznamenána v také již zmiňované BA 6. Zvýšená aktivita byla také patrná v oblasti BA 4, tedy primárním motorickém kortexu. Vzhledem k absenci pohybů během relaxovaného stavu při zádrži dechu v pronační poloze ve vodě lze zvýšenou proudovou hustotu v této oblasti připsat volní kontrole dechového cyklu, ale také somatosensorické percepci. Ta se může do vědomí dostávat prostřednictvím aktivního relaxovaného stavu celého těla, dále propriocepí prstů nebo rozlišením vibro-taktilních podnětů v podobě vodního prostředí. Aktivace oblastí BA 1, respektive v kontextu s BA 3, byly také již zmíněny výše. Vzhledem k příslušným somatosensorickým funkcím je lze v tomto případě interpretovat také v souvislosti s pobytem ve vodním prostředí – probandi byli při této fázi experimentu téměř úplně ponořeni ve vodě, díky neoprenu umocňujícímu pozitivní vztlak splývali na hladině (viz Obr. č. 10). Díky specifickému působení vody a kontaktu s vodním prostředím lze předpokládat vjemy mechanocepční nebo termocepční a také hlubokou propriocepci. Obdobně lze interpretovat také aktivaci BA 43, subcentrální část kortexu, která s BA 1 a 3 přímo sousedí a je spojována zejména s vibrotaktilní stimulací.

BA 20, 21 a 22 jsou sousedícími oblastmi temporální části kortexu. BA 20, inferiorní část temporální oblasti, gyrus parahippocampalis a fusiformis, zaujímá hlavní funkci ve zpracování a porozumění jazyka (je součástí Wernickeova centra). Další

funkce zahrnují integraci vizuálních podnětů, pozornost k mluvenému slovu nebo pracovní paměť. BA 21, gyrus temporalis medialis, je kromě funkcí jazykových a vizuálních aktivní také v rámci sluchu – zpracování komplexních zvuků. BA 22, gyrus temporalis superior, je také součástí Wernickeova centra a sluchového kortexu. Kromě jazykových funkcí je aktivní právě v rámci zpracování neverbálních komplexních zvuků, jedná se o asociační sluchovou oblast (primární sluchový kortex je reprezentován BA 41 a 42, druhá zmiňovaná oblast se také v pásmu delta aktivovala s vyšší proudovou hustotou). Můžeme tak předpokládat význam funkcí jako je zpracování základních sluchových podnětů, rychlé rozpoznání zvuku nebo jeho intenzity. V průběhu zádrže dechu měli probandi zavřené oči, tzn. vzhledem k absenci vizuálních podnětů lze zvýšenou aktivaci v oblastech BA 20, 21 a 22 přičíst snad sluchovým podnětům. Ty navzdory relaxovanému soustředěnému stavu probandé jistě vnímali, v rámci orientace v prostoru, kontaktu s okolím. Probandi také očekávali smluvené kontrolní pokyny, na které reagovali prostými úkony.

BA 44, gyrus frontalis inferior – pars opercularis, je Broccovým centrem. Kromě spektra jazykových funkcí se oblast účastní také např. při vnitřní řeči, která by mohla být vysvětlením její aktivace během zádrže dechu. Jiné studie naznačují roli oblasti také v rámci intenzivního postupu při řešení a plnění úkolů (Fincham *et al.*, 2002). Forstmann *et al.* (2008) ve své studii sledující procesy řešení úkolů pomocí MRI v průběhu tzv. Simon task popsal roli BA 44 v rámci selektivní inhibice a inhibičních procesů obecně. Vzhledem k potlačování silné potřeby nadechnout se a obnovit respiraci, inhibici odpovědi na brániční kontrakce a vzrůstající pCO₂ během prodloužené apnoe lze aktivaci BA 44 vysvětlit i v tomto kontextu.

V pásmu *theta* byly se signifikantní diferencí aktivovány Brodmannovy zóny **9**, **10** a **8**, ve všech oblastech se zvýšenou proudovou hustotou. BA 9 a 10 jsou součástí prefrontálního kortexu, tvoří gyrus frontalis medialis. Kromě funkcí souvisejících motoricky s exekutivní kontrolou chování, je tato oblast spojována také se zpracováním emocí, rozhodováním v závislosti na emocionálních podnětech nebo sebereflexí. Více studií (George, *et al.*, 1995, Paradiso *et al.*, 2003, Habel *et al.*, 2005, Wager *et al.*, 2009) přináší data o tom, že právě tato část kortexu (spolu s částmi ventrolaterálními – BA 47 a orbitofrontálními – BA 11) je aktivována v souvislosti s negativními emocemi, např. při sledování nepříjemných obrázků nebo při zpracování negativních emocí (Matsukawa *et al.*, 2018). Aktivace prefrontálního kortexu, kromě BA 9 a 10

také BA 8 je patrná ale také při samotném očekávání nepříjemného (Herwig *et al.*, 2007). Vzhledem k nepříjemným pocitům, které s postupující zádrží dechu přicházejí – sílicí kontrakce bránice, přemáhání bazální potřeby nadechnout se či obnovit respiraci, můžeme aktivaci těchto oblastí tímto vysvětlit. Aktivace samotné BA 8 je podrobněji vysvětlena výše.

Aktivita pásma theta je obecně spojována s meditativními stavy, fantazií, intucí, denním sněním nebo internalizovanou pozorností (Aftanas, Golocheikine, 2017, Modestino *et al.*, 2016). Hebert a Lehmann (1977) prokázali vysoké theta výboje ve frontálních také oblastech během jogínských cvičení (Faber, 2001). Během meditací byla také v různých studiích prokázána zvýšená aktivita zmíněných BA 9 a 10 (a dalších oblastí prefrontální kůry). U osob praktikujících meditaci pravidelně a dlouhodobě navíc byly tyto oblasti kortexu silnější (Lazar *et al.*, 2005, Modestino *et al.*, 2016).

Frekvenční pásmo *beta-2* bylo se signifikantní diferencí aktivováno v Brodmannových oblastech **4, 24, 31, 3, 6, 23, 2, 40, 7 a 1** (a dále 5, 32, 8 a 9), pásmo *beta-3* pak v oblastech **23, 24, 31, 3, 33, 2, 4, 40 a 6**. Shodně se tak v *obou pásmech beta* aktivovaly zóny **4, 24, 31, 3, 6, 23, 2, 40**. V pásmu *beta-2* navíc zóny 7 a 1, ve frekvenci *beta-3* pak zóna 33. Ve všech oblastech došlo ke snížení proudové hustoty.

Oblasti se sníženou proudovou hustotou napříč pásmy beta při porovnání stavu při prolongované zádrži dechu ve vodě oproti klidovému stavu před zádrží korespondují (až na výjimky) s oblastmi se sníženou aktivitou v pásmech beta při porovnání prolongované zádrže dechu na suchu oproti klidovému stavu. I interpretace zde tak bude obdobná a bude se týkat zj. somatosensorických a motorických funkcí, které se všemi oblastmi dominantně prolínají. Vzhledem k relaxovanému stavu v pronační poloze na hladině s minimem pohybu lze sníženou proudovou hustotu oblastí v porovnání s klidovým stavem vleže na zádech vysvětlit v kontextu absence pohybu a snaze redukovat pozornost k somatosensorickým podnětům. Dále došlo k aktivaci BA 23, která funkčně spadá k BA 31 (a BA 29), tedy gyrus cingularis posterior. Funkčně podobná je pak další oblast se signifikantní diferencí – BA 33. Snížená aktivita se týkala také BA 7, v části lobulus parietalis superior, jedná se o sekundární sensorimotorický kortex a také sekundární asociační sensorimotorický kortex. Oblast opět zahrnuje motorické funkce jako je motorická představivost nebo bimanuální

manipulace, ale také percepci bolesti, taktilní lokalizaci, sjednocení povrchových a hlubokých vjemů či zpracování emocí. I sníženou proudovou hustotu v této oblasti můžeme interpretovat v kontextu snahy o relaxovaný stav a internalizaci pozornosti do sebe a na výkon.

Na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ se prokázala frontální aktivita mozku ve frekvenčním pásmu alfa-1 a alfa-2. Ta byla v minulosti zjištěna u jogínů při relaxaci a tzv. stavu samadhi, stavu nejvyššího vědomí (Das, Gastaut, 1957, Anand *et al.*, 1961, Faber, 2001). Studie poslední doby také dávají zvýšenou aktivitu alfa ve frontálních částech mozku do souvislosti s tzv. flow stavu. Teorii flow poprvé představil psycholog Mihaly Csikszentmihalyi (1975), který flow popisuje jako stav totálního soustředění, kontroly, ponoření se do činnosti, s pozorností zúženou na aktuální činnost, při které jedinci ztrácí pojem o čase a vědomí sebe sama. Je to stav požitku z činnosti, který často vede k s lehkostí využití aktuální možné kapacity jedince (Mladenović *et al.*, 2017). Zvýšení aktivity alfa frontálně při ponoření se do řešení aritmetických úloh přiměřené složitosti prokázali ve své studii také Katahira *et al.* (2018). Neurofyziologická podstata flow stavu není v současné době podpořena existencí mnoha studií, data získávaná během experimentů navíc přinášejí různorodé výsledky. Pro objasnění flow je tak třeba dalších výzkumů (Metin *et al.*, 2017, Cheron, 2016).

3.4.3. Diskuse k hypotéze č. 3

H3: Předpokládám, že je rozdíl mezi elektrickou aktivitou mozku hodnocenou pomocí sLORETA programu v jednotlivých oblastech mozku při prolouvaném zádrží dechu ve vodě se zavřenými očima v porovnání s prolouvanou zádrží dechu na suchu se zavřenými očima.

Při maximální volní prolouvaném zádrží dechu ve vodě došlo v porovnání s maximální volní prolouvanou zádrží dechu na suchu k signifikantní diferencii v aktivaci mozkových oblastí ve frekvenčních pásmech *delta* a *theta* $p \leq 0,10$. V případě pásma *delta* pak i $p \leq 0,01$. Stanovená hypotéza tak byla potvrzena.

Frekvenční pásmo *delta* bylo se signifikantní diferencí aktivováno v Brodmannových oblastech **1, 3, 6, 4, 8, 9, 2, 40, 32, 46** (a dále 45, 24, 44 a 13). Ve všech oblastech došlo ke zvýšení proudové hustoty.

BA 1, 2 a 3, postcentrální gyrus, jsou primárním somatosensorickým kortexem. Dominantní je tak účast oblastí při somatosensorické percepci – lokalizaci dotyku, vibrací nebo teploty, dále hluboké propiocepci nebo propiocepce prstů. Účastní se také při očekávání dotyku nebo nepříjemných pocitů. Dále volních pohybech ruky, jazyka nebo polykání. Zvýšená aktivita v těchto oblastech během zádrže dechu ve vodě oproti zádržím dechu na suchu lze vysvětlit zvýšenou somatosenzorickou percepcí při pobytu ve vodním prostředí. BA 4, oblast precentrálního gyru, je primárním motorickým kortexem. Kromě funkcí spojených s motorikou se účastní somatosensoricky podobně jako BA 1, 2 a 3 a také při volní kontrole dýchání. Ta může být při zádrži dechu ve vodě obličejem dolů v porovnání se zádržím dechu na suchu ještě intenzivnější. Aktivaci korových oblastí zodpovědných za motorické a somatosensorické funkce při ponoření do vody (tedy právě výše zmíněné BA 1, 2, 3 a 4) potvrzuje také studie Sato *et al.* (2012). I při relaxované poloze na hladině pak k aktivaci korových motorických buněk dochází vzhledem ke specifickému působení vody na tělo, kdy jsou svaly i klouby neustále vyváděny ze stabilní statické polohy (Sato *et al.*, 2014).

BA 6 je premotorickou korovou oblastí s lokalizací v gyrus precentralis. Účastní se také při volní kontrole dýchání a jak již bylo zmíněno výše, její funkce byla prokázána také při meditativních technikách zahrnujících relaxaci celého těla, “rozpuštění se”. Lze usuzovat, že při zádrži dechu ve vodě dosahovali freediveři více relaxovaného stavu, který jim umožnil lepší soustředěnost na výkon. Vodní prostředí a specifika pohybu v něm tak mohou mít pozitivní vliv ve snaze dosáhnout relaxovaného stavu, což ostatně odpovídá i tomu, co říkají sami nádechoví potapěči. Statické apnoe jsou při pobytu ve vodě nesrovnatelně příjemnější, s lepší relaxací a tím pádem i výkony.

BA 40 utváří gyrus supramarginalis v oblasti lobulus parietalis inferior. Oblast je spojena zejména s komplexními lingvistickými procesy, ale také s plánováním pohybu a exekutivní kontrolou chování. Somatosensoricky oblast integruje taktilní a propioceptivní informace. BA 8 je částí prefrontálního kortexu – zahrnuje laterální a mediální část suplementární motorické oblasti. Funkce týkající se motoriky a somatosensorické percepcie jsou obdobné jako u BA 40. BA 8 se ale aktivuje také při

samotném očekávání nepříjemného. Můžeme hypotetizovat, že vzhledem k zpravidla delšímu trvání zádrže dechu ve vodě oproti té na suchu, byly i tyto pocity s postupně sílícími kontrakcemi bránice silnější. Podobně si můžeme vysvětlit i aktivaci BA 9, která je součástí prefrontálního kortexu a tvoří gyrus frontalis medialis. Oblast je spojována se zpracováním emocí, sebereflexí a rozhodováním v závislosti na emocích. Aktivace se předpokládá v souvislosti se zejména negativními emocemi. Podobné funkce spojené s emocemi a exekutivní kontrolou chování mají také BA 32 a BA 46. BA 32 spadá funkčně pod limbický systém, lokalizována je v anteriorní části cingulární korové oblasti. BA 46 je lokalizovaná v gyrus frontalis medialis a jedná se o dorsolaterální prefrontální kortex.

Frekvenční pásmo *theta* prokázalo signifikantní diferenci v aktivaci Brodmannových oblastí **8** a **9**, v obou případech se zvýšenou proudovou hustotou voxelů.

Nárůst aktivace těchto oblastí při porovnávání stavů prolongované zádrže dechu na suchu a ve vodě se zavřenými očima v pásmu theta odpovídá oblastem se zvýšenou proudovou hustotou v témže frekvenčním pásmu při porovnání zádrže dechu ve vodě se zavřenými očima oproti klidovému stavu před zádrží se zavřenými očima. Shodně se při zádržích dechu ve vodě aktivovaly oblasti prefrontálního kortexu BA 9, gyrus frontalis medialis a již výše zmíněná BA 8. Dominantní jsou tedy opět funkce spojené se zejména negativními emocemi, očekáváním nepříjemného, rozhodováním v závislosti na emocích nebo sebereflexí. Nárůst aktivity těchto oblastí lze opět vysvětlit s postupující zádrží dechu a tím pádem sílícími kontrakcemi bránice i nutkáním nadechnout se. Výraznější aktivace oblastí spojených s emocemi můžeme při zádržích dechu ve vodě dát do souvislosti ještě se samotným pobytem ve vodním prostředí. Ten je pro zkušené potapěče významným faktorem působícím na psychiku. Samotný nárůst aktivace v pásmu theta je pak, jak již bylo zmíněno výše, spojován se stavy meditace, relaxace, denním sněním nebo internalizovanou pozorností.

4. ZÁVĚR

Cílem práce bylo objasnit, zda při prolongovaných zádržích dechu prováděných na suchu i ve vodě dochází ke změně elektrické aktivity mozku. Zdrojová aktivita mozku byla během zádrží dechu snímána pomocí povrchového EEG a následně v programu sLORETA porovnávána se zdrojovou aktivitou mozku měřenou v klidovém stavu před zádržemi dechu. Srovnávány byly také stavy při prolongované zádržci dechu ve vodě oproti prolongované zádržci dechu na suchu. Zkoumány byly vždy stavy se zavřenýma očima.

Sledování mozkové aktivity během maximálních volních prolongovaných zádrží dechu u nádechových potapěčů může přinést nové informace o fungování lidského organismu za extrémních podmínek. Předmětem této práce bylo získání poznatků o řídicích procesech CNS v podobě konkrétních proudových hustot v odlišných oblastech mozku při soustředěné relaxaci a pozornosti k výkonu během statické apnoe. Limitací experimentu je malý soubor probandů, ve kterém byli zastoupeni pouze muži. Další limitací může být omezení výpočtu zdrojové aktivity pouze na korové oblasti mozku.

Vyhodnocením skalpových EEG záznamů a následným statistickým zpracováním a zobrazením v sLORETA programu byly odhaleny statisticky významné změny v proudové hustotě určitých oblastí mozku napříč základními frekvenčními pásmy. U všech tří porovnávaných párových skupin byly nalezeny statisticky významné difference. Při porovnávání prolongované zádrže dechu na suchu a ve vodě vůči klidovému stavu před zádržci došlo shodně u obou stavů ke snížení proudové hustoty v pásmu beta. Jednalo se o snížení aktivity zejména v korových oblastech motorických a premotorických, dále somatosensorických a také v limbickém systému. Podobné změny ve smyslu snížené proudové hustoty byly patrné také v rámci pásma gama, ale pouze u zádrže dechu na suchu. U obou porovnávaných stavů byla prokázána zvýšená proudová hustota v pásmu delta. Při zádržci dechu na suchu se aktivovaly oblasti zodpovědné za somatosensorické funkce a limbický systém, dále oblasti funkčně spojené s volní kontrolou dýchání nebo proprioceptivní stimulací a hlubokou viscerální percepcí. Při zádržci dechu ve vodě se tyto aktivovaly také. Kromě nich došlo dále k aktivaci oblastí souvisejících se zpracováním zvukových podnětů, pozorností, inhibičními procesy nebo vnitřní řečí. Pouze při zádržci dechu ve vodě byla ve

frekvenčnímu pásmu theta zvýšena aktivita v oblastech spojených se zpracováním negativních emocí, propriocepcí, předvídaním bolesti nebo motorickou exekutivní kontrolou chování.

Na nižší statistické významnosti se při porovnání prolongované zádrže dechu ve vodě vůči klidovému stavu před zádrží ukazuje nárůst aktivity v alfa frekvenčním pásmu. Tato aktivita byla lokalizována ve frontálních oblastech kortexu a můžeme tak usuzovat souvislost s tzv. flow stavy.

Oblasti mozku (potažmo frekvenční pásma) se signifikantní diferencí zjištěné při porovnání prolongované zádrže dechu ve vodě oproti prolongované zádrži dechu na suchu ukazují zvýšenou aktivitu v pásmech delta a na nižší statistické významnosti také theta. Při zádržích dechu ve vodě se ve vyšší míře aktivovaly oblasti zodpovědné za somatosensorickou perцепci a také emoce a jejich zpracování, sebereflexi nebo exekutivní kontrolu chování. Nárůst samotné aktivity v pásmu theta může souviset s relaxovaným až meditativním stavem při zádrži dechu a internalizovanou pozorností.

Data získaná z experimentu této diplomové práce jsou do jisté míry unikátní, zejména co se týče záznamu elektrické aktivity mozku při zádrži dechu ve vodě. Výsledky práce prokazují statisticky významnou aktivitu v určitých částech kortexu, které se účastní při regulaci dechového cyklu a během specifického stavu volní prolongované zádrže dechu. Vzhledem ke zjištěným souvislostem mohou být výsledky nápomocné při porozumění extrémní fyziologii lidského organismu nebo v rámci freedivingu jako takového. Relaxace, která významně provází celý průběh zádrže dechu, pak může být prvkem freedivingu účinně využitelným ve fyzioterapii, ať už se jedná o relaxaci ve vodě či mimo ni.

SEZNAM ZDROJŮ

1. AFTANAS, L. I. a S. A. GOLOCHEIKINE. Human anterior and frontal midline theta and lower alpha reflect emotionally positive state and internalized attention: high-resolution EEG investigation of meditation. *NEUROSCIENCE LETTERS*[online]. 2001, 310(1), 57-60 [cit. 2019-06-14]. ISSN 03043940. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11524157>.
2. AGOSTONI, Emilio. Diaphragm activity during breath holding: factors related to its onset. *Journal of Applied Physiology* [online]. 1963, 18(1), 30-36 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.1152/jappl.1963.18.1.30. ISSN 87507587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappl.1963.18.1.30>.
3. *AIDA: Worldwide freediving community* [online]. Zürich SWITZERLAND: AIDA - International, 2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.aidainternational.org/>.
4. ANAND, B.K., G.S. CHHINA a Baldev SINGH. Some aspects of electroencephalographic studies in Yogis. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* [online]. 1961, 13(3), 452-456 [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.1016/0013-4694(61)90015-3. ISSN 00134694. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0013469461900153>.
5. ANDERSSON, Johan P. A., Mats H. LINÉR a Henrik JÖNSSON. Increased serum levels of the brain damage marker S100B after apnea in trained breath-hold divers: a study including respiratory and cardiovascular observations. *Journal of Applied Physiology* [online]. 2009, 107(3), 809-815 [cit. 2019-03-02]. DOI: 10.1152/japplphysiol.91434.2008. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/japplphysiol.91434.2008>
6. ANDERSSON, Johan P. A., Mats H. LINÉR, Elisabeth RÜNOW a Erika K. A. SCHAGATAY. Diving response and arterial oxygen saturation during apnea and exercise in breath-hold divers. *Journal of Applied Physiology* [online]. 2002, 93(3), 882-886 [cit. 2019-01-3]. DOI: 10.1152/japplphysiol.00863.2001. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/japplphysiol.00863.2001>.
7. BAIN, Anthony R. *Physiology of extreme breath-holding*. Ottawa, 2016. The University of British Columbia. Vedoucí práce Philip Ainslie.
8. BAIN, Anthony R., Ivan DRVIS, Zeljko DUJIC, David B. MACLEOD a Philip N. AINSLIE. Physiology of static breath holding in elite apneists. *Experimental*

- Physiology [online]. 2018, 103(5), 635-651 [cit. 2019-02-08]. DOI: 10.1113/EP086269. ISSN 09580670. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1113/EP086269>.
9. BARTŮŇKOVÁ, Staša a Zdeněk SCHUSTER. Co víme a nevíme o diving reflexu. *Medicina sportiva Bohemica & Slovaca*. 2015, 24(1), 2-10. ISSN 1210-5481.
 10. BARTŮŇKOVÁ, Staša. *Fyziologie člověka a tělesných cvičení: učební texty pro studenty fyzioterapie a studia Tělesná a pracovní výchova zdravotně postižených*. 2. vyd. Praha: Karolinum, 2010. ISBN 978-80-246-1817-3.
 11. BELL, Daniel J. a Frank GAILLARD. Brodmann Areas. Radiopaedia [online]. 2015 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: <https://radiopaedia.org/articles/brodmann-areas>.
 12. BREIVIK, Gunnar. Trends in adventure sports in a post-modern society. *Sport in Society* [online]. 2010, 13(2), 260-273 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.1080/17430430903522970. ISSN 1743-0437. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17430430903522970>.
 13. BUŠEK, Petr a David KEMLINK. The Influence of the Respiratory Cycle on the EEG. *Physiological Research* [online]. 2005, 3(54), 327-333 [cit. 2019-03-23]. ISSN 0862-8408. Dostupné z: http://www.biomed.cas.cz/physiolres/pdf/54/54_327.pdf?origin%3Dpublication_detail.
 14. CANNON, R. L. (2012) *Low resolution brain electromagnetic tomography (LORETA). Basic concepts and clinical applications*. South Staples St., Texas: BMED Press.
 15. CASPERS, C., S. CLEVELAND a J. D. SCHIPKE. Diving reflex: can the time course of heart rate reduction be quantified? [online]. 2011, 21(1), 18-31 [cit. 2019-02-01]. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2010.01246.x. ISSN 09057188. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0838.2010.01246.x>.
 16. CLARKE, Edwin, Kenneth DEWHURST a Michael J. AMINOFF. An illustrated history of brain function: Imaging the brain from antiquity to the present [online]. 2nd ed., rev. and enl. San Francisco: Norman Pub., 1996 [cit. 2019-02-01]. ISBN 978-0-930405-65-6. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=yz8YRf2sQDEC&pg=PA123&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
 17. Cortical Functions. Trans Cranial Technologies [online]. Wanchai, Hong Kong:

- Trans Cranial Technologies ldt., 2012 [cit. 2019-02-01]. Dostupné z: https://thebrainstimulator.net/docs/external/Trans_Cranial_Technologies-cortical_functions_ref_v1_0.pdf.
18. CROSS, Troy J., Justin J. KAVANAGH, Toni BRESKOVIC, Petra ZUBIN MASLOV, Mihajlo LOJPUR, Bruce D. JOHNSON, Zeljko DUJIC a Kelvin Kian Loong WONG. The Effects of Involuntary Respiratory Contractions on Cerebral Blood Flow during Maximal Apnoea in Trained Divers. PLoS ONE [online]. 2013, 8(6) [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1371/journal.pone.0066950. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0066950>
 19. CSIKSZENTMIHALYI, Mihaly. *Beyond Boredom and Anxiety*. San Francisco: Jossey-Bass Publishers, 1975. [online]. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: http://psy2.ucsd.edu/~nchristenfeld/Happiness_Readings_files/Class%207%20-%20Csikszentmihalyi%201975.pdf.
 20. ČIHÁK, R. *Anatomie 3*, vyd. 3. Praha: GRADA, 2016. ISBN 978-80-247-5636-3.
 21. DAS, A. A. a H. Gastaut. Variations de l'activité électrique du cerveau, du coeur et des muscles squelettiques au cours de la méditation et de l'extase yogique. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1957, Suppl. 6: 211–219.
 22. DEJOURS, P. Hazards of hypoxia during diving. *Physiology of breath-holding and the Ama of Japan* [online]. Washington D. C.: National Research Council, 1965, 183-193 [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: <https://1url.cz/2MqFt>.
 23. DENTON, D., R. SHADE, F. ZAMARIPPA, G. EGAN, J. BLAIR-WEST, M. MCKINLEY, J. LANCASTER a P. FOX. Neuroimaging of genesis and satiation of thirst and an interoceptor-driven theory of origins of primary consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 1999, 96(9), 5304-5309 [cit. 2019-05-25]. DOI: 10.1073/pnas.96.9.5304. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.96.9.5304>
 24. DUJIC, Zeljko a Toni BRESKOVIC. Impact of Breath Holding on Cardiovascular Respiratory and Cerebrovascular Health. *Sports Medicine* [online]. 2012, 42(6), 459-472 [cit. 2019-02-07]. DOI: 10.2165/11599260-000000000-00000. ISSN 0112-1642. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.2165/11599260-000000000-00000>.
 25. DUJIC, Zeljko, Lovro UGLEŠIĆ, Toni BRESKOVIC, Zoran VALIĆ, Karsten HEUSSER, Jasna MARINOVIC, Marko LJUBKOVIĆ a Ivan PALADA. Involuntary breathing movements improve cerebral oxygenation during apnea struggle phase in elite divers. *Journal of Applied Physiology* [online]. 2009, 107(6),

- 1840-1846 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1152/jappphysiol.00334.2009. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappphysiol.00334.2009>
26. ESPERSEN, Kurt, Hans FRANDSEN, Torben LORENTZEN, Inge-Lis KANSTRUP a Niels J. CHRISTENSEN. The human spleen as an erythrocyte reservoir in diving-related interventions. *Journal of Applied Physiology* [online]. 2002, 92(5), 2071-2079 [cit. 2019-02-05]. DOI: 10.1152/jappphysiol.00055.2001. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappphysiol.00055.2001>.
27. FABER J, TUHÁČEK M, MĚŠŤAN J: Synchronization of EEG activity with respiration. (in Czech) *Československá Neurologie* 33(6): 296-301, 1970. [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/17691209_Synchronization_of_EEG_activity_and_respiration.
28. FABER, Josef. *Elektroencefalografie a psychofyziologie*. Praha: ISV, 2001. Lékařství. ISBN 80-858-6674-9.
29. FABER, Josef. *Elektroencefalografie*. Praha : Univerzita Karlova, 1992. 131 s.: obr. ISBN: 80-7066-630-7.
30. FINCHAM, J. M., C. S. CARTER, V. VAN VEEN, V. A. STENGER a J. R. ANDERSON. Neural mechanisms of planning: A computational analysis using event-related fMRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2002, 99(5), 3346-3351 [cit. 2019-05-28]. DOI: 10.1073/pnas.052703399. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.052703399>.
31. FORSTMANN, Birte U., Wery P. M. VAN DEN WILDENBERG a K. Richard RIDDERINKHOF. Neural Mechanisms, Temporal Dynamics, and Individual Differences in Interference Control. *Journal of Cognitive Neuroscience* [online]. 2008, 20(10), 1854-1865 [cit. 2019-05-28]. DOI: 10.1162/jocn.2008.20122. ISSN 0898-929X. Dostupné z: <http://www.mitpressjournals.org/doi/10.1162/jocn.2008.20122>.
32. FOSTER, G. E. a A. W. SHEEL. The human diving response, its function, and its control. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* [online]. 2005, 15(1), 3-12 [cit. 2019-01-31]. DOI: 10.1111/j.1600-0838.2005.00440.x. ISSN 0905-7188. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0838.2005.00440.x>.

33. GEORGE, M. S. *et al.* Brain activity during transient sadness and happiness in healthy women. *Am. J. Psychiatry* [online]. 1995, 152, 341–351 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://ajp.psychiatryonline.org/doi/abs/10.1176/ajp.152.4.639-a>.
34. GIBSON, Gary E., William PULSINELLI, John P. BLASS a Thomas E. DUFFY. Brain dysfunction in mild to moderate hypoxia. *The American Journal of Medicine* [online]. 1981, 70(6), 1247-1254 [cit. 2019-02-07]. DOI: 10.1016/0002-9343(81)90834-2. ISSN 00029343. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0002934381908342>.
35. Godek D, Freeman A. M. Physiology, Diving Reflex. *StatPearls* [online]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing: 2019. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538245/>.
36. GOKSÖR, E., L. ROSENGREN a G. WENNERGREN. Bradycardic response during submersion in infant swimming. *Acta Paediatrica* [online]. 2002, 91(3), 307-312 [cit. 2018-12-10]. DOI: 10.1111/j.1651-2227.2002.tb01720.x. ISSN 08035253. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1651-2227.2002.tb01720.x>.
37. GOODEN, Brett A. Mechanism of the human diving response. *Integrative Physiological and Behavioral Science* [online]. 1994, 29(1), 6-16 [cit. 2019-01-30]. DOI: 10.1007/BF02691277. ISSN 1053-881X. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02691277>.
38. GREN, Magnus, Pashtun SHAHIM, Ronald LAUTNER, David H. WILSON, Ulf ANDREASSON, Niklas NORGREN, Kaj BLENNOW a Henrik ZETTERBERG. Blood biomarkers indicate mild neuroaxonal injury and increased amyloid β production after transient hypoxia during breath-hold diving. *Brain Injury* [online]. 2016, 30(10), 1226-1230 [cit. 2019-03-19]. DOI: 10.1080/02699052.2016.1179792. ISSN 0269-9052. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02699052.2016.1179792>
39. GUYENET, Patrice G. a Douglas A. BAYLISS. Neural Control of Breathing and CO₂ Homeostasis. *Neuron* [online]. 2015, 87(5), 946-961 [cit. 2018-12-11]. DOI: 10.1016/j.neuron.2015.08.001. ISSN 08966273. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0896627315006765>.
40. HABEL, U., KLEIN, M., KELLERMANN, T., SHAH, N. J. & SCHNEIDER, F. Same or different? Neural correlates of happy and sad mood in healthy males. *Neuroimage* [online]. 2005, 26, 206–214 [cit. 2019-02-07]. Dostupné

- z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811905000406?via%3Dihub>.
41. HALL, Emma L., Ian D. DRIVER, Paula L. CROAL, Susan T. FRANCIS, Penny A. GOWLAND, Peter G. MORRIS a Matthew J. BROOKES. The effect of hypercapnia on resting and stimulus induced MEG signals. *NeuroImage* [online]. 2011, 58(4), 1034-1043 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.06.073. ISSN 10538119. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053811911007191>
42. HALPERN, Pinchas, Miri Y. NEUFELD, Kobi SADE, Aviel SILBINGER, Oded SZOLD, Natan M. BORNSTEIN a Patrick SORKINE. Middle cerebral artery flow velocity decreases and electroencephalogram (EEG) changes occur as acute hypercapnia reverses. *Intensive Care Medicine* [online]. 2003, 29(10), 1650-1655 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1007/s00134-003-1917-6. ISSN 0342-4642. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00134-003-1917-6>
43. HANSLMAYR, S., W. KLIMESCH, P. SAUSENG, W. GRUBER, M. DOPPELMAYR, R. FREUNBERGER, T. PECHERSTORFER a N. BIRBAUMER. Alpha Phase Reset Contributes to the Generation of ERPs. *Cerebral Cortex* [online]. 2006, 17(1), 1-8 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.1093/cercor/bhj129. ISSN 1047-3211. Dostupné z: <https://academic.oup.com/cercor/article-lookup/doi/10.1093/cercor/bhj129>.
44. HAYES, H. B., A. JAYARAMAN, M. HERRMANN, G. S. MITCHELL, W. Z. RYMER a R. D. TRUMBOWER. Daily intermittent hypoxia enhances walking after chronic spinal cord injury: A randomized trial. *Neurology* [online]. 2014, 82(2), 104-113 [cit. 2018-02-27]. DOI: 10.1212/01.WNL.0000437416.34298.43. ISSN 0028-3878. Dostupné z: <http://www.neurology.org/cgi/doi/10.1212/01.WNL.0000437416.34298.43>
45. HEBERT, R. a D. LEHMANN. Theta bursts: An EEG pattern in normal subjects practising the transcendental meditation technique. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* [online]. 1977, 42(3), 397-405 [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.1016/0013-4694(77)90176-6. ISSN 00134694. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0013469477901766>.
46. HENTSCH, U. a H.-V. ULMER. Trainability of Underwater Breath-Holding Time. *International Journal of Sports Medicine* [online]. 1984, 05(06), 343-347 [cit.

- 2019-01-12]. DOI: 10.1055/s-2008-1025930. ISSN 0172-4622. Dostupné z: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-2008-1025930>.
47. HERWIG, Uwe, Birgit ABLER, Henrik WALTER a Susanne ERK. Expecting unpleasant stimuli – An fMRI study. *Psychiatry Research: Neuroimaging* [online]. 2007, 154(1), 1-12 [cit. 2019-05-25]. DOI: 10.1016/j.psychres.2006.02.007. ISSN 09254927. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925492706001223>.
48. HIEBERT, Sara M. a Elliot BURCH. Simulated Human Diving And Heart Rate: Making The Most Of The Diving Response As a Laboratory Exercise. *Advances in Physiology Education* [online]. 2003, 27(3), 130-145 [cit. 2019-02-01]. DOI: 10.1152/advan.00045.2002. ISSN 1043-4046. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/advan.00045.2002>.
49. HOVORKA, Jiří, Tomáš NEŽÁDAL, Erik HERMAN a Ján PRAŠKO. *Klinická elektroencefalografie: základy klasifikace a interpretace*. Praha: Maxdorf, 2003. ISBN 80-734-5001-1.
50. CHEN, Hsiu-Ling, Hsin-Ching LIN, Cheng-Hsien LU, et al. Systemic inflammation and alterations to cerebral blood flow in obstructive sleep apnea. *Journal of Sleep Research*[online]. 2017, 26(6), 789-798 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.1111/jsr.12553. ISSN 09621105. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/jsr.12553>.
51. CHERON, Guy. How to Measure the Psychological “Flow”? A Neuroscience Perspective. *Frontiers in Psychology*[online]. 2016, 7 [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.3389/fpsyg.2016.01823. ISSN 1664-1078. Dostupné z: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2016.01823/full>.
52. JOBERT, Marc, Frederick J. WILSON, Gé S.F. RUIGT, Martin BRUNOVSKY, Leslie S. PRICHEP a Wilhelmus H.I.M. DRINKENBURG. Guidelines for the Recording and Evaluation of Pharmac-EEG Data in Man: The International Pharmac-EEG Society (IPEG). *Neuropsychobiology* [online]. 2012, 66(4), 201-220 [cit. 2019-06-13]. DOI: 10.1159/000343478. ISSN 0302-282X. Dostupné z: <https://www.karger.com/Article/FullText/343478>
53. KAN, D. P. X., P. E. CROARKIN, C. K. PHANG a P. F. LEE. EEG Differences Between Eyes-Closed and Eyes-Open Conditions at the Resting Stage for Euthymic Participants. *Neurophysiology* [online]. 2017, 49(6), 432-440 [cit. 2019-05-26]. DOI: 10.1007/s11062-018-9706-6. ISSN 0090-2977. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11062-018-9706-6>.

54. KATAHIRA, Kenji, Yoichi YAMAZAKI, Chiaki YAMAOKA, Hiroaki OZAKI, Sayaka NAKAGAWA a Noriko NAGATA. EEG Correlates of the Flow State: A Combination of Increased Frontal Theta and Moderate Frontocentral Alpha Rhythm in the Mental Arithmetic Task. *Frontiers in Psychology* [online]. 2018, 9 [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.3389/fpsyg.2018.00300. ISSN 1664-1078. Dostupné z: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2018.00300/full>.
55. KOBAYASI, Syoiti a Tokuo OGAWA. Effect of water temperature on bradycardia during nonapneic facial immersion in man. *Japanese Journal of Physiology* [online]. 1973, (23), 613-624 [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjphysiol1950/23/6/23_6_613/_pdf.
56. KONG, Jian, Marco L. LOGGIA, Carolyn ZYLONEY, Peichi TU, Peter LAVIOLETTE a Randy L. GOLLUB. Exploring the brain in pain: Activations, deactivations and their relation. *Pain* [online]. 2010, 148(2), 257-267 [cit. 2019-05-26]. DOI: 10.1016/j.pain.2009.11.008. ISSN 0304-3959.
57. KUMAR, Ganesh K. Hypoxia. 3. Hypoxia and neurotransmitter synthesis. *American Journal of Physiology-Cell Physiology* [online]. 2011, 300(4), C743-C751 [cit. 2019-02-01]. DOI: 10.1152/ajpcell.00019.2011. ISSN 0363-6143. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/ajpcell.00019.2011>
58. LAURINO, Marco. Mind-body relationships in elite apnea divers during breath holding: a study of autonomic responses to acute hypoxemia. *Frontiers in Neuroengineering* [online]. 2012, 5 [cit. 2018-12-4]. DOI: 10.3389/fneng.2012.00004. ISSN 16626443. Dostupné z: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fneng.2012.00004/abstract>.
59. LAVIN, C., a spol. The anterior cingulate cortex: an integrative hub for human socially-driven interactions. *Front Neurosci* [online]. 2013, roč. 7, č. 64 [cit. 2019-01-27]. DOI: 10.3389/fnins.2013.00064. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3647221/>.
60. LEHMANN, Dietrich, P.L FABER, Peter ACHERMANN, Daniel JEANMONOD, Lorena R.R GIANOTTI a Diego PIZZAGALLI. Brain sources of EEG gamma frequency during volitionally meditation-induced, altered states of consciousness, and experience of the self. *Psychiatry Research: Neuroimaging* [online]. 2001, 108(2), 111-121 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.1016/S0925-4927(01)00116-0. ISSN 09254927. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925492701001160>

61. LEONARD, Erin M., Shaima SALMAN a Colin A. NURSE. Sensory Processing and Integration at the Carotid Body Tripartite Synapse: Neurotransmitter Functions and Effects of Chronic Hypoxia. *Frontiers in Physiology* [online]. 2018, 9 [cit. 2019-02-01]. DOI: 10.3389/fphys.2018.00225. ISSN 1664-042X. Dostupné z: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2018.00225/full>
62. LIN, Y. C., D. A. LALLY, T. O. MOORE a S. K. HONG. Physiological and conventional breath-hold breaking points. *Journal of Applied Physiology* [online]. 1974, 37(3), 291-296 [cit. 2018-12-11]. DOI: 10.1152/jappl.1974.37.3.291. ISSN 87507587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappl.1974.37.3.291>.
63. LIN, Yu-Chong. Breath-hold Diving in Terrestrial Mammals. *Breath-hold Diving* [online]. Honolulu, Hawaii: University of Hawaii - Department of Physiology, 270-307 [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: <https://1url.cz/2MqFt>.
64. LINDHOLM, Peter a Claes E. G. LUNDGREN. Alveolar gas composition before and after maximal breath-holds in competitive divers. *Undersea and Hyperbaric Medical Society*[online]. 2006, 33(6), 463-467 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/2328/870be52cf559db4cd9f0c1192d7ccf6ba9c4.pdf>.
65. LINDHOLM, Peter a Claes Eg LUNDGREN. The physiology and pathophysiology of human breath-hold diving: The body in scuba diving. *Journal of Applied Physiology* [online]. 2009, 106(1), 284-292 [cit. 2018-12-13]. DOI: 10.1152/japplphysiol.90991.2009. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/japplphysiol.90991.2008>.
66. LINDHOLM, Peter, Patrik SUNDBLAD a Dag LINNARSSON. Oxygen-conserving effects of apnea in exercising men. *Journal of Applied Physiology* [online]. 1999, 87(6), 2122-2127 [cit. 2019-01-31]. DOI: 10.1152/jappl.1999.87.6.2122. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappl.1999.87.6.2122>.
67. LINDHOLM, Peter. Loss of Motor Control and/or Loss of Consciousness during Breath-Hold Competitions. *International Journal of Sports Medicine* [online]. 2007, 28(4), 295-299 [cit. 2019-02-07]. DOI: 10.1055/s-2006-924361. ISSN 0172-4622. Dostupné z: <http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-2006-924361>.

68. LIOTTI, M., S. BRANNAN, G. EGAN, et al. Brain responses associated with consciousness of breathlessness (air hunger). *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2001, 98(4), 2035-2040 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1073/pnas.98.4.2035. ISSN 0027-8424. Dostupné z: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.98.4.2035>
69. LYSEBETH, André van. *Pránájama: technika dechu*. Praha: Argo, 1999. ISBN 80-720-3172-4.
70. MACKENZIE, Richard, Neil MAXWELL, Paul CASTLE, Gary BRICKLEY a Peter WATT. Acute hypoxia and exercise improve insulin sensitivity (SI2*) in individuals with type 2 diabetes. *Diabetes/Metabolism Research and Reviews* [online]. 2011, 27(1), 94-101 [cit. 2018-02-27]. DOI: 10.1002/dmrr.1156. ISSN 15207552. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/dmrr.1156>.
71. MALSHE, PrakashChintamani. Nisshesha rechaka pranayama offers benefits through brief intermittent hypoxia. *AYU (An International Quarterly Journal of Research in Ayurveda)* [online]. 2011, 32(4) [cit. 2019-06-13]. DOI: 10.4103/0974-8520.96114. ISSN 0974-8520. Dostupné z: <http://www.ayujournal.org/text.asp?2011/32/4/451/96114>.
72. MARIEB, Elaine Nicpon. *Human anatomy and physiology*. Redwood City, Calif.: Benjamin Cummings Pub. Co., 2001. ISBN 978-08-0530-122-9.
73. MATSUKAWA, Kanji, Ryota ASAHARA, Miho YOSHIKAWA a Kana ENDO. Deactivation of the prefrontal cortex during exposure to pleasantly-charged emotional challenge. *Scientific Reports* [online]. 2018, 8(1) [cit. 2019-05-25]. DOI: 10.1038/s41598-018-32752-0. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-32752-0>
74. MCLEAN, Blake D., Christopher J. GORE a Justin KEMP. Application of 'Live Low-Train High' for Enhancing Normoxic Exercise Performance in Team Sport Athletes. *Sports Medicine* [online]. 2014, 44(9), 1275-1287 [cit. 2019-06-13]. DOI: 10.1007/s40279-014-0204-8. ISSN 0112-1642. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s40279-014-0204-8>.
75. METIN, Baris, Ayse GOKTEPE, Bernis KAYA, Emin SERIN, Cumhuri TAS, Fatmanur DOLU a Nevzat TARHAN. EEG findings during flow state. *The Journal of Neurobehavioral Sciences* [online]. 2017 [cit. 2019-06-14]. DOI: 10.5455/JNBS.1496152464. ISSN 2149-1909. Dostupné z: <http://www.ejmanager.com/fulltextpdf.php?mno=268143>.

76. MIJACIKA, Tanja a Zeljko DUJIC. Sports-related lung injury during breath-hold diving. *European Respiratory Review*[online]. 2016, 25(142), 506-512 [cit. 2018-12-3]. DOI: 10.1183/16000617.0052-2016. ISSN 0905-9180. Dostupné z: <http://err.ersjournals.com/lookup/doi/10.1183/16000617.0052-2016>.
77. MIŠUREC, J. CHMELAŘ, M. Elektroencefalografie, Brno 1990, Institut pro další vzdělávání středních zdravotnických odborníků v Brně, 194s., ISBN 80-7013-065-2
78. MLADENOVIC, Jelena et al. The Impact of Flow in an EEG-based Brain Computer Interface. 7th International BCI Conference, Sep 2017, Graz, Austria. [online]. [cit. 2019-06-14]. Dostupné z: <https://hal.inria.fr/hal-01527748/document>.
79. MODESTINO, Edward J. Neurophenomenology of an Altered State of Consciousness: An fMRI Case Study. *EXPLORE* [online]. 2016, 12(2), 128-135 [cit. 2019-04-21]. DOI: 10.1016/j.explore.2015.12.004. ISSN 15508307. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1550830715002220>.
80. MORÁŇ, M. (1995). *Praktická elektroencefalografie*. Brno: IPVZ Brno.
81. MORELLI, Maria Sole, Alberto GRECO, Gaetano VALENZA, Alberto GIANNONI, Michele EMDIN, Enzo Pasquale SCILINGO a Nicola VANELLO. Analysis of generic coupling between EEG activity and PETCO₂ in free breathing and breath-hold tasks using Maximal Information Coefficient (MIC). *Scientific Reports* [online]. 2018, 8(1) [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1038/s41598-018-22573-6. ISSN 2045-2322. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/s41598-018-22573-6>.
82. MORELLI, Maria Sole, Nicola VANELLO, Alberto GIANNONI, et al. Correlational analysis of electroencephalographic and end-tidal carbon dioxide signals during breath-hold exercise. 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC) [online]. IEEE, 2015, 2015, , 6102-6105 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319784. ISBN 978-1-4244-9271-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7319784/>.
83. NEPAL, Ojashwi, Kalpana SHARMA, Sunam MANDER a Sarina KUSMA. A Study of Cardiovascular Function in Diving Reflex Response. *International Journal of Scientific and Research Publications* [online]. 2015, 5(3), 1-4 [cit. 2019-01-11]. ISSN 2250-3153. Dostupné z: <http://www.ijsrp.org/research-paper-0315/ijsrp-p3918.pdf>.
84. NIEDERMEYER, E. LOPES DA SILVA, F. Electroencephalography, basic

85. NOBLE, M. I. M., J. H. EISELE, H. L. FRANKEL, W. ELSE a A. GUZ. The role of the diaphragm in the sensation of holding the breath. *Clinical Science* [online]. 1971, 41, 275-283 [cit. 2018-12-5]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/01cb/71fcfed04211906c30d91d197abd45dc97e0.pdf>.
86. OREL, Miroslav a Roman PROCHÁZKA. *Vyšetření a výzkum mozku: pro psychology, pedagogy a další nelékařské obory*. Praha: Grada, 2017. Psyché (Grada). ISBN 978-80-247-5539-7.
87. OSTROWSKI, Andrzej, Marek STRZAŁA, Arkadiusz STANULA, Mirosław JUSZKIEWICZ, Wanda PILCH a Adam MASZCZYK. The Role of Training in the Development of Adaptive Mechanisms in Freedivers. *Journal of Human Kinetics* [online]. 2012, 32(1), 197-210 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.2478/v10078-012-0036-2. ISSN 1899-7562. Dostupné z: <http://content.sciendo.com/view/journals/hukin/32/1/article-p197.xml>.
88. PALADA, Ivan, Darija BAKOVIC, Zoran VALIC, Ante OBAD, Vladimir IVANCEV, Davor ETEROVIC, J. Kevin SHOEMAKER a Zeljko DUJIC. Restoration of hemodynamics in apnea struggle phase in association with involuntary breathing movements [online]. 2008, 161(2), 174-181 [cit. 2019-03-20]. DOI: 10.1016/j.resp.2008.01.008. ISSN 15699048. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1569904808000244>
89. PÁNEK, D., L. KOVÁŘOVÁ, V. KRAJČA, PAVLŮ, D. a E. POSPÍŠILOVÁ. Elektroencefalografické koreláty výkonnostní motivace a únavy. *Rehab fyz. Lék*, 2014b, roč. 21, č. 2, s. 87-92.
90. PÁNEK, David. *Elektroencefalografické koreláty pohybového chování a výkonnostní zátěže*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2016. ISBN 978-80-246-3435-7.
91. PANNETON, Michael W. The Mammalian Diving Response: An Enigmatic Reflex to Preserve Life?. *Physiology* [online]. 2013, 28(5), 284-297 [cit. 2018-12-15]. DOI: 10.1152/physiol.00020.2013. ISSN 1548-9213. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/physiol.00020.2013>.
92. PANNETON, W. Michael, A. Michael ANCH, Whitney M. PANNETON a Qi GAN. Parasympathetic preganglionic cardiac motoneurons labeled after voluntary diving. *Frontiers in Physiology* [online]. 2014, 5 [cit. 2019-02-01]. DOI:

- 10.3389/fphys.2014.00008. ISSN 1664-042X. Dostupné
z: <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2014.00008/abstract>.
93. PANNETON, W. Michael, Paul F MCCULLOCH a Wei SUN. Trigemino-autonomic connections in the muskrat: the neural substrate for the diving response. *Brain Research* [online]. 2000, 874(1), 48-65 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.1016/S0006-8993(00)02549-X. ISSN 00068993. Dostupné
z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S000689930002549X>.
94. PAPADELIS, Christos, Chrysoula KOURTIDOU-PAPADELI, Panagiotis D. BAMIDIS, Nikos MAGLAVERAS a Konstantinos PAPPAS. The effect of hypobaric hypoxia on multichannel EEG signal complexity. *Clinical Neurophysiology* [online]. 2007, 118(1), 31-52 [cit. 2019-03-24]. DOI: 10.1016/j.clinph.2006.09.008. ISSN 13882457. Dostupné
z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1388245706014337>
95. PARADISO S., ROBINSON, R. G., BOLES PONTO, L. L., WATKINS, G. L. & HICHTWA, R. D. Regional cerebral blood flow changes during visually induced subjective sadness in healthy elderly persons. *J. Neuropsychiatry Clin. Neurosci* [online]. 2003, 15, 35–44 [cit. 2019-02-07]. Dostupné
z: <https://neuro.psychiatryonline.org/doi/full/10.1176/jnp.15.1.35>.
96. PARKES, M. J. Breath-holding and its breakpoint. *Experimental Physiology* [online]. 2006, 91(1), 1-15 [cit. 2018-12-2]. DOI: 10.1113/expphysiol.2005.031625. ISSN 09580670. Dostupné
z: <http://doi.wiley.com/10.1113/expphysiol.2005.031625>.
97. PASCUAL- MARQUI, R. D. Standardized low-resolution brain electromagnetic tomography (sLORETA): technical details. *Methods Find Exp Clin Pharmacol* [online]. 2002, 24, s. 5-12 [cit. 2019-02-24]. Dostupné
z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12575463>.
98. PASCUAL-MARQUI, R. D. et al. Low resolution brain electromagnetic tomography (LORETA) functional imaging in acute, neuroleptic-naive, first-episode, productive schizophrenia. *Psychiatry Res* [online]. 1999, 90 (3), s. 169-179 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10466736>.
99. PASCUAL-MARQUI, R. D. Review of Methods for Solving the EEG Inverse Problem. *International Journal of Bioelectromagnetism* [online]. 1999, 1 (1), s. 75-86 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z:
<https://www.brainmaster.com/software/pubs/brain/loreta/TechnicalDetails.pdf>.

100. PASCUAL-MARQUI, R.D., C.M. MICHEL a D. LEHMANN. Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International Journal of Psychophysiology* [online]. 1994, 18(1), 49-65 [cit. 2019-02-13]. DOI: 10.1016/0167-8760(84)90014-X. ISSN 01678760. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016787608490014X>.
101. PEDROSO, Fleming S., Rudimar S. RIESGO, Tanira GATIBONI a Newra T. ROTTA. The Diving Reflex in Healthy Infants in the First Year of Life. *Journal of Child Neurology* [online]. 2011, 27(2), 168-171 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.1177/0883073811415269. ISSN 0883-0738. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0883073811415269>.
102. PEIFFER, Claudine, Nicolas COSTES, Philippe HERVÉ a Luis GARCIA-LARREA. Relief of Dyspnea Involves a Characteristic Brain Activation and a Specific Quality of Sensation. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*[online]. 2008, 177(4), 440-449 [cit. 2019-05-25]. DOI: 10.1164/rccm.200612-1774OC. ISSN 1073-449X. Dostupné z: <http://www.atsjournals.org/doi/abs/10.1164/rccm.200612-1774OC>.
103. PELIZZARI, Umberto a Stefano TOVAGLIERI. *Manual of Freediving: Underwater on a single breath*. Reddick, FL - USA: Idelson-Gnocchi, 2004. ISBN 1-928649-27-0.
104. POLLOCK, Neal W. Annual Diving Report: A Report on 2015 Diving Fatalities, Injuries, and Incidents - Breath-hold Dive Incidents. In: BUZZACOTT, Peter. *DAN Annual Diving Report* [online]. Durham, NC: Divers Alert Network, 2017, s. 67-78 [cit. 2018-12-2]. ISBN 978-1-941027-76-9. Dostupné z: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK487739/pdf/Bookshelf_NBK487739.pdf.
105. POLLOCK, Neal W. Breath-hold diving: performance and safety. *Diving and Hyperbaric Medicine* [online]. 2008, 38(2), 79-86 [cit. 2018-12-2]. Dostupné z: <https://1url.cz/gMHAZ>.
106. POLONARA, G., M. FABRI, T. MANZONI a U. SALVOLINI. Localization of the First and Second Somatosensory Areas in the Human Cerebral Cortex with Functional MR Imaging. *American Journal of Neuroradiology* [online]. 1999, roč. 20, č. 2 [cit. 2019-01-20]. ISSN: 1936-959X. Dostupné z: <http://www.ajnr.org/content/20/2/199/tab-article-info>.
107. PONSOT, Elodie, Stéphane P. DUFOUR, Joffrey ZOLL, et al. Exercise training

- in normobaric hypoxia in endurance runners. II. Improvement of mitochondrial properties in skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology* [online]. 2006,100(4), 1249-1257 [cit. 2018-02-27]. DOI: 10.1152/japplphysiol.00361.2005. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/japplphysiol.00361.2005>.
- principles, clinical applications and related fields, 5. Vyd., Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2005, 1309 s., ISBN 0-7817-5126-8.
108. RADOVANOVIC, Sasa, Alexander KOROTKOV, Milos LJUBISAVLJEVIC, et al. Comparison of brain activity during different types of proprioceptive inputs: a positron emission tomography study. *Experimental Brain Research* [online]. 2002, 143(3), 276-285 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1007/s00221-001-0994-4. ISSN 0014-4819. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00221-001-0994-4>
109. RATMANOVA, Patricia, Roxana SEMENYUK, Daniil POPOV, Sergey KUZNETSOV, Irina ZELENKOVA, Dmitry NAPALKOV a Olga VINOGRADOVA. Prolonged dry apnoea: effects on brain activity and physiological functions in breath-hold divers and non-divers. *European Journal of Applied Physiology* [online]. 2016, (116), 1367–1377 [cit. 2017-07-08]. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.is.cuni.cz/content/pdf/10.1007%2Fs00421-016-3390-2.pdf>.
110. RAZUMNIKOVA, Olga M. Creativity related cortex activity in the remote associates task. *Brain Research Bulletin* [online]. 2007, 73(1-3), 96-102 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.1016/j.brainresbull.2007.02.008. ISSN 03619230. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0361923007000731>
111. RIDGWAY, Lynne a Ken MCFARLAND. Apnea Diving: Long-Term Neurocognitive Sequelae of Repeated Hypoxemia. *The Clinical Neuropsychologist* [online]. 2006, 20(1), 160-176 [cit. 2019-02-07]. DOI: 10.1080/13854040590947407. ISSN 1385-4046. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13854040590947407>.
112. SATO, Daisuke, Hideaki ONISHI, Koya YAMASHIRO, Tatsuya IWABE, Yoshimitsu SHIMOYAMA a Atsuo MARUYAMA. Water Immersion to the Femur Level Affects Cerebral Cortical Activity in Humans: Functional Near-Infrared Spectroscopy Study. *Brain Topography* [online]. 2012, 25(2), 220-227 [cit. 2019-07-29]. DOI: 10.1007/s10548-011-0204-z. ISSN 0896-0267. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10548-011-0204-z>.

113. SATO, Daisuke, Koya YAMASHIRO, Hideaki ONISHI, Yasuhiro BABA, Sho NAKAZAWA, Yoshimitsu SHIMOYAMA, Atsuo MARUYAMA a François TREMBLAY. Whole-Body Water Flow Stimulation to the Lower Limbs Modulates Excitability of Primary Motor Cortical Regions Innervating the Hands: A Transcranial Magnetic Stimulation Study. *PLoS ONE*[online]. 2014, 9(7) [cit. 2019-07-29]. DOI: 10.1371/journal.pone.0102472. ISSN 1932-6203. Dostupné z: <https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0102472>.
114. SCHAGATAY, Erika, Marja VAN KAMPEN, Stefan EMANUELSSON a Boris HOLM. Effects of physical and apnea training on apneic time and the diving response in humans. *European Journal of Applied Physiology* [online]. 2000, 82(3), 161-169 [cit. 2019-01-12]. DOI: 10.1007/s004210050668. ISSN 1439-6319. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s004210050668>.
115. SCHAGATAY, Erika. Predicting performance in competitive apnoea diving. Part I: Static apnoea. *Journal of the South Pacific Underwater Medicine Society* [online]. 2009, 39(2), 88-99 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228105009_Predicting_performance_in_competitive_apnoea_diving_Part_I_Static_apnoea.
116. SCHELLAR, N. A. a D. REITS. Transient and maintained changes of the spontaneous occipital EEG during acute systemic hypoxia. *Aviation, Space, and Environmental Medicine* [online]. 2001, 72(5), 462–470 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Nico_Schellart/publication/11991504_Transient_and_maintained_changes_of_the_spontaneous_occipital_EEG_during_acute_systemic_hypoxia/links/59ca278345851556e97df165/Transient-and-maintained-changes-of-the-spontaneous-occipital-EEG-during-acute-systemic-hypoxia.pdf
117. SCHELLART, N. A. M. a D. REITS. Voluntary breath holding affects spontaneous brain activity measured by magnetoencephalography. *Undersea & Hyperbaric Medicine* [online]. 1999, 26(4), 229-234 [cit. 2019-01-23]. Dostupné z: <http://archive.rubicon-foundation.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/2330/10642069.pdf?sequence=1>
118. SKOW, Rachel J., Trevor A. DAY, Jonathan E. FULLER, Christina D. BRUCE a Craig D. STEINBACK. The ins and outs of breath holding: simple demonstrations of complex respiratory physiology. *Advances in Physiology Education*[online].

- 2015, 39(3), 223-231 [cit. 2018-12-5]. DOI: 10.1152/advan.00030.2015. ISSN 1043-4046. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/advan.00030.2015>.
119. SLAVÍKOVÁ, Jana a Jitka ŠVÍGLEROVÁ. *Fyziologie dýchání*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2065-7. VÉLE, František. *Kineziologie pro klinickou praxi*. Praha: Grada, 1997. ISBN 80-716-9256-5.
120. SMITH, Gavin, Ameer MORGANS, David McD TAYLOR a Peter CAMERON. Use of the human dive reflex for the management of supraventricular tachycardia: a review of the literature. *Emergency Medicine Journal* [online]. 2012, 29(8), 611-616 [cit. 2019-02-01]. DOI: 10.1136/emmermed-2011-200877. ISSN 1472-0205. Dostupné z: <http://emj.bmj.com/lookup/doi/10.1136/emmermed-2011-200877>.
121. SPECK, D. F. a D. S. BRUCE. Effects of varying thermal and apneic conditions on the human diving reflex. *Undersea Biomedical Research* [online]. 1978, 5(1), 9-14 [cit. 2019-01-12]. Dostupné z: <http://archive.rubicon-foundation.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/2827/636078.pdf?sequence=1>.
122. STEINBERG, Fabian a Michael DOPPELMAYR. Neurocognitive Markers During Prolonged Breath-Holding in Freedivers: An Event-Related EEG Study. *Frontiers in Physiology* [online]. 2019, 10 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.3389/fphys.2019.00069. ISSN 1664 042X. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fphys.2019.00069/full>.
123. STEINBERG, Fabian, Nils Henrik PIXA a Michael DOPPELMAYR. Electroencephalographic alpha activity modulations induced by breath-holding in apnoea divers and non-divers. *Physiology & Behavior* [online]. 2017, 179(5), 90-98 [cit. 2019-03-23]. DOI: 10.1016/j.physbeh.2017.05.028. ISSN 00319384. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0031938416312240>.
124. STEINER, Stephan, Per Otto SCHUELLER, Volker SCHULZE a Bodo Eckehard STRAUER. Occurrence of Coronary Collateral Vessels in Patients With Sleep Apnea and Total Coronary Occlusion. *Chest* [online]. 2010, 137(3), 516-520 [cit. 2019-06-13]. DOI: 10.1378/chest.09-1136. ISSN 00123692. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012369210601262>.
125. STEVENS, Michael C., Kent A. KIEHL, Godfrey PEARLSON a Vince D. CALHOUN. Functional neural circuits for mental timekeeping. *Human Brain Mapping* [online]. 2007, 28(5), 394-408 [cit. 2019-05-19]. DOI: 10.1002/hbm.20285. ISSN 10659471. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/hbm.20285>

126. STRANDVAD, Sara Malou. Under water and into yourself: Emotional experiences of freediving contact information. *Emotion, Space and Society* [online]. 2018, 27, 52-59 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.1016/j.emospa.2018.02.007. ISSN 17554586. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755458616301232>.
127. STRAUGHAN, Elizabeth R. Touched by water: The body in scuba diving. *Emotion, Space and Society* [online]. 2012, 5 (1), 19-26 [cit. 2018-12-5]. DOI: 10.1016/j.emospa.2010.10.003. ISSN 17554586. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1755458610000514>.
128. TELLES, Shirley a K. V. NAVEEN. Voluntary Breath Regulation in Yoga: Its Relevance and Physiological Effects. *Biofeedback* [online]. 2008, 36(2), 70-73 [cit. 2019-06-13]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/7b6c/c1bc5d2ada1781c2ed1bea6ce0af6f2cea52.pdf>
129. VON STEIN, A. Synchronization Between Temporal and Parietal Cortex During Multimodal Object Processing in Man. *Cerebral Cortex* [online]. 9(2), 137-150 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.1093/cercor/9.2.137. ISSN 14602199. Dostupné z: <https://academic.oup.com/cercor/article-lookup/doi/10.1093/cercor/9.2.137>.
130. WAGER, T. D. *et al.* Brain mediators of cardiovascular responses to social threat: part I: Reciprocal dorsal and ventral sub-regions of the medial prefrontal cortex and heart-rate reactivity. *Neuroimage* [online]. 2009, 47, 821–835 [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1053811909005552?via%3Dihub>.
131. WANG, David, Brendon J. YEE, Keith K. WONG, Jong Won KIM, Derk-Jan DIJK, James DUFFIN a Ronald R. GRUNSTEIN. Comparing the effect of hypercapnia and hypoxia on the electroencephalogram during wakefulness. *Clinical Neurophysiology* [online]. 2015, 126(1), 103-109 [cit. 2019-03-25]. DOI: 10.1016/j.clinph.2014.04.012. ISSN 13882457. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1388245714002223>.
132. WHITELAW, W. A., B. MCBRIDE, J. AMAR a K. CORBET. Respiratory neuromuscular output during breath holding. *Journal of Applied Physiology* [online]. 1981, 50(2), 435-443 [cit. 2018-12-30]. DOI: 10.1152/jappl.1981.50.2.435. ISSN 8750-7587. Dostupné z: <http://www.physiology.org/doi/10.1152/jappl.1981.50.2.435>.

133. World Records: Current world record table - Man. *AIDA - International: Worldwide freediving community* [online]. Zürich SWITZERLAND: AIDA - International, 2018, [cit. 2018-12-4]. Dostupné
z: <https://www.aidainternational.org/worldrecords#recordsMan>.
134. World Records: Current world record table - Woman. *AIDA - International: Worldwide freediving community* [online]. Zürich SWITZERLAND: AIDA - International, 2018, [cit. 2018-12-4]. Dostupné
z: <https://www.aidainternational.org/worldrecords#recordsWoman>.
135. ZILLES, Karl a Katrin AMUNTS. Centenary of Brodmann's map — conception and fate. *Nature Reviews Neuroscience* [online]. 2010, 11(2), 139-145 [cit. 2019-02-01]. DOI: 10.1038/nrn2776. ISSN 1471-003X. Dostupné
z: <http://www.nature.com/articles/nrn2776>.

PŘÍLOHY

Příloha č. 1 Souhlas Etické komise UK FTVS

Příloha č. 2 Informovaný souhlas – vzor

Příloha č. 3 Přehled nejvýznamnějších Brodmannových zón a jejich funkcí

Příloha č. 4 Funkční celky Brodmannových oblastí I

Příloha č. 5 Funkční celky Brodmannových oblastí II

SEZNAM TABULEK

Tabulka č. 1 Přehled informací o jednotlivých probandech, délky jejich zádrží dechu a zkušenosti s nádechovým potápěním

Tabulka č. 2 Souhrnný přehled všech aktivovaných Brodmannových zón v daných frekvenčních pásmech ($p \leq 0,05$)

Tabulka č. 3 Souhrnný přehled všech aktivovaných Brodmannových zón v daných frekvenčních pásmech ($p \leq 0,01$)

Tabulka č. 4 Souhrnný přehled všech aktivovaných Brodmannových zón v daných frekvenčních pásmech ($p \leq 0,10$)

UNIVERZITA KARLOVA
FAKULTA TĚLESNÉ VÝCHOVY A SPORTU
José Martího 31, 162 52 Praha 6-Vešleslavín

Žádost o vyjádření Etické komise UK FTVS

k projektu výzkumné, kvalifikační či seminární práce zahrnující lidské účastníky

Název projektu: Sledování mozkové aktivity v prolongované zádrži dechu u freediverů

Forma projektu: výzkumná práce – diplomová práce

Období realizace: Leden 2019– březen 2019

Předkladatel: Bc. et Bc. Pavla Skopalová

Hlavní řešitel: Bc. et Bc. Pavla Skopalová

Místo výzkumu (pracoviště): Katedra fyzioterapie UK FTVS

Vedoucí práce (v případě studentské práce): MUDr. David Pánek, Ph.D.

Popis projektu: Ve své diplomové práci se budu zabírat obrazem elektrické aktivity mozku během prolongované zádrže dechu u nádechových potápěčů. Studie se bude účastnit 15 dobrovolníků, kteří s cílenou prolongovanou zádrží dechu mají zkušenosti a trénují ji. Pro měření elektrické aktivity mozku bude použit elektroencefalograf. Cílem práce je přinést informace o tom, zda při prolongované zádrži dechu dochází k určitým specifickým aktivitám mozku (měření bude probíhat cca 20 minut před zahájením zádrže dechu, poté po dobu zádrže a nakonec cca 20 minut po ukončení zádrže dechu).

Charakteristika účastníků výzkumu: Účastníci kurzu jsou sportovní či rekreační nádechoví potápěči, jedná se o zdravou dospělou populaci s platnými zdravotními prohlídkami. Předběžný počet účastníků je 15 ve věkovém rozhraní 20-50 let. Testování se nezúčastní osoby s akutním, astmatickým a kardiovaskulárním onemocněním či v rekonvalescenci po onemocnění.

Zajištění bezpečnosti: Při měření nebudou použity žádné invazivní metody. Během měření zádrže dechu budou dodržena všechna základní bezpečnostní opatření, při zádrži dechu bude měřený subjekt pod dohledem minimálně dvou dalších osob. Všichni účastníci studie mají s prolongovanou zádrží dechu tréninkovou zkušenost. Správnost přípravy a průběhu celého měření elektroencefalografem bude zajištěna dohledem lékaře. Rizika testování a aplikovaného postupu nebudou vyšší než běžně očekávaná rizika v rámci tohoto typu výzkumu.

Etické aspekty výzkumu: Účastníci výzkumu jsou plnoletí. Získaná data budou zpracovávána a bezpečně uchována v anonymní podobě a publikována v diplomové práci, případně v odborných časopisech, monografiích a prezentována na konferencích, případně budou využita při další výzkumné práci na UK FTVS. Po anonymizaci budou osobní data smazána. Během výzkumu nebudou pořizovány žádné fotografie ani videozáznamy. V maximální možné míře zajistím, aby získaná data nebyla zneužita.

Text informovaného souhlasu: příložen.

Povinností všech účastníků výzkumu na straně řešitele je chránit život, zdraví, důstojnost, integritu, právo na sebeurčení, soukromí a osobní data zkoumaných subjektů, a podniknout k tomu veškerá preventivní opatření. Odpovědnost za ochranu zkoumaných subjektů leží vždy na účastnících výzkumu na straně řešitele, nikdy na zkoumaných, byť dali svůj souhlas k účasti na výzkumu. Všichni účastníci výzkumu na straně řešitele musí brát v potaz etické, právní a regulační normy a standardy výzkumu na lidských subjektech, které platí v České republice, stejně jako ty, jež platí mezinárodně.

Potvrzuji, že tento popis projektu odpovídá návrhu realizace projektu a že při jakékoli změně projektu, zejména použitých metod, zašlu Etické komisi UK FTVS revidovanou žádost.

V Praze dne: 2. 1. 2019

Podpis předkladatele:

Vyjádření Etické komise UK FTVS

Složení komise: Předsedkyně: doc. PhDr. Irena Parry Martinková, Ph.D.

Členové: prof. PhDr. Pavel Slepíčka, DrSc.

doc. MUDr. Jan Heller, CSc.

PhDr. Pavel Hráský, Ph.D.

Mgr. Eva Prokešová, Ph.D.

MUDr. Simona Majorová

Projekt práce byl schválen Etickou komisí UK FTVS pod jednacím číslem: 244/2018

dne: 3. 1. 2019

Etická komise UK FTVS zhodnotila předložený projekt a neshledala žádné rozpory s platnými zásadami, předpisy a mezinárodními směrnici pro provádění výzkumu zahrnujícího lidské účastníky.

Řešitel projektu splnil podmínky nutné k získání souhlasu Etické komise.

UNIVERZITA KARLOVA
Fakulta tělesné výchovy a sportu
José Martího 31, 162 52, Praha 6
razítko UK FTVS

podpis předsedkyně EK UK FTVS

Příloha č. 2 – Informovaný souhlas – vzor

INFORMOVANÝ SOUHLAS

Vážený pane, vážená paní,

v souladu se Všeobecnou deklarací lidských práv, zákonem č. 101/2000 Sb., o ochraně osobních údajů a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů a dalšími obecně závaznými právními předpisy (*jakož jsou zejména Helsinská deklarace, přijatá 18. Světovým zdravotnickým shromážděním v roce 1964 ve znění pozdějších změn (Fortaleza, Brazílie, 2013); Zákon o zdravotních službách a podmínkách jejich poskytování (zejména ustanovení § 28 odst. 1 zákona č. 372/2011 Sb.) a Úmluva o lidských právech a biomedicíně č. 96/2001, jsou-li aplikovatelné*), Vás žádám o souhlas s Vaší účastí ve výzkumném projektu v rámci diplomové práce s názvem „*Sledování mozkové aktivity v prodloužené zádrži dechu u freediverů*“ prováděné na Katedře fyzioterapie UK FTVS.

Cílem diplomové práce je přinést informace o tom, zda v mozku během prodloužené zádrže dechu dochází k určitým specifickým aktivitám. V rámci studie budete měřeni pomocí elektroencefalografu, 20 minut před začátkem samotné zádrže dechu, následně při Vaší aktuální maximální možné zádrži a poté dalších 20 minut po zádrži. Vše bude probíhat pod dohledem lékaře.

Nebudou použity žádné invazivní metody. Měření bude u každého z probandů prováděno jednorázově, časová náročnost pro jednoho probanda je odhadována na maximálně 90 minut. Testování se nezúčastníte s akutním, astmatickým a kardiovaskulárním onemocněním či v rekonvalescenci po onemocnění.

Během měření zádrže dechu budou dodržena všechna základní bezpečnostní opatření, při zádrži dechu budete pod dohledem minimálně dvou dalších osob. Správnost přípravy a průběhu celého měření elektroencefalografem bude zajištěna dohledem lékaře. Rizika testování a aplikovaného postupu nebudou vyšší než běžně očekávaná rizika v rámci tohoto typu výzkumu nebo Vašeho tréninku.

Vaše účast v projektu nebude finančně ohodnocená.

Získaná data budou zpracovávána a bezpečně chovaná v anonymní podobě a publikovaná v diplomové práci, případně odborných časopisech, monografiích a na konferencích, případně budou využita při další výzkumné práci na UK FTVS. Po anonymizaci budou osobní data smazána. Během výzkumu nebudou pořizovány žádné fotografie ani videozáznamy.

V maximální možné míře zajistím, aby získaná data nebyla zneužita.

Jméno a příjmení předkladatele a hlavního řešitele projektu Bc. et Bc. Pavla Skopalová
Podpis:

Jméno a příjmení osoby, která provedla poučení

Podpis:.....

Prohlašuji a svým níže uvedeným vlastnoručním podpisem potvrzuji, že dobrovolně souhlasím s účastí ve výše uvedeném projektu a že jsem měl(a) možnost si řádně a v dostatečném čase zvážit všechny relevantní informace o výzkumu, zeptat se na vše podstatné týkající se účasti ve výzkumu a že jsem dostal(a) jasné a srozumitelné odpovědi na své dotazy. Byl(a) jsem poučen(a) o právu odmítnout účast ve výzkumném projektu nebo svůj souhlas kdykoli odvolat bez represí, a to písemně Etické komisi UK FTVS, která bude následně informovat předkladatele projektu.

Místo, datum Jméno a příjmení účastníka Podpis:

Příloha č. 3 Přehled nejvýznamnějších Brodmannových zón a jejich funkcí

BA 1, 2, 3 (postcentrální gyrus)	primární somatosensorický kortex somatosensorická percepce organizace volního pohybu ruky hluboká propriocepce
BA 4 (precentrální gyrus)	primární motorický kortex imaginace pohybu vytváření podnětů pro pohyb opačné poloviny těla motorické učení kinestetické vnímání pohybů končetin volní kontrola dýchání
BA 5 (lobulus parietalis superior)	somatosensorický asociativní kortex vnímání pohybu těla, pohybová paměť vizuospeciální a vizuomotorická pozornost vnímání bolesti sjednocení vjemů povrchových a hlubokých
BA 6 (frontální lalok)	promotorický kortex a suplementární motorický kortex příprava a plánování pohybu – složitějších volních úkonů senzorické řízení pohybů motorické učení volní kontrola dýchání
BA 7 (lobulus parietalis superior)	visuálně–motorická koordinace zpracování emocí, sebereflexe při rozhodování zpracování cílů prostorové vidění vizuospeciální a vizuomotorická pozornost
BA 8 (gyrus frontalis medius)	frontální zrakové oblasti odpověď na proprioceptivní stimulaci předvídaní bolesti pohyby očí a jejich koordinace s pohyby hlavy a krku motorické učení, motorická kontrola
BA 9 a 10 (gyrus frontalis superior, gyrus frontalis medialis)	dorsolaterální prefrontální kortex, anteriorní prefrontální kortex krátkodobá paměť, prospektivní paměť pozornost k lidskému hlasu zpracování emočních podnětů vnímání příjemných a nepříjemných pocitů plánování, rozhodování integrace senzoričkových informací
BA 11 a 12 (gyri orbitales, gyrus rectus, gyrus rostralis, část gyrus frontalis superior)	orbitofrontální oblast procesy rozhodování, plánování kódování informací d odložené paměti asociace jméno–obličej
BA 13, 14, 15 a 16	insulární kortex přemostění informací mezi mediálními a laterálními vrstvami mozku viscerosenzitivita visceromotorika
BA 17 (okcipitální lalok, sulcus calcarinus)	primární zrakový kortex imaginace vizuálních obrazů rozpoznání obličejů rozpoznání barev detekce intenzity světla optokinetická pozornost
BA 18	sekundární zrakový kortex selektivní pozornost trvalá pozornost na barvu a vzor detekce intenzity světla optokinetická pozornost vizuální imaginace

BA 19	<p>asociativní zrakový kortex vizuospaciální pozornost vizuální paměť selektivní pozornost/orientace vizuálně sledování pohybu prostorová paměť</p>
BA 20 (součást lobus temporalis, gyrus temporalis inferior)	<p>vizuální pozornost integrace vizuálních prvků do celků porozumění jazyku, metafor</p>
BA 21 (gyrus temporalis medius)	<p>procesy spojené s porozuměním, dedukce rozpoznávání vzdálenost pozorování pohybu tvorba slov a vět, další jazykové funkce</p>
BA 22 (gyrus temporalis superior – včetně Wernickeova centra)	<p>zásadní role ve vnímání a zpracování řeči vnímání emocí na základě percepce výrazu obličeje</p>
BA 23, 24, 25, 28, 29, 30 až 33	<p>cingulární korová oblast funkčně patří pod limbický systém motorické učení emočně podmíněné emoční reaktivita prostorová paměť epizodická paměť</p>
BA 32 a 33 (gyrus cinguli anterior)	<p>cingulární korová oblast vyhodnocení chování ostatních lidí racionální uvažování</p>
BA 34	<p>area entorhinalis dorsalis inhibice signálů na ose neocortex – hippocampus a naopak vyvolání paměťových stop</p>
BA 35 a 36	<p>area ectorhinalis, cortex perirhinalis emoční, vizuální, sluchová paměť inhibice signálů na ose neocortex – hippocampus a naopak vyvolání paměťových stop</p>
BA 37 (gyrus fusiformis)	<p>rozpoznání obličejů uložení zrakové informace do paměti vizuální fixace pozornost na barvy a tvary</p>
BA 38 (temporální lalok – “pól”)	<p>funkce není přesně známa pravděpodobně komplexní emoční reakce paměťové funkce viscerálně–emoční reakce</p>
BA 39 (gyrus angularis)	<p>exekutivní kontrola chování matematické operace kognitivní procesy</p>
BA 40 (gyrus supramargialis)	<p>vnímání a zpracování mluveného jazyka verbální kreativita vybavení nepříjemných vzpomínek, událostí integrace taktilních a proprioceptivních informací</p>
BA 41 a 42 (gyri temporale transversi, gyrus Heschl)	<p>primární sluchový kortex základní zpracování sluchových podnětů</p>
BA 43 (pars opercularis gyrus frontalis inferior)	<p>primární gustatorní kortex, málo prozkoumaná oblast interpretace chuti vibrotaktilní stimulace reakce na mluvené slovo</p>
BA 44 (část Brocova centra, pars opercularis, část gyrus frontalis inferior)	<p>produkce řeči vnímání známých pachů</p>

BA 45 (část Brocova centra, část gyus frontalis inferior)	produkce řeči vnímání známých pachů modulace emoční odpovědi
BA 46 (gyrus frontalis medialis)	dorsolaterální prefrontální kortex plánování, organizace pohybu zpracování emocí, sebereflexe při rozhodování integrace sensorických informací exekutivní kontrola chování vybavování si z paměti
BA 47 (pars orbitalis, část gyus frontalis inferior)	inhibice motorických funkcí deduktivní uvažování

Příloha č. 4 Funkční celky Brodmannových oblastí I

60 | Brodmann Cortical Areas

Functional Breakdown

Motor

Function	Brodman Area
Primary motor	4, 1, 2, 3
Secondary motor	6, 8
Motor planning	6, 13-16; 24, 32-33; 40
Motor Imagery	5, 7, 4, 6, 8; 24, 32-33
Motor Learning	4, 1-3, 6, 8; 23, 26, 29-31
Saccadic movements	4, 5, 7, 6, 8, 17, 18, 19, 46
Inhibition of blinking	4

Sensory

Function	Brodman Area
Proprioception	1-3, 4, 8
Touch, temperature, vibration	1-3, 4, 5, 7, 13-16
Somatosensory integration	40

Auditory

Function	Brodman Area
Basic processing	41, 42
Complex sounds processing	21, 22
Auditory Imagery	8, 9, 10
Familiar voices	38

Visual

Function	Brodman Area
Light intensity / patterns	17, 18, 19
Color discrimination	17
Visual integration	20
Visual motion processing	37

Olfaction

Function	Brodman Area
General olfaction	11
Familiar odors	9, 10; 24, 32-33; 44, 45, 47

Language

Function	Brodman Area
Comprehension	22, 20, 21, 37, 39, 40, 5, 7, 6, 9, 10, 23, 26, 29-31, 38, 43, 44, 45, 47
Expression	44, 45, 46, 6, 8, 9, 10, 13-16, 21; 24, 32-33; 47
Prosody comprehension	22
Reading	6, 39
Writing	40

Příloha č. 5 Funkční celky Brodmannových oblastí II

Memory

Function	Brodmann Area
Working Memory	5, 7, 6, 8, 9, 10, 20; 24, 32-33; 40, 41, 44, 45, 46, 47; (27-28, 34-36, 48)
Episodic memory	6, 44, 45, 47
Retrieval	8, 9, 10; 26, 29, 29-31; 24, 32-33; 38, 40
Encoding	(27-28, 34-36, 48); 9, 10; 24, 32-33; 37, 46
Topokinetic	23, 26, 29-31

Attention

Function	Brodmann Area
Visual	17, 18, 37
Visuomotor	5, 7, 6, 8
Visuospatial	6, 8; 39, 24, 32-33; 45
Selective to sounds	6, 9, 10; 24, 32-33
To speech	20, 22; 23, 26, 29-31; 38, 47

Pain

Function	Brodmann Area
Pain processing	13-16; 24, 32-33, 5, 7

Executive

Function	Brodmann Area
Planning	6, 8, 9, 10
Behavioral inhibition	6, 8, 9, 10, 13-16; 24, 32-33; 39, 40, 44, 46, 47
Motor inhibition	24, 32-33, 44, 45, 47

Emotion

Function	Brodmann Area
Experiencing / processing emotion	38, 46; (27-28, 34-36, 48)
Related to language	23, 26, 29-31; 25
Emotional stimuli	9, 10; 24, 32-33
Fear response	13-16

Other

Function	Brodmann Area
Calculation	39, 40, 6, 8, 9, 10, 13-16, 46
Theory of mind	38, 9, 10, 20, 21, 22, 37, 47
Face recognition	37
Mental time-keeping	24, 32-33
Humor comprehension	38
Music performance	40
Music enjoyment	44, 45, 46
Novelty discrimination	(27-28, 34-36, 48)