

UNIVERZITA KARLOVA
Fakulta tělesné výchovy a sportu

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Bc. Dita Dubová

UNIVERZITA KARLOVA
Fakulta tělesné výchovy a sportu

**Cerebrální projekce haptického kontaktu
zobrazená v sLORETA**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

MUDr. David Pánek, Ph.D.

Vypracovala:

Bc. Dita Dubová

Praha, 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem 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

Poděkování

Ráda bych na tomto místě poděkovala především vedoucímu své diplomové práce MUDr. Davidu Pánkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky i za čas, který věnoval samotnému experimentu, přípravě dat a konzultacím. Dále děkuji své kolegyni Mgr. Dominice Dvořáčkové za odbornou i přátelskou podporu a pomoc. V neposlední řadě děkuji všem probandům, kteří se ochotně zúčastnili našeho experimentu.

Abstrakt

Název: Cerebrální projekce haptického kontaktu zobrazená v sLORETA

Cíle: Cílem této práce je vyhodnotit změny intracerebrální zdrojové aktivity v sLORETA zobrazení během haptického kontaktu na rukou modifikovaného zrcadlovou iluzí v porovnání s klidovým stavem s otevřenými očima a určit přesnou lokalizaci zjištěné zdrojové aktivity.

Metody: Experimentu se zúčastnilo 10 zdravých dospělých probandů ve věku 23–42 let. Elektrická aktivita mozku byla snímána pomocí skalpového EEG v 5 fázích experimentu. Nejprve byla měřena aktivita mozku při klidovém stavu s otevřenými a následně se zavřenými očima, obojí po dobu 5 minut. Následně byli probandi usazeni ke stolu se sagitálně umístěným zrcadlem, které zakrývalo jejich pravou horní končetinu a odráželo levou. Poté byla snímána elektrická aktivita mozku ve čtyřech modifikacích po 2 minutách. Během 1. modifikace byl podáván haptický kontakt symetricky na obě ruce, během modifikace č. 2 byl podán stimul pouze na levou ruku, při modifikaci č. 3 pouze na pravou ruku a 4. modifikace probíhala bez podání haptického stimulu. Pořadí modifikací bylo randomizováno. Data získaná EEG záznamem byla následně konvertována do programu sLORETA, který umožňuje zdrojovou aktivitu mozku lokalizovat a aktivní oblasti zobrazit v 3D Talairachově kortikálním atlasu. Statistické zpracování dat bylo provedeno rovněž s pomocí sLORETA programu, pro vyhodnocení statisticky významných změn v mozkové aktivitě byl použit párový t-test s logaritmickou transformací dat o parametru vyhlazení 0,5 s použitím permutační metody využívající 5000 randomizací.

Výsledky: U všech čtyř modifikací byl zjištěn statisticky významný rozdíl ve zdrojové aktivitě mozku na hladině významnosti $p \leq 0,05$, a to ve frekvenčních pásmech beta2, beta3 a delta v různých Brodmannových areách.

Klíčová slova: haptický kontakt, dotek, zrcadlové neurony, zrcadlová terapie, neuroplasticita, Brodmannovy arey, EEG, sLORETA

Abstract

Title: Cerebral projection of haptic contact via sLORETA imaging

Objectives: The aim of this work is to evaluate changes in intracerebral source activity via sLORETA imaging during haptic stimulation of hands, while this contact is modified by a mirror illusion in comparison to calm state with open eyes. The work seeks to specify localization of such activity.

Methods: Ten healthy volunteers aged 23–42 participated in the experiment. The electrical brain activity was detected with scalp EEG. The experiment was divided in 5 phases. First we measured the brain activity during calm state with open and with closed eyes, each for 5 minutes. Afterwards the subjects were seated at a table with a mirror occluding their right hand and reflecting their left hand. The brain activity was then recorded during 4 modifications of the experiment in duration of 2 minutes each. The first modification contained symmetrical haptic contact on both hands, modification 2 involved stimulation on the left hand only, during modification 3 the stimulus was applied on the right hand only and modification 4 had no tactile stimulus on neither side. The order of modifications for each individual was randomized. The EEG data were converted into sLORETA program, which allows to localize the source of the recorded brain activity and also to view the findings in 3D Talairach cortical atlas. The statistical analyses of the data were also conducted via sLORETA. To evaluate statistically significant changes in the source activity we used pairwise t-test with logarithmical transformation of the data with the aliasing parameter of 0,5 with permutation method using 5000 randomizations.

Results: A statistically significant difference in the source brain activity was found within all four modifications in the beta2, beta3 and delta frequencies in various Brodmann areas at the significance level of $p \leq 0.05$.

Keywords: haptic contact, touch, mirror neurons, mirror therapy, neuroplasticity, Brodmann areas, EEG, sLORETA

Seznam použitých symbolů a zkratek

BA	Brodmannova area
CMP	cévní mozková příhoda
CNS	centrální nervový systém
EEG	elektroencefalografie
F5	frontální premotorická korová oblast
fMRI	funkční magnetická rezonance
FTVS UK	Fakulta tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy
HK	horní končetina
HKK	horní končetiny
IFG	inferiorní frontální gyrus
IPL	inferiorní parietální lobulus
LORETA	low resolution brain electromagnetic tomography
M1	primární motorická oblast
MT	mirror therapy (zrcadlová terapie)
MVF	mirror visual feedback (zrcadlová zpětná vazba)
OE	open eyes (otevřené oči)
PET	pozitronová emisní tomografie
PNF	proprioceptivní neuromuskulární facilitace
S1	primární sensorická oblast
S2	sekundární sensorická oblast
sLORETA	standardized low resolution brain electromagnetic tomography

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Teoretická část	11
2.1	Role haptického kontaktu v rehabilitaci	11
2.2	Zrcadlové neurony	13
2.2.1	Anatomie zrcadlového systému	14
2.2.2	Původ zrcadlového systému	15
2.2.3	Historie a vývoj teorie zrcadlových neuronů	16
2.2.4	Taktilní zrcadlový systém.....	18
2.2.5	Využití zrcadlového systému v rehabilitaci.....	19
2.3	Neuroplasticita	21
2.4	Zrcadlová zpětná vazba	22
2.4.1	Teoretická východiska	22
2.4.2	Mirror therapy – zrcadlová terapie.....	23
2.5	Brodmannovy arey.....	26
2.6	Elektroencefalografie.....	28
2.7	sLORETA	29
3	Experimentální část.....	30
3.1	Cíle práce.....	30
3.2	Úkoly práce.....	30
3.3	Výzkumné otázky	30
3.4	Hypotézy.....	31
3.5	Metodika	32
3.5.1	Charakteristika výzkumného souboru.....	32
3.5.2	Použité metody.....	32
3.5.3	Měření a sběr dat.....	33
3.5.4	Analýza a statistické vyhodnocení dat	34
4	Výsledky.....	36
4.1	Výsledky k hypotéze č. 1	36
4.2	Výsledky k hypotéze č. 2.....	38
4.3	Výsledky k hypotéze č. 3.....	39
4.4	Výsledky k hypotéze č. 4.....	40
4.5	Souhrn výsledků	43
4.6	Výsledky subjektivního hodnocení probandů.....	44
5	Diskuze	45
5.1	Diskuze k hypotéze č. 1.....	45

5.2	Diskuze k hypotéze č. 2	48
5.3	Diskuze k hypotéze č. 3	51
5.4	Diskuze k hypotéze č. 4	52
5.5	Diskuze – souhrn	54
6	Závěr.....	56
	Seznam použité literatury.....	58
	Seznam obrázků.....	68
	Seznam tabulek.....	70
	Seznam příloh.....	71

1 ÚVOD

V posledních několika desetiletích zaujaly na poli výzkumu v oblasti neurověd významné místo zrcadlové neurony. Jedná se o nervové buňky lokalizované v různých oblastech mozku, které se díky svým specifickým vlastnostem aktivují nejen při samotné exekuci účelného pohybu, ale také v situaci, kdy tento pohyb pouze sledujeme u někoho jiného. Na tomto principu funguje zrcadlíci mechanismus těchto neuronů nejen v oblasti motoriky, ale také v souvislosti s emocemi a somatosenzorickými funkcemi. Podle této teorie tedy existuje také populace buněk se zrcadlíci schopností, které se aktivují při skutečném vnímání doteku a rovněž při sledování doteku podávaného někomu jinému.

V rehabilitaci našel fenomén zrcadlových neuronů široké využití v rámci léčebných metod založených na neurofyziologickém podkladě, mezi něž patří mj. také zrcadlová terapie. Tato metoda využívá uvedené principy s pomocí zrcadla, v němž pacient s unilaterální poruchou motorického nebo senzorického charakteru sleduje odraz svojí intaktní končetiny, zatímco jeho postižená končetina je zrcadlem zakryta. Takto navozená iluze umožňuje přímo přes systém zrcadlových neuronů aktivovat příslušné oblasti mozku bez nutnosti zapojení vyšších integračních a kognitivních funkcí. Dle dostupných studií jsou teoretická východiska terapeutických účinků tohoto mechanismu opřena mj. o teorii neuroplasticity mozku, tedy o jeho schopnost do jisté míry na funkční i strukturální úrovni regenerovat.

Tato diplomová práce má za cíl s pomocí EEG a programu sLORETA zjistit, k jakým změnám elektrické aktivity mozku dochází během haptického kontaktu modifikovaného zrcadlovou iluzí. Motivací k volbě tohoto tématu je fakt, že dotek je jedním ze základních prostředků komunikace mezi jedinci a ve fyzioterapii má vedle této role také značný diagnostický a terapeutický význam.

Přestože haptický kontakt využíváme ve fyzioterapii v různých formách a za různými účely prakticky denně, víme jen relativně málo o tom, jaké má neurofyziologické souvislosti. Věřím, že zjistíme-li, které oblasti mozku lze dotekem s využitím relativně jednoduchých principů zrcadlové terapie ovlivnit, můžeme pak lépe zacílit jeho využití v praxi.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Role haptického kontaktu v rehabilitaci

Dotek patří k základním nástrojům komunikace mezi jedinci. Díky tomu, že jej provázejí emocionální komponenty, hraje významnou roli při sociálních interakcích a projevech empatie (Bolognini, 2014). Ve zdravotnictví je dotek specifickým mediátorem kontaktu zdravotníků s pacientem. Zdravotníci jednotlivých oborů využívají dotek různými způsoby a za rozdílnými účely. Používají ho k vyšetření, projevují jím péči i pozornost a jeho prostřednictvím poskytují fyzickou úlevu. Například zdravotní sestry považují dotek za jeden z hlavních nástrojů své práce. Je pro ně nejen nezbytný k vykonávání praktických úkonů, ale vnímají ho také jako prostředek pro neverbální vyjádření starostlivosti, útěchy a empatie (Kelly, 2017).

Specifickou roli hraje dotek také ve fyzioterapii, protože se v tomto oboru stává médiem nejen komunikačním, ale také diagnostickým a terapeutickým. Pro fyzioterapeuty je dotek v podstatě nezbytný, nicméně často se skrývá za jinými výrazy, jako je palpce, fyzikální terapie, masáž apod. Fyzioterapeuti využívají haptický kontakt za různými účely. Může se jednat o asistenční dotek, přípravný dotek, dotek podávající nějakou informaci, pečující dotek, dotek jako součást terapeutické intervence a také dotek aplikovaný za účelem nějakou informaci získat. Haptický kontakt například pomáhá pacientům udržet rovnováhu a nabízí jim oporu a pocit bezpečí (Bjorbækmo, 2016).

Dotykem lze úspěšně ovlivňovat i vnímání bolesti. Na základě vrátkové teorie může mít dotek aplikovaný v dermatomu odpovídajícímu zdroji nocicepce analgetický efekt na spinální i supraspinální úrovni (Mancini, 2014).

Haptický kontakt v různých formách, ať už jde o manuální dotek či hlazení, kartáčování, poklep nebo vibrace, je v léčebné rehabilitaci hojně využíván v rámci mnoha metod a konceptů v konkrétní a jasně definované podobě. Jeho hlavním smyslem je facilitace prostřednictvím aference, ale také stimulace pozornosti a motivace (Kolář, 2012).

Například metoda propioceptivní neuromuskulární facilitace (PNF) využívá jako jeden z facilitačních mechanismů manuální kontakt. Pevný, ale nebolestivý manuální kontakt na kůži snižuje práh dráždivosti a prostřednictvím aference facilituje svaly pod danou kožní oblastí. Zároveň tento haptický stimul pomáhá ošetřovanému navést do správného směru pohybu (Holubářová, 2017).

Dotek je také nezbytnou součástí všech složek terapeutického konceptu manželů Bobathových. Pomocí manuálního kontaktu v rámci celodenního „handlingu“ mohou pečující osoby navodit, sledovat a korigovat automatickou i aktivní hybnost pacienta. K regulaci svalového tonu a optimalizaci reciproční interakce agonistů a antagonistů navíc koncept využívá facilitační a inhibiční principy technik „nesení váhy“, „placingu“ a „tappingu“, z nichž konkrétně manuální tapping je přímo aplikován za účelem exteroceptivní a proprioceptivní stimulace. Jeho složkami jsou potřásání, klepání, hlazení a tlak, které vyvolávají lokální i celkovou odpověď v organismu na neurofyziologickém podkladě (Kolář, 2012).

Také princip Vojtovy reflexní lokomoce využívá manuální stimuly k vybavení základních pohybových vzorů reflexní cestou. Tyto stimuly aplikované na přesně lokalizované zóny na trupu či končetinách vyvolávají změny v držení těla nebo pohybu ve smyslu reflexního otáčení nebo reflexního plazení (Pavlů, 2002).

Haptický kontakt pomáhá i v situacích, kdy s pacientem nelze komunikovat verbálně, tedy u osob s kvantitativní nebo kvalitativní poruchou vědomí. Specifickým konceptem komunikace a terapie takto nemocných je bazální stimulace, která využívá pro práci s pacienty všechny smysly včetně exterocepce a propriocepce. Zásadním prvkem tohoto konceptu je somatická stimulace, která prostřednictvím haptického kontaktu pomáhá pacientům s orientací v tělesném schématu, poskytuje jim vjemy z vlastního těla a zprostředkovává jim kontakt s okolím. Kupříkladu „iniciální dotek“ se stává pro osoby s alterací vědomí srozumitelným signálem, například pozdravem, a informuje je o zahájení nebo ukončení nějaké aktivity spojené s péčí o ně. Koncept bazální stimulace dále využívá promyšlená a účelná schémata somatické stimulace v závislosti na deficitu a potřebách konkrétního pacienta. Ať už je aplikován kterýkoli z typů somatické stimulace, je vždy kladen důraz na všechny kvality podávaného haptického kontaktu, tedy na sílu, tlak, rytmus, opakování a kontinuitu, aby byl dotek pro pacienta srozumitelný a příjemný (Dubová, 2017; Friedlová, 2007).

Princip aference využívá haptický kontakt také při metodě kontaktního dýchání, které je rovněž součástí konceptu bazální stimulace, nikoli však výlučně (Dubová, 2017; Friedlová, 2007).

Zdravotníci při své práci neustále pracují s osobním prostorem za účelem překonání sociálních bariér během péče, nicméně z hlediska pacienta se může snadno stát, že intenzivní fyzický kontakt překročí únosnou mez. V rámci poskytování zdravotní péče se

musí dotek uskutečňovat vždy v bezpečném prostředí a vyžaduje neustálé hlídání hranic jak fyzických, tak i osobních a profesionálních. Tyto hranice definují osobní prostor nebo zónu, která může být respektována, ale bohužel také narušována. Fyzické hranice zahrnují míru a způsob oblečení zdravotníka i pacienta, používání oddělených místností a zástěn a opírají se také o celkové prostředí a vybavení ordinace. Osobní hranice jsou definovány věkem, pohlavím, kulturním zázemím a dosavadní zkušeností obou stran. Důležitou roli také samozřejmě hraje, jaké části těla se zdravotník dotýká (Kelly, 2017).

Pacienti obecně dotek během zdravotní péče očekávají, a to dokonce i u odborníků, kteří jinak dotek běžně při své praxi nepoužívají, nebo se mu dokonce vyhýbají, například u psychologů. Ale otázka doteku může být také problematická, protože hranice mezi profesionálním a neprofesionálním dotekem je velmi tenká. Dotek sice je ve zdravotnictví zpravidla prostředkem péče, ale může sloužit také k obraně, kdy se stává nástrojem zachování fyzického odstupu mezi pacientem a zdravotníkem. Také může být vnímán coby nástroj vyjádření moci a nadřazenosti. Obecně je totiž dotek většinou iniciován spíše osobami ve vyšším postavení v rámci dané situace. Dotek může mít také nevyčtený sexuální podtext a i z tohoto důvodu se mu někteří zdravotníci, zvláště muži, vědomě vyhýbají. Je proto záhodno zacházet s dotekem vždy obezřetně a být vnímavý k verbálním i neverbálním signálům ze strany pacienta (Kelly, 2017).

2.2 Zrcadlové neurony

Zrcadlový systém je jedním z nejdůležitějších objevů neurověd v posledních desetiletích (Plata Bello, 2014). Zrcadlové neurony bývají označovány jako „buňky, které čtou myšlenky“ nebo „neurony, které utvářejí civilizaci“ a jejich objev je považován za „revoluci“ v chápání sociálního chování (Cook, 2014).

Zrcadlové neurony jsou v podstatě specifické buňky, které se aktivují během skutečného provádění účelného pohybu, ale také v situaci, kdy daný jedinec tento pohyb pouze pozoruje u někoho jiného (Rizzolati, 2016; Kilner, 2013).

Funkce zrcadlového systému je dáována do souvislosti především s pochopením sledované aktivity, napodobováním druhých a porozuměním řeči (Nyström, 2008), nicméně je k dispozici také mnoho studií, které přiřazují těmto buňkám i další funkce z pohledu různých oborů neurověd, psychologie i filosofie. Patří sem empatie, rozpoznávání emocí, anticipace záměru druhých, vývoj jazyka, manuální komunikace, komunikace znakovou

řečí, zpracování vjemů spojených s hudbou a mnoho dalších (Bauer, 2016; Cook, 2014; Nyström, 2008).

Naopak s dysfunkcí zrcadlového systému bývá spojováno široké spektrum poruch, jako je autismus, schizofrenie, Downův syndrom, roztroušená skleróza, ale také třeba nikotinismus a obezita (Cook, 2014).

Název „zrcadlové neurony“ je velmi výstižný, protože tyto buňky doslova zrcadlí sledovanou aktivitu druhé osoby na motorické kůře pozorovatele (Buccino, 2006).

2.2.1 Anatomie zrcadlového systému

Poprvé byly zrcadlové neurony objeveny ve ventrálním premotorickém kortexu (area F5) u makaků v roce 1992. Následující výzkumy prokázaly existenci nervových buněk se zrcadlicí schopností i v jiných částech mozku u opic i jiných druhů primátů a později také u člověka (Rizzolati, 2016; Kilner, 2013). Anatomická distribuce zrcadlových neuronů tedy není omezena pouze na premotorickou kůru mozku, tento tzv. fronto-parietální systém však zůstává hlavním centrem zrcadlové neuronové sítě a je na něj zaměřeno i nejvíce vědeckých studií. Nejčastěji se jedná o inferiorní frontální gyrus (IFG), který odpovídá Brodmannově aree (BA) 44, a inferiorní parietální lobulus (IPL) odpovídající BA 40. Tyto dvě oblasti jsou z pohledu zrcadlového systému označovány také jako „klasické“ (Plata Bello, 2014; Cook, 2014). U opic byla vedle toho zaznamenána zrcadlicí aktivita i v neuronech v primární motorické kůře a dorzální premotorické kůře. U člověka pak byly nalezeny jednotlivé neurony nebo jejich malé shluky odpovídající funkční charakteristice zrcadlových neuronů rovněž v dorzálním premotorickém kortexu, dále v superiorním parietálním lobulu, v kůře mozečku a také v sekundární motorické oblasti a kůře mediálního temporálního laloku. Tyto oblasti jsou v literatuře označovány jako „neklasické“ (Cook, 2014).

Vedle primární motorické kůry, která samozřejmě hraje klíčovou roli při exekuci volných pohybů, se zrcadlové neurony nacházejí i v jiných oblastech spojených s motorickými funkcemi ruky, nohy a úst vč. Broccova motorického řečového centra a v oblastech spojovaných s visceromotorickými projevy podmíněnými emocemi. Jejich lokalizace se nemusí vždy nutně shodovat s topografickou reprezentací jednotlivých částí těla (Sale, 2012; Buccino, 2006).

Ačkoli se zrcadlové neurony aktivují během provádění a sledování účelného pohybu, neznamená to, že jsou všechny tyto buňky motorickými neurony, a ani naopak, že mají všechny motorické neurony zrcadlící schopnosti (Caramazza, 2014).

2.2.2 Původ zrcadlového systému

Otázkou zůstává samotný původ zrcadlového systému a k odpovědi na ni přistupují odborníci ze dvou základních hledisek. Předmětem diskuze je, zda je vývoj zrcadlového systému důsledkem asociativního učení, nebo zda nám byl dán geneticky jako důsledek evolučního vývoje, který vybavil určitou populaci buněk mechanismem nutným pro plnění určité funkce (Ferrari, 2014).

Z pohledu asociativní teorie se zrcadlové neurony objevují během vývoje jako důsledek posilování senzomotorických spojení, které se původně vyvinuly jako součást vizuomotorické kontroly. Podle této teorie je například u dítěte motorický povel pro úchop asociován až s vizuálním vnímáním vlastní ruky. Simultánní aktivita zrakových a motorických neuronů tak může postupně posílit jejich propojení a následně se vyvine schopnost zobecnit vizuální vnímání vlastní činnosti a tím se činnost jiných osob stane spouštěčem aktivity motorických neuronů pozorovatele (Cook, 2014; Ferrari, 2014).

Zastánci druhého hlediska mají za to, že alespoň část zrcadlového systému je nám geneticky dána a je uzpůsobena své funkci jako důsledek přirozeného evolučního výběru (Ferrari, 2014). Předkové primátů, kteří měli lepší predispozice pro vývoj zrcadlového systému, byli úspěšnější, co se týče přežití a reprodukce, protože měli lepší schopnost porozumět chování a záměrům jiných jedinců (Cook, 2014).

V poslední době se naštěstí prosazují také modely, které obě hlediska vzájemně slučují a nesnaží se nutně jedno vyloučit druhým. Víme, že neuroplastické změny probíhají v mozku během celého života a zahrnují komplexní interakce vlivu prostředí i genové exprese. Také víme, že málokterý okruh v mozku je striktně zaměřen na jeden jediný účel a většina z nich má doplňkové funkce nebo se do vedlejších funkcí alespoň zapojuje. Tak například sítě motorických okruhů mohou být přímo zapojeny právě do procesů porozumění a napodobování (Ferrari, 2014).

2.2.3 Historie a vývoj teorie zrcadlových neuronů

Zajímavostí je, že změny EEG signálu v mozku jako reakce na sledovaný pohyb byly poprvé zaznamenány již v roce 1954 (Nyström, 2008), nicméně teprve v roce 1992 zdokumentoval tým G. di Pellegrina skutečnou odpověď konkrétních neuronů oblasti F5 v premotorické kůře na sledovaný pohyb, a to u makaků, jimž byly do mozku zavedeny mikroelektrody (di Pellegrino, 1992; Casile, 2013). Tento objev byl základem pro rozvoj nového směru výzkumu v neurovědách a v roce 1996 byly zveřejněny dvě zásadní studie, v nichž byly tyto specifické buňky již nazvány zrcadlovými neurony. Autory těchto studií byli V. Gallese a G. Rizzolatti, obě byly zaměřeny na výzkum premotorické kůry makaků a prokázaly, že zrcadlové neurony se aktivují nejen při vykonávání účelného pohybu, ale také při sledování podobné aktivity u druhého jedince. Ukázalo se, že korové oblasti zodpovědné za pohyb a sensorické vnímání se aktivují také během sledování pohybu a taktilní stimulace u druhých (Casile, 2013).

Další studie měly za cíl definovat roli a význam zrcadlového systému a zároveň se začaly postupně zaměřovat také na výzkum u lidí (Casile, 2013). U člověka samozřejmě nebylo z etických a technických důvodů možné využít stejné výzkumné metody jako u laboratorních zvířat, proto se pro výzkum se začaly využívat různé neinvazivní zobrazovací metody, jako je pozitronová emisní tomografie (PET), funkční magnetická resonance (fMRI), transkraniální magnetická stimulace, magnetoencefalografie, elektroencefalografie a další (Buccino, 2006; Ferrari, 2014).

První důkazy o existenci zrcadlového systému u člověka představili Fadiga et al. v roce 2008 s pomocí transkraniální magnetické stimulace a evokovaných potenciálů snímaných ze svalů ruky. Na tuto studii navázaly další neurofyziologické experimenty, které mj. dokázaly, že sledováním pohybu lze zvýšit excitabilitu kortikospinálních drah (Buccino, 2006).

Vědecké výzkumy potvrzují, že zrcadlové neurony nám pomáhají pochopit účel a smysl sledované činnosti (Casile, 2013). To znamená, že tento systém nereaguje na jakýkoli náhodný pohyb, který daný jedinec sleduje, ani se neaktivuje při pouhém pozorování předmětu spojovaného s konkrétní činností. Jeho aktivita je výrazně vyšší při sledování účelného cíleného pohybu (Buccini, 2006; Brunsdon, 2019). Zrcadlové neurony registrují záměr činnosti, nikoli samotnou svalovou aktivitu nebo změnu postavení kloubů (Rizzolatti, 2016). Jejich aktivita je také výraznější u jedinců, kteří mají s danou činností nějakou zkušenost a rozumí jejímu významu (Brunsdon, 2019; Bryant, 2019). Role

zrcadlových neuronů tedy souvisí se zkušeností a také se může lišit s věkem (Nyström, 2008; Bryant, 2019). Zaměření na účel dokazuje i studie, během níž testované osoby sledovaly komplexní pohyby, jako je chůze, lezení a manipulace s předměty. Například při sledování lezení se neaktivovaly oblasti registrující úchop, přestože ten byl součástí komplexní aktivity (Rizzolatti, 2016).

Zrcadlový systém reaguje nejen během vizuálního pozorování, ale zhruba 15 % zrcadlových neuronů se aktivuje i při zaslechnutí zvuku typického pro nějakou činnost. Tyto „audiovizuální zrcadlové neurony“ nám umožňují rozpoznat činnost druhých, i když máme pouze akustický vjem (Buccino, 2006). Například zrcadlové neurony v oblasti F5 reagují na rozlousknutí buráku, když tuto činnost testovaný jedinec pouze sleduje, když ji sleduje a zároveň slyší příslušný zvuk, ale dokonce i v situaci, kdy pouze slyší zvuk praskající skořápky (Rizzolatti, 2016). V lidském mozku se zrcadlové neurony aktivují navíc také v případě, kdy se o dané aktivitě pouze mluví, nebo si ji představujeme (Bauer, 2016).

To, že existují neuronové systémy, které se aktivují jak během provádění určité činnosti, tak při procesech porozumění smyslu činnosti sledované u někoho jiného, je známo už z klasických teorií kognitivních funkcí. Teorie zrcadlových neuronů se však opírá o specifická východiska, která vysvětlují charakter mechanismu propojení exekuce a pochopení účelného pohybu. Hlavním z nich je fakt, že aktivita zrcadlových neuronů má motorický charakter. Toto zjištění dokazuje, že motorický systém není zodpovědný pouze za provádění pohybu, ale podílí se spolu s abstraktními a symbolickými funkcemi mozku také na kognitivních procesech spojených s chápáním (Caramazza, 2014).

Dalším východiskem je, že zrcadlový systém je schopný zprostředkovat pochopení aktivity přímo, tedy bez nutnosti zapojení vyšších kognitivních procesů a inferenční integrace. Z toho vyplývá, že mapování sensoricky zprostředkovaných vjemů na odpovídající vzory v motorickém systému je automatické a přirozené a není přímo závislé na faktorech, jako je dosavadní přesvědčení, specifika dané situace apod. Zrcadlový systém je tak schopný pozorovanou činnost přímo spojit s motorickým programem, a to dokonce i v případě již zmíněného zaslechnutí zvuku charakteristického pro danou činnost. A v neposlední řadě je pochopení sledované činnosti zajištěno její simulací přímo v premotorické kůře pozorovatele (Caramazza, 2014).

Protože jsou zrcadlové neurony spojovány s učením, empatií a dalšími kognitivními funkcemi, nemohly uniknout pozornosti behaviorálních studií. Tyto neuropsychologické

studie například prokázaly, že pozorování pohybu významně zkracuje reakční čas potřebný k jeho samotnému provedení oproti situaci, kdy je pokyn k provedení pohybu znázorněn pouze symbolicky. Behaviorální studie nejen znovu potvrdily existenci zrcadlového systému u člověka, ale také prokázaly jeho schopnost facilitovat exekuci pohybu pomocí předcházejícího motorického pozorování (Buccino, 2006).

Zrcadlové neurony se za poslední desetiletí staly objektem zkoumání nejen pro neurovědy, ale také pro psychologii, etologii, sociologii a filosofii, a dokonce zaujaly celou řadu literárních autorů i laické populace. Důvodem je pravděpodobně fakt, že jejich objev posunul do popředí zájmu neurověd zkoumání mechanismů vzájemného porozumění a komunikace mezi jedinci. Vzhledem k tomu, že zrcadlové neurony jsou funkčně i anatomicky blízce spojeny s motorickým systémem, ukazuje se, že motorický systém hraje velmi důležitou roli v procesech chápání chování a záměrů druhých. Podle tohoto pohledu je naše schopnost porozumět záměrům druhých založena na schopnosti posoudit jejich duševní rozpoložení a připsat mu kauzální roli při pozorovaném chování. Tato teorie ve své podstatě nepopírá tradiční analytický pohled, podle kterého rozumíme jednání jiných na základě porovnávání jejich chování s naší vlastní zkušeností. Naopak, potvrzuje jeho platnost, avšak vychází z poznání, že porozumění přes motorický systém je přímé a nevyžaduje kognitivní simulaci sledované aktivity (Ferrari, 2014).

2.2.4 Taktilní zrcadlový systém

Princip zrcadlení je možné vysledovat i v somatosenzorickém systému. Sledování doteku u druhé osoby může aktivovat příslušné oblasti v mozku, čímž se vlastně sledovaný dotek mapuje na somatosenzorickou kůru pozorovatele (Bolognini, 2012; Coll, 2015).

Taktilní zrcadlení připomíná motorický zrcadlový systém, nicméně se během něj aktivují oblasti zodpovědné za zpracovávání somatosenzorických vjemů, tedy především primární senzická kůra S1 a sekundární senzická oblast S2. Tento systém nám může pomoci předpovídat důsledek doteku na vlastním těle, ale také porozumět účinku taktilního stimulu, který zakouší někdo jiný (Bolognini, 2012).

Tuto teorii potvrdila také studie Coll et al. (2015), v níž autoři prostřednictvím EEG porovnávali aktivitu somatosenzorické kůry při sledování a exekuci jednoduché činnosti, přičemž v jedné části experimentu byl pohyb provázený taktilním stimulem a v druhé nikoli. Autoři této studie se na základě výsledků dokonce domnívají, že somatosenzorické

zrcadlení hraje v zrcadlícím mechanismu jako takovém klíčovou roli. Jinými slovy, že spouštěčem reakce zrcadlových neuronů na motorickou činnost je především sledování taktilního stimulu spojeného s touto činností (Coll, 2014).

Taktilní zrcadlový systém i míra jeho excitability jsou individuální a do jisté míry závisí na schopnostech kognitivní i afektivní empatie (Gillmeister, 2014). U některých lidí může být tento systém dokonce hyperaktivní, což se projevuje jako zrcadlová synestézie, tedy pociťování fantomových dotyků nebo jiných taktilních vjemů, které jsou podávány někomu jinému (Bolognini, 2014). Zrcadlová synestézie se projevuje asi u 1,6 % lidí a je způsobena zvýšenou aktivací neuronových sítí mezi frontálními a parietálními oblastmi, které se mj. účastní procesů odlišování sebe od druhých (Gillmeister, 2014).

Ramachandran et al. (2009) ve své studii zkoumali, zda osoby s amputací horní končetiny pocítí fantomový vjem při sledování doteku, který byl podán na odpovídající zdravou končetinu někoho jiného. Ve výsledku všichni 4 testovaní pacienti tento fantomový dotek opravdu zaznamenali. Autoři to přisuzují chybějícím aferentním signálům z amputované končetiny, které by za normálních okolností odpověď taktilního zrcadlového systému inhibovaly, a ta by tak nemohla dosáhnout kognitivního prahu vědomí (Ramachandran, 2009).

Zrcadlení doteku pozorovaného na druhé osobě může také snížit práh citlivosti k podnětům z vlastního těla. Člověk se tak díky vizuálnímu vstupu může stát citlivějším k modalitám taktilní percepce na principu sumace podnětů. I díky tomu má somatosenzorický zrcadlový systém, stejně jako ten motorický, potenciál pro klinickou praxi (Gillmeister, 2014).

Od okamžiku jejich objevu prošlo zkoumání zrcadlových neuronů dynamickým vývojem a z dnešního pohledu lze říci, že zrcadlící mechanismus zdaleka není výlučnou vlastností premotorického kortexu, ale že se jedná o jednu ze základních funkcí mozku jako takového. Toto zjištění není nikterak překvapující, uvědomíme-li si, že mozek hraje hlavní roli při plánování a řízení u všech organismů, které jsou závislé na objevování okolního světa a přizpůsobování se všem okolním výzvám, příležitostem a hrozbám (Rizzolati, 2016).

2.2.5 Využití zrcadlového systému v rehabilitaci

Zrcadlový systém lze v klinické praxi využít u široké škály deficitů. Jeho principy lze uplatnit u psychiatrických pacientů, lidí s vývojovými a vrozenými poruchami, jako je

dětská mozková obrna nebo autismus, ale také u degenerativních onemocnění. K těm patří extrapyramidové poruchy (m. Parkinson), kognitivní poruchy (m. Alzheimer) a další. Terapií zrcadlového systému lze ovlivnit také chronické bolestivé stavy, jako je komplexní regionální bolestivý syndrom nebo fantomové bolesti. Rehabilitace založená na sledování pohybu může coby mentální trénink také sloužit jako prevence změn v mozku, které mohou být negativním důsledkem imobilizace u lidí, kteří se nemohou nebo nesmějí hýbat (Plata Bello, 2014).

Hlavním a nejčastějším využitím teorie zrcadlových neuronů v rehabilitaci ale zůstává obnova motorických funkcí, a to nejen na končetinách, ale také například v případech motorické afázie. I když etiologie motorických deficitů může být různá, nejvíce studií zkoumajících zrcadlové neurony v klinické praxi je zaměřena na pacienty se získaným poškozením mozku, a to především na ty po cévní mozkové příhodě (CMP) (Plata Bello, 2014; Sale, 2012).

Využití zrcadlového systému v rehabilitaci má tu výhodu, že zrcadlové neurony se aktivují, jak bylo vysvětleno výše, nejen při samotném vykonávání pohybu, ale také při jeho sledování, napodobování a motorické představě. Všechny tyto procesy totiž fyziologicky slouží k motorickému učení a lze proto předpokládat, že u pacientů s motorickým deficitem mohou přispět k reedukaci pohybového vzoru (Sale, 2012; Stefan, 2005). Navíc aktivace zrcadlového systému při sledování aktivity vede ke zvýšení excitability kortikospinálních drah a tím facilituje mechanismy vedoucí k obnovení motorických funkcí (Plata Bello, 2014). Z toho vyplývá, že i když není možné požadovaný pohyb aktivně provést, jeho pouhé pozorování nebo představa aktivují prostřednictvím mentálního tréninku motorickou kůru a přispívají tak k motorickému učení a rozvoji motorické paměti (Sale, 2012). Z toho vyplývá, že zrcadlový systém umožňuje prostřednictvím aktivace motorické kůry během představy pohybu jakési vnitřní trénování motorické představivosti, které je základem pro následný trénink samotné motorické dovednosti (Buccino, 2006).

Terapeutické využití poznatků o zrcadlových neuronech v léčbě neurologických onemocnění bylo poprvé aplikováno v práci týmu Ferdinanda Binkovského na neurologické univerzitní klinice v Lübecku v roce 2003. Ve své studii se autoři snažili prostřednictvím zrcadlení aktivovat premotorické neurony u pacientů po cévní mozkové příhodě a využít jejich aktivaci k facilitaci neuronů motorických, a tedy k léčbě

motorického deficitu. Pacienti v klinické studii nejdříve pozorovali pohyb na videonahrávce a následně se jej snažili napodobit, resp. znovu se jej naučit (Bauer, 2016).

2.3 Neuroplasticita

Základním teoretickým východiskem pro využití zrcadlového systému v rehabilitaci je neuroplasticita mozku (Sale, 2012). U dětí je neuroplasticita přirozenou podmínkou vývoje centrální nervové soustavy (CNS). Jedná se o komplexní, geneticky podmíněný proces, který je regulován homeostatickými mechanismy a formován vnitřními i vnějšími vlivy. Vývojová neuroplasticita zahrnuje neurogenezi, migraci nervových buněk, formování synapsí a strukturální i funkční specializaci neuronových sítí. Tyto procesy jsou podmínkou pro schopnost adaptace a pro dosahování milníků v psychomotorickém vývoji (Ismail, 2016).

Až do 60. let 20. století byl všeobecně přijímán názor, že centrální nervová soustava v dospělosti již žádnými změnami neprochází (Hötting, 2013). Dnes již ale máme k dispozici mnohé studie, které dokazují, že i v dospělosti má CNS fyziologickou schopnost reorganizace (Bryant, 2019). Mozek je do jisté míry schopen funkčně i strukturálně reagovat na vnější i vnitřní vlivy a změny. Tyto procesy jsou komplexní a zahrnují změny chemické, ve smyslu produkce neurotransmiterů, i změny strukturální, ve smyslu vzniku nových synapsí a změn v organizaci synaptických spojení. Neuroplasticita coby regenerační proces probíhá na několika úrovních. Základem je úroveň molekulární, v pomyslné pyramidě se nad ni řadí úroveň subcelulární (synaptická) a dále celulární. Nejvýše stojí úroveň neuronových okruhů a sítí (Gulyaeva, 2016). Například asociativní učení způsobuje změny v produkci neurotransmiterů, které spouští kaskádu neurochemických procesů vedoucích až ke strukturálním změnám, jako je vznik nových synapsí a změna organizace synaptických spojení (Hötting, 2013).

Neuroplasticita je přirozená u zdravých lidí například během učení, klíčovou roli ale hraje právě i během rehabilitace mozku po jeho poškození (Hötting, 2013, Gulyaeva, 2017). Teorie korové reorganizace vychází z toho, že včasné intenzivní opakované cvičení zaměřené na účel pohybu je vhodnou strategií pro obnovení funkcí a snížení deficitu (Sale, 2012). Strukturu i funkci mozku lze tedy úspěšně formovat trénováním jeho aktivity, a to nejen v raném věku (Bryant, 2019).

Neuroplasticitu využívá mnoho terapeutických konceptů v neurorehabilitaci. Patří mezi ně metoda vynuceného používání (constrained-induced movement therapy), pohyb v představě, robotický trénink, virtuální realita a v neposlední řadě zrcadlová terapie (mirror therapy) (Arya, 2016; Sale, 2012).

2.4 Zrcadlová zpětná vazba

Mentální trénink lze realizovat nejen sledováním pohybu či aktivity u jiné osoby, resp. z videozáznamu, ale k jeho provedení lze využít i iluzi zprostředkovanou zrcadlem. První klinické využití zrcadlového vizuálního stimulu bylo aplikováno k léčbě fantomových bolestí u pacienta s amputací (Ramachandran, 1996). Pacientovi byla pomocí zrcadla překryta chybějící končetina odrazem té zdravé. Stejná metoda byla následně využita k léčbě komplexního regionálního bolestivého syndromu. Sledování aktivity zdravé končetiny v zrcadle bývá zahrnuto do rehabilitace i u pacientů po CMP k obnovení motorické funkce končetin paretických (Sale, 2012).

Při sledování pohybu jedné končetiny v zrcadle se zvyšuje aktivita v primární motorické oblasti M1 v kontralaterální mozkové hemisféře, i když příslušná končetina zůstává v klidu. (Debnath, 2016). Léčebná rehabilitace tímto mechanismem využívá principu zrcadlové zpětné vazby (mirror visual feedback – MVF) (Deconinck, 2014).

2.4.1 Teoretická východiska

Podkladem pro první využití zrcadlové zpětné vazby v roce 1996 při léčbě fantomových bolestí týmem V. S. Ramachandrana byla fyziologická integrace percepce a pohybu, konkrétně reaferece, což je v podstatě zpětná aferentní informace spojená s aktivním pohybem. Tato v principu proprioceptivní informace stojí proti exaferenci, což je zpětná aferentní informace spojená s pohybem pasivním, tedy s pohybem iniciovaným externím zdrojem. Aby mozek dokázal rozlišit tyto dvě sensorické informace, má se za to, že každý motorický povel je doprovázen paralelním signálem, který nese informaci o očekávané sensorické zpětné vazbě odpovídající danému pohybu. Porovnáním této kopie a skutečného aferentního vjemu dokáže mozek rozlišit signály pocházející z vlastního těla od těch, které mají původ mimo organismus. V důsledku toho je motorický povel opakovaně modifikován

tak, aby bylo dosaženo očekávané zpětné aferentní informace. Tato konfliktní situace může např. u pacientů s amputací vést až k bolestivým stavům.

Cílem zrcadlové zpětné vazby je v takových případech obnovení aferentně-eferentní smyčky, která byla porušena. Optická iluze zrcadlení vlastně přesvědčí pacienta o tom, že jeho amputovaná končetina je intaktní, a to přinejmenším díky tomu, že zrak dominuje ostatním smyslům. Tento mechanismus bývá využíván nejen pro léčbu fantomových bolestí, ale pro všechny unilaterální poruchy, ať už sensorické, či motorické, vč. hemiparézy po CMP (Deconinck, 2014; Ramachandran, 2019).

Teoretická východiska pro účinky zrcadlové zpětné vazby na mozkové funkce stojí na třech základních hypotézách (Deconinck, 2014). První z nich vychází z teorie zrcadlových neuronů, která je popsána výše s dostatkem referenčních odkazů. Ve stručnosti jde o mentální trénink, který facilituje aktivaci motorické kůry a činnost kortikospinálních drah (viz kapitola 2.2.3).

Podle druhé hypotézy by měla zrcadlová zpětná vazba facilitovat zapojení ipsilaterálních motorických drah, které začínají ve zdravé hemisféře a projikují do postižených oblastí těla. Jinými slovy MVF může demaskovat „spící“ ipsilaterální projekční dráhy, které jsou jinak fyziologicky inhibovány (Deconinck, 2014; Ezendam, 2009).

Podle třetí hypotézy by měla iluze spojená s MVF zvýšit pozornost soustředěnou na skrytou paretickou končetinu a předejít tak jejímu naučenému nepoužívání. Podobně jako metoda „vynuceného používání paretické končetiny“ může takto zvýšená pozornost zaměřená na obraz „uzdravené“ končetiny přispět k aktivaci motorických sítí (Deconinck, 2014; Dohle, 2009).

2.4.2 Mirror therapy – zrcadlová terapie

Mirror therapy (MT) neboli zrcadlová terapie je jednoduchá, ekonomicky nenáročná, neinvazivní metoda, která napomáhá obnovení motorických funkcí na neurofyziologickém podkladě. Využívá se v neurorehabilitaci jako doplňková metoda přispívající k léčbě širokého spektra poruch. Vedle centrálních paréz po získaném poškození mozku jsou to fantomové bolesti po amputacích, revmatoidní artritida, komplexní regionální bolestivý syndrom a parézy periferních nervů. MT lze využít ke zlepšení motorických i sensorických funkcí, snížení bolesti či k ovlivnění neglect syndromu. Podle některých studií může mít MT pozitivní vliv také na spasticitu (Arya, 2016; Jančíková, 2018; Rothgangel, 2013).

Zrcadlová terapie se snaží využít neuroplasticity mozku, tedy facilitovat vytváření nových synaptických spojení a posilování těch stávajících. Schopnost CNS obnovovat tato spojení je závislá na jejich tréninku, který je možný právě aktivací zrcadlových neuronů v opačné hemisféře na základě biofeedbacku z optické iluze poskytnuté zrcadlem (Jančíková, 2018; Ramachandran, 2019).

MT je jediná terapie, při které je ovlivňovaná končetina v klidovém stavu, díky čemuž je obnovení motorických funkcí zajištěno určitou neuronální reorganizací. Jedná se o obnovení motorických funkcí v jejich „podstatě“, a nikoli o pouhý trénink motorického chování. U zdravých jedinců vyvolává zrcadlová terapie rozsáhlou mozkovou aktivitu, které prakticky nelze jiným způsobem dosáhnout. V příslušné mozkové hemisféře (kontralaterální k pohybující se končetině) dochází nejen k aktivitě primární motorické kůry, ale také k alteraci inter- a intrahemisférické inhibice. Také se objevuje svalová aktivita v druhé končetině. U pacientů s hemiparézou po poškození mozku ovlivňuje zrcadlová terapie postiženou polovinu mozku díky podpoře komunikace mezi hemisférami, vyvažuje asymetrickou elektrickou aktivitu a aktivuje specifické mozkové oblasti jako precuneus a posteriorní část gyru cinguli. Během terapie se zapojují také oblasti okcipitálního laloku, dorzální frontální oblast, corpus callosum, dále premotorická kůra obou hemisfér, která se podílí na kontrole pohybu, primární motorická kůra, která je hlavním hráčem při exekuci pohybu, primární somatosenzorická kůra, která se zapojuje do procesů plánování pohybu, a mozeček, který hraje důležitou roli při kontrole a motorickém učení. Motorické oblasti postižené hemisféry dostávají vizuomotorické informace přes parieto-okcipitální síť. Významnou roli hraje také systém zrcadlových neuronů (Arya, 2016).

Aplikace zrcadlové terapie je poměrně jednoduchá, a možná i proto neměla po dlouhou dobu žádná přesně definovaná pravidla. K dispozici je velké množství studií, při nichž byla využita zrcadla nebo zrcadlové boxy různých velikostí a konstrukce a u nichž chybí jakékoli další specifikace podmínek. Existuje také mnoho protokolů zabývajících se terapeutickými postupy zaměřenými na cvičební jednotku jako takovou, nicméně až do roku 2013 neexistoval žádný manuál, který by jasně definoval obecné zásady a doporučení pro aplikaci této metody. Teprve Andreas Rothgangel a Susy Braun vypracovali podrobný manuál, který publikovali v roce 2013 v německém Mnichově (viz příloha č. 4). Tento protokol nebyl dodnes překonán a většina publikací na toto téma z něj vychází (Rothgangel, 2013; Vyhnálková, 2016).

V praxi vyžaduje využití zrcadlové terapie splnění několika podmínek. V první řadě musí být pacient natolik kognitivně zdatný, aby pochopil účel terapie, porozuměl instrukcím a dokázal se soustředit po dobu potřebnou k provedení intervence. Je proto nutné brát ohled na kognitivní schopnosti pacienta a také na jeho aktuální stav, např. únavu. Další podmínkou je, aby pacient netrpěl zrakovým deficitem. Také u případů s neglect syndromem je potřeba dbát na to, aby byl pacient schopen alespoň otočit hlavu směrem k zrcadlu a po dobu intervence udržet pozornost k postižené straně. Z hlediska motoriky je nutné, aby byl ošetřovaný schopen po dobu terapie samostatně sedět na židli nebo vozíku. Zdravá končetina by měla být fyziologicky pohyblivá bez bolesti či jiných omezení (Rothgangel, 2013).

Během samotné intervence záleží na důvěryhodnosti optické iluze způsobené zrcadlem, proto by na sobě pacient neměl mít žádné šperky ani hodinky. Výrazné jizvy, znaménka a tetování je také vhodné zakrýt (Rothgangel, 2013).

MT s sebou nese i určitá rizika v podobě vedlejších účinků. Pohled na dvě zdravé končetiny může u pacienta vyvolat silnou emocionální odezvu. V některých případech se mohou dostavit i vegetativní reakce, jako je závrať, nevolnost, pocení apod. V takových případech je možné terapii přerušit nebo zkrátit dobu jejího trvání, dokud si pacient na iluzi nezvykne (Rothgangel, 2013).

Velikost zrcadla se studie od studie liší, nicméně obecně platí, že zrcadlo by vždy mělo být dostatečně velké, aby zakrylo celou končetinu a aby v něm pacient mohl pohodlně sledovat celý odraz končetiny opačné. Materiál a povrch zrcadla musí zajišťovat odraz bez deformací a jeho hrany by měly být upraveny s ohledem na bezpečnost. Umístění zrcadla je zpravidla sagitálně ke středové ose těla, záleží však na pacientovi, aby polohu obou končetin a celého těla upravil tak, aby byla iluze co nejvěrnější. Je výhodné pro terapii používat stůl s nastavitelnou výškou (Rothgangel, 2013; Jančíková, 2018).

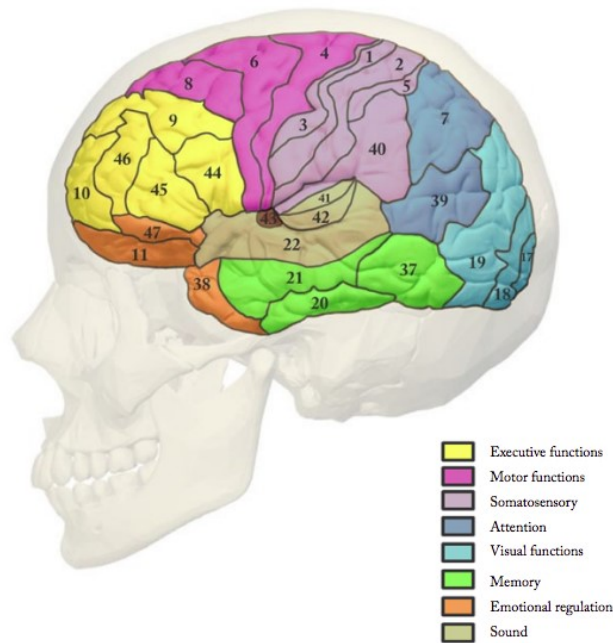
Terapii je vhodné provádět v klidné místnosti bez rušivých vlivů. Na začátek každé jednotky se doporučuje nechat pacienta po dobu dvou minut sledovat odraz zdravé končetiny v zrcadle a navodit si tak pocit, že se na svou opačnou končetinu dívá skrze čiré sklo. Cvičební jednotka, její délka a frekvence, stejně jako použití pomůcek vždy závisí na konkrétním cíli terapie a stavu pacienta (Rothgangel, 2013).

2.5 Brodmannovy arey

Je známo, že lidský mozek je anatomicky i funkčně velmi komplexní. Je to hlavní řídicí a integrační orgán nervové soustavy, která zajišťuje fungování celého organismu a jeho interakce s okolím (Ambler, 2006; Dylevský, 2009).

Povrch mozkových hemisfér tvoří kůra silná několik milimetrů skládající se ze šesti vrstev neuronů. Každá vrstva obsahuje různé typy buněk v různém poměru z hlediska morfologie i funkce. Mozková kůra je zvrásněna záhyby a rýhami (sulci), což značně zvětšuje její reálnou plochu. Hlubší rýhy rozdělují každou hemisféru na jednotlivé laloky (lobi), které se dále skládají z menších závitů (gyri). Každá hemisféra je tvořena čtyřmi laloky – lobus frontalis, lobus parietalis, lobus temporalis a lobus occipitalis. Prostorově je kůra poskládána z políček neuronů, které společně zajišťují konkrétní funkce coby korová centra (Ambler, 2006; Dylevský, 2009).

Každé centrum mozkové kůry zajišťuje konkrétní funkce, nicméně jednotlivá centra spolupracují v komplexních interakcích prostřednictvím synaptických drah a sítí. Základní orientaci v mozkové kůře poskytuje Brodmannova cytoarchitektonická mapa (viz obrázek č. 1), jejíž první verzi sestavil německý neurolog Korbinian Brodmann již v roce 1909. Vycházel při tom z rozdílné struktury a typologie buněk v histologických řezech jednotlivých korových oblastí. Brodmannova mapa slouží dodnes jako orientační vodítko při mnoha výzkumech, přestože je z podstaty spíše didaktická, než exaktní. Hranice korových polí jsou totiž ve skutečnosti neurčité a stejně jako jejich rozsah i značně individuální a v pravé a levé hemisféře různé. Vedle toho je značná část povrchu kůry skryta v záhybech a tato třetí dimenze v Brodmannově 2D mapě není zohledněna. Existují i jiné mapy mozkové kůry a neuronových sítí, ale Brodmannova mapa zůstává dodnes nejužívanější, mj. i pro svou relativní jednoduchost (Koukolík 2012; Zilles, 2018).



Obrázek 1: Brodmannovy arey (Cortical Functions: Reference, 2012)

Brodmann vydal na začátku 20. století několik verzí své mapy, kterou několikrát přepracoval a zpřesnil. Nakonec popsal v mozku primátů 11 regionů rozdělených dále na 52 okrsků (areae), nicméně u člověka rozlišujeme pouze 43 z nich, a proto ani posloupnost jejich číslování není v lidském mozku kontinuální (viz tabulka č. 1). Cílem Brodmannovy práce bylo propojit histologické nálezy a evoluční předpoklady s funkcí jednotlivých lokalit v mozkové kůře (Dylevský, 2009; Judaš, 2012; Zilles, 2018; Mysliveček, 2009).

Tabulka 1: Brodmannovy arey, přehled základních funkcí (Mysliveček, 2009)

Area	Funkce	Lokalizace
1, 2, 3, 43, 2s	somatosenzorická, chuťová	postcentralis
4, 6, 4s	motorická	praecentralis
8, 9, 10, 11, 44, 45, 46, 47, 8s	asociační, volní úkony	frontalis
13, 14, 15, 16	integrační	insularis
20, 21, 22, 36, 37, 38, 41, 42, 52	sluchová	temporalis
5, 7, 39, 40	asociační, somestetická	parietalis
17, 18, 19, 19s	zraková	occipitalis
23, 24, 31, 32, 33	mimovolní, limbický systém	cingularis
26, 29, 30	mimovolní, limbický systém	retrospleniali
27, 28, 34, 35, 48, 51	mimovolní, paměť, čich (34)	hippocampica
area olfactoria trigonum olfactorium	čich	olfactoria

2.6 Elektroencefalografie

Elektroencefalografie (EEG) patří mezi metody funkčního vyšetření mozku. Umožňuje neinvazivně snímat elektrickou aktivitu neuronů, která je základním projevem jejich činnosti. U lidí bylo EEG poprvé použito v roce 1920. Hans Berger již tehdy popsal dva typy mozkových vln, alfa a beta (Orel, 2017). Na jeho práci navázali další a metoda prošla významným vývojem. Dnes se běžně rozlišují čtyři, resp. pět základních frekvencí – alfa 8–12,5 Hz, beta 12,5–30 Hz, théta 4–8 Hz a delta 0–4 Hz. Pátou frekvencí je pásmo gama o frekvenci 30–70 Hz, které je součástí pásma beta (Pánek, 2016).

Elektrická aktivita mozkové kůry je dána sumací postsynaptických a akčních potenciálů neuronů. Mozková kůra coby elektrický vodič má dvě základní vlastnosti – stejnosměrný potenciál a impedanci. Stejnosměrný potenciál odpovídá rozdílu potenciálů v tělech a výběžcích neuronů. Významná je u něj polarita a stabilita. Impedance je dána odporem tkáně proti střídavému proudu, jejíž absolutní hodnota závisí na jeho frekvenci (Orel, 2017). Elektrická aktivita je produktem součinnosti neuronů thalamu a mozkové kůry, přičemž thalamus generuje rytmus její frekvence (Fáber, 2001).

Elektroencefalograf zaznamenává sumaci oscilací elektrické aktivity neuronů především z povrchu mozku (Orel, 2017). K její registraci se používají speciální EEG čepice se zabudovanými elektrodami, pod které je pro optimalizaci odporu nutno aplikovat vodivý gel. Elektrod je celkem 19 a jsou na čepici rozmístěny dle mezinárodního systému 10/20. Elektrody jsou pravidelně distribuovány mezi čtyřmi body. Těmito body jsou v sagitální rovině nasion (kořen nosu) a inion (protuberantia occipitalis externa) a v rovině frontální jsou to dva protilehlé body pod zevními zvukovody. Pomyslná elipsa mezi těmito body je rovnoměrně rozdělena na úseky o velikost 10 nebo 20 procent z celkové vzdálenosti, v níž jsou uloženy elektrody (Pánek, 2016).

Jednotlivé elektrody jsou označeny písmenem a číslicí odpovídající jejich uložení. Elektrody jsou uloženy v sagitální rovině laterálně, paramediálně nebo mediálně a jejich označení má svou logiku. Písmena reprezentují lokalizaci; Fp – frontopolárně, F – frontálně, C – centrálně, P – parietálně, T – temporálně, O – okcipitálně, A1 a A2 jsou ušní svody. Číslované jsou elektrody zleva doprava v každé rovině zvlášť, přičemž liché číslovky jsou určeny pro levou hemisféru a sudé pro pravou. Spojení mezi elektrodami je bipolární, nebo unipolární, tedy spojení jedné elektrody s nulovou G elektrodou. Spojení

elektrod A1 a A2 je tzv. pseudounipolární a pro svoji relativní spolehlivost se často využívá i v následném zpracování EEG křivky v počítačových programech (Pánek, 2016).

EEG záznam se vyhodnocuje vizuálně a zahrnuje hodnocení výskytu jednotlivých frekvencí ve vztahu k jednotlivým mozkovým regionům a stavu lucidity vyšetřovaného (Fáber, 2001).

2.7 sLORETA

EEG registruje elektrickou aktivitu neuronů, nicméně neumožňuje přesně lokalizovat její zdroj. Vzniká tak inverzní problém, kdy potřebujeme z naměřených potenciálů vypočítat distribuci primární proudové hustoty z postsynaptických procesů v neuronech. Řešení inverzního problému, tedy zobrazení elektrické aktivity mozku na základě povrchového měření, je klíčové k lokalizaci jejího zdroje (Pascual-Marqui, 2002; Jatoi, 2014).

Jako první se tento problém pokusili vyřešit Hämäläinen a Ilmoniemi v roce 1984, nicméně jejich „minimum norm solution“ neposkytovalo dostatečnou přesnost v lokalizování hlubokých zdrojových struktur. Efektivnější řešení přineslo až představení systému „low resolution brain electromagnetic tomography“ (LORETA) v roce 1994 s velmi nízkou chybou lokalizace. Aktuálně je nejpřesnější metodou systém „standardized low resolution brain electromagnetic tomography“ (sLORETA), který lokalizuje zdrojovou aktivitu na základě zobrazení standardizované proudové hustoty. Autor sLORETA, R. D. Pascual-Marqui, uvádí, že se jedná o metodu s nulovou chybou lokalizace zdroje elektrické aktivity (Pascual-Marqui, 2002; Rakusa, 2018).

Metoda je založená na výpočtu proudové hustoty v celém objemu mozku. Distribuce proudové hustoty je počítána v prostorových objemových jednotkách, voxelech. Program sLORETA stanovuje proudové hustoty celkem v 6430 voxelech s prostorovým rozlišením 5 mm. K lokalizaci voxelů v šedé hmotě mozku používá sLORETA Talairachův atlas mozku a digitální pravděpodobnostní atlas mozku. Výstupem je 3D model mozku zobrazující proudovou distribuci aktivity neuronů (Pánek, 2016; Jatoi, 2014).

Zatímco zobrazovací metody jako pozitronová emisní tomografie (PET) a funkční magnetická rezonance (fMRI) poskytují přesnější prostorové rozlišení, sLORETA ve srovnání s těmito metodami přináší přesnější rozlišení časové. I proto je stále častěji využívána mj. v oblasti výzkumu kognitivních a řídicích funkcí (Pánek, 2016).

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíle práce

Cílem této práce je vyhodnotit změny intracerebrální zdrojové aktivity v sLORETA zobrazení během haptického kontaktu na ruku modifikovaného zrcadlovou iluzí v porovnání s klidovým stavem s otevřenými očima a určit přesnou lokalizaci zjištěné zdrojové aktivity.

3.2 Úkoly práce

1. Zpracování rešerše odborné literatury s převahou zahraničních zdrojů na téma haptický kontakt, zrcadlové neurony, Brodmannovy arey, EEG a sLORETA programu.
2. Stanovení metodického postupu a výběr probandů pro experimentální část.
3. Realizace vlastního měření.
4. Analýza a vyhodnocení získaných dat.
5. Zpracování diskuze, v níž budou stanovené hypotézy konfrontovány s odbornou literaturou, a stanovení závěru.

3.3 Výzkumné otázky

V1: Existuje registrovatelná změna v mozkové aktivitě hodnocené pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlovou iluzí během taktilní stimulace obou rukou oproti klidovému stavu?

V2: Existuje registrovatelná změna v mozkové aktivitě hodnocené pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlovou iluzí během taktilní stimulace levé ruky situované před zrcadlem oproti klidovému stavu?

V3: Existuje registrovatelná změna v mozkové aktivitě hodnocené pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlovou iluzí během taktilní stimulace pravé ruky skryté za zrcadlem oproti klidovému stavu?

V4: Existuje registrovatelná změna v mozkové aktivitě hodnocené pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlovou iluzí bez taktilní stimulace oproti klidovému stavu?

3.4 Hypotézy

H1: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu na obě ruce a klidovým stavem s otevřenými očima.

H2: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu na levou ruku situovanou před zrcadlem a klidovým stavem s otevřenými očima.

H3: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu na pravou ruku skrytou za zrcadlem a klidovým stavem s otevřenými očima.

H4: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí bez podání haptického stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima.

3.5 Metodika

3.5.1 Charakteristika výzkumného souboru

Do výzkumu bylo zařazeno celkem 10 probandů, 5 mužů a 5 žen ve věkovém rozmezí 23 až 42 let (viz tabulka č. 2). Jednalo se o zdravé dospělé s dominantní pravou HK. Kontraindikací pro zařazení do výzkumu bylo závažné neurologické onemocnění a postižení zraku. Všichni probandi se do výzkumu přihlásili dobrovolně a byli předem seznámeni s průběhem experimentu. Účastníci podepsali informovaný souhlas (viz příloha č. 2). Výzkum vč. znění informovaného souhlasu byl schválen Etickou komisí FTVS UK pod jednacím číslem 115/2019 (viz příloha č. 1).

Tabulka 2: Seznam probandů a vylosované pořadí modifikací

Pořadí	Proband	Pohlaví	Věk	Pořadí modifikací
1.	J. H.	žena	24	2, 3, 4, 1
2.	J. K.	muž	40	1, 2, 3, 4
3.	E. G.	žena	41	2, 1, 3, 4
4.	J. H.	muž	34	3, 2, 1, 4
5.	E. K.	žena	33	1, 4, 2, 3
6.	M. D.	muž	42	3, 2, 1, 4
7.	M. K.	muž	37	3, 2, 1, 4
8.	L. G.	žena	39	2, 3, 4, 1
9.	D. D.	žena	23	2, 4, 3, 1
10.	T. R.	muž	31	3, 1, 4, 2

3.5.2 Použité metody

Měření aktivity mozku bylo provedeno pomocí EEG přístroje Wireless EEG Nicolet. Ke snímání byla použita speciální čepice Electro-Cap s 19 zabudovanými elektrodami (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T5, T3, C3, Cz, C4, T4, T6, P3, Pz, P4, O1, O2). Elektrody jsou na čepici rozmístěny dle mezinárodního systému 10/20. K optimalizaci odporu byl pod elektrody aplikován vodivý gel. Vzorkovací frekvence byla 500 Hz, pásmová propustnost 0,5–70 Hz a impedanční odpor pod 10 k Ω .

K modifikaci haptického kontaktu bylo využito zrcadlo o rozměrech 55 x 40 cm, umístěné na stole sagitálně před tělem testované osoby. Podmínky experimentu se řídily protokolem vypracovaným Rothgangelem et al. v roce 2013 (viz příloha č. 4). Zrcadlo bylo

orientováno proti bílé zdi tak, aby se v něm odrazilo co nejméně předmětů. Testované osoby neměly na ruce hodinky ani šperky (viz obrázek č. 2).



Obrázek 2: Poloha probanda s nasazenou EEG čepicí a umístění zrcadla během měření

3.5.3 Měření a sběr dat

Měření probíhalo 29. a 30. května 2019 v Kineziologické laboratoři FTVU UK. Každý den bylo změřeno 5 probandů. Průměrná doba měření jedné osoby byla 60 minut.

Po příchodu byli účastníci seznámeni s plánovaným průběhem experimentu a použitým vybavením. Následně jim byla vyškoleným pracovníkem odborně nasazena čepice pro skalpové snímání EEG signálu.

Samotné měření proběhlo v 5 fázích. V první fázi bylo po dobu 5 minut měřeno klidové EEG, nejdříve s otevřenými a následně se zavřenými očima. Poté byl proband usazen tak, aby jeho pravá horní končetina byla skrytá za zrcadlem. Následně proběhlo měření EEG s podáním taktilního stimulu na dorzální stranu ruky a distálního předloktí ve čtyřech modifikacích, jejichž pořadí bylo randomizováno losem (viz tabulka č. 2).

Modifikace č. 1 obnášela dynamický taktilní stimul (lehké hlazení) na obou horních končetinách současně, modifikace č. 2 obnášela stimul pouze na odkryté levé končetině a modifikace č. 3 stimul pouze na pravé končetině skryté za zrcadlem. Během modifikace č. 4 nebyl podán taktilní stimul na žádné končetině. Stimul byl podáván vždy stejnou osobou, a to řešitelem experimentu.

Měření během každé fáze experimentu trvalo 2 minuty. Mezi jednotlivými fázemi byla dvouminutová pauza, během níž mohl proband v klidu odpočívat.

Celý průběh experimentu byl zaznamenáván videokamerou a byly během něj pořizovány dokumentační fotografie.

Po ukončení experimentu vyplnili probandi dotazník (viz příloha č. 3). První část dotazníku s identifikačními a anamnestickými údaji vyplňoval účastník samostatně, druhá část byla vyplněna řešitelem formou otevřených otázek. Předtištěné možnosti odpovědi účastník během vyplňování neviděl, sloužily pouze jako vodítko řešiteli.

Výsledky dotazníkového šetření jsou prezentovány v tabulce č. 4 v kapitole 4.6.

3.5.4 Analýza a statistické vyhodnocení dat

Během měření jsme získali celkem 60 dvouminutových resp. pětiminutových sekvencí. Z těchto dat naměřených prostřednictvím EEG byly v programu NeuroGuide vybrány 30sekundové bezartefaktové úseky. Tyto úseky byly následně vyexportovány do textových souborů pro další zpracování v programu sLORETA. Převod EEG dat do sLORETA souborů byl proveden přes výpočet vzájemného spektra v parametrickém modelu pro multikanálové EEG. Výpočet byl proveden pro všechna pásmová rozmezí (delta 0,5–4 Hz, théta 4–8 Hz, alfa 8–10 Hz, alfa2 10–12 Hz, beta1 13–18 Hz, beta2 18–21 Hz, beta3 21–30 Hz a gama (>30 Hz). Tato data byla dále konvertována do souborů s koncovkou .slor, které umožňují zobrazení v Talairachově kortikálním atlasu. Ke konverzi byla použita transformační matrice získaná převodem elektrodových koordinátů z nativního EEG (Pánek, 2016).

V rámci statistického zpracování dat byly ve statistickém modulu programu sLORETA porovnávány čtyři párové skupiny.

1. Taktilní stimulace obou rukou se zrcadlovou iluzí oproti klidovému stavu s otevřenými očima (BOTH vs. OE).

2. Taktilní stimulace levé ruky se zrcadlovou iluzí oproti klidovému stavu s otevřenými očima (LEFT vs. OE).

3. Taktilní stimulace pravé ruky se zrcadlovou iluzí oproti klidovému stavu s otevřenými očima (RIGHT vs. OE).

4. Situace se zrcadlovou iluzí bez taktilní stimulace oproti klidovému stavu s otevřenými očima (NONE vs. OE).

V každé skupině byly porovnávány změny elektrické aktivity mozku všech 10 probandů. Pro vyhodnocení statisticky významných změn zdrojové aktivity byl použit párový t-test s logaritmickou transformací dat s parametrem vyhlazení 0,5 a byla využita randomizace dat s hodnotou 5000. Výsledná data byla zobrazena v modulu Viewer, který je součástí programu sLORETA. Tento modul umožňuje zobrazení statisticky významných změn v proudové hustotě v jednotlivých Brodmannových areách pro jednotlivá frekvenční pásma. Výstupem je zobrazení 2D řezů mozku v jednotlivých rovinách, 3D sférický model mozku a textový soubor obsahující seznam Brodmannových areí se statisticky významnou změnou zdrojové aktivity.

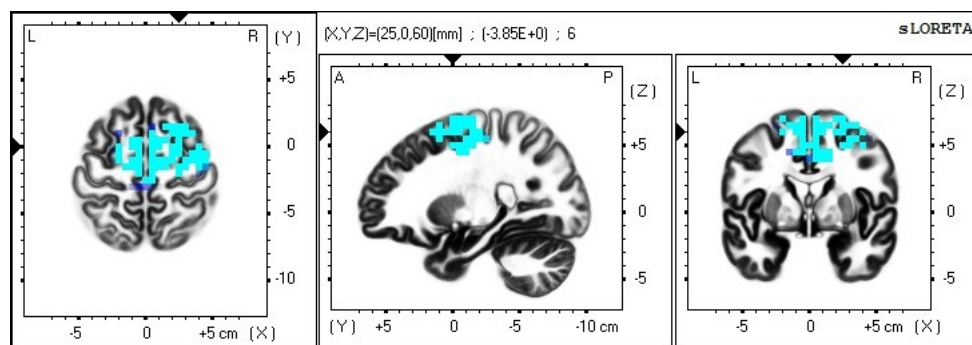
4 VÝSLEDKY

4.1 Výsledky k hypotéze č. 1

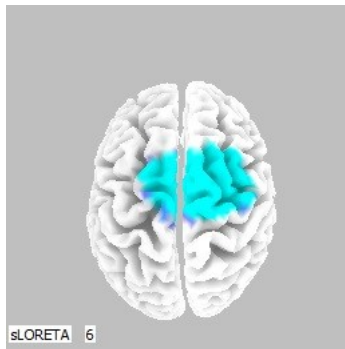
Statistické porovnání zdrojové aktivity mozku během taktilní stimulace obou rukou se zrcadlovou iluzí oproti klidovému stavu s otevřenými očima (BOTH vs. OE).

Ve statistickém modulu programu sLORETA bylo provedeno porovnání EEG dat získaných od všech deseti probandů během symetrické taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima. Byl zjištěn statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu beta2 a beta3 na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo ve frekvenčním pásmu beta2 zaznamenáno především ve frontálním laloku v BA 6 (viz obrázek č. 3 a 4). Výskyt byl četnější v pravé hemisféře.

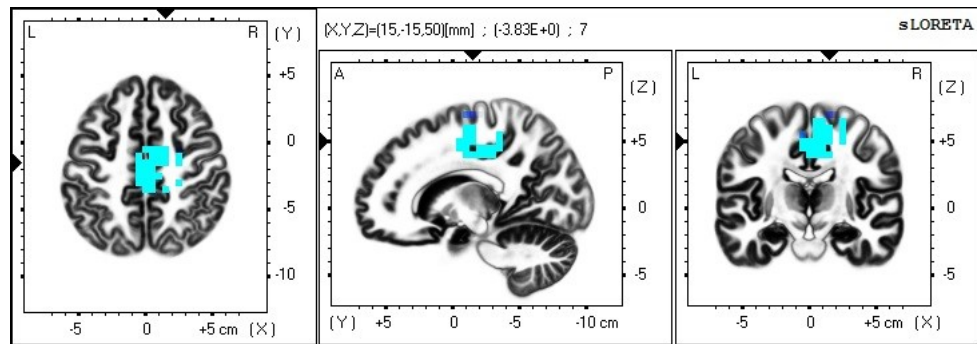
Ve frekvenčním pásmu beta3 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno ve frontálním laloku a v limbické oblasti, a to v BA 6, 31 a 24 (viz obrázek č. 5 a 6). Výskyt byl četnější v pravé hemisféře.



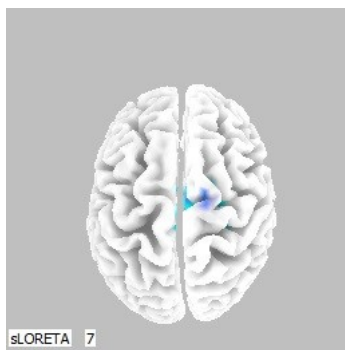
Obrázek 3: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 6. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.



Obrázek 4: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 6. Pohled shora. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.



Obrázek 5: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 6, 31 a 24. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.

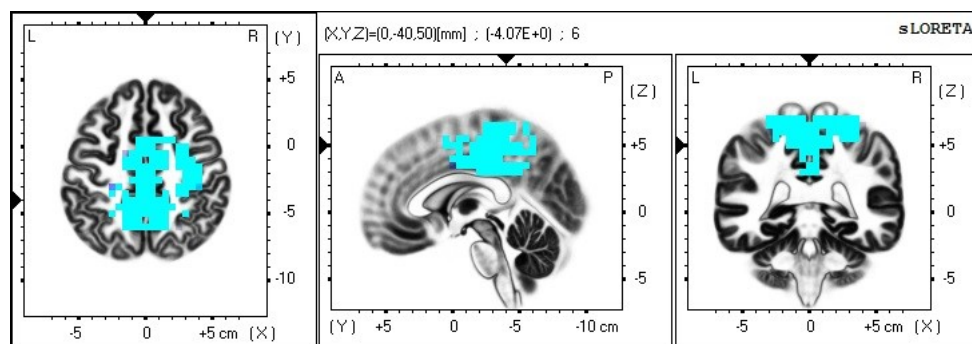


Obrázek 6: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 6, 31 a 24. Pohled shora. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.

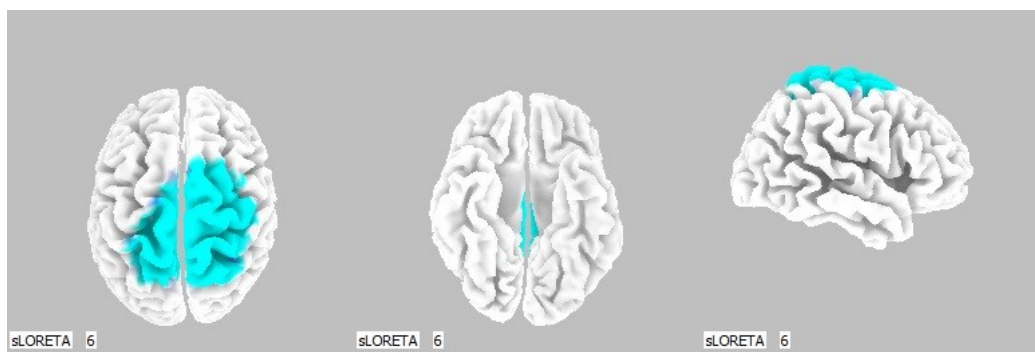
4.2 Výsledky k hypotéze č. 2

Statistické porovnání zdrojové aktivity mozku během taktilní stimulace levé ruky se zrcadlovou iluzí oproti klidovému stavu s otevřenými očima (LEFT vs. OE).

Ve statistickém modulu programu sLORETA bylo provedeno porovnání EEG dat získaných od všech deseti probandů během taktilní stimulace levé ruky situované před zrcadlem a klidového stavu s otevřenými očima. Byl zjištěn statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu beta2 na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo zaznamenáno především ve frontálním laloku v BA 31 a dále v parietálním laloku v BA 5 a 7 (viz obrázek č. 7 a 8). Výskyt byl četnější v pravé hemisféře.



Obrázek 7: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace levé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 31, 5 a 7. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.

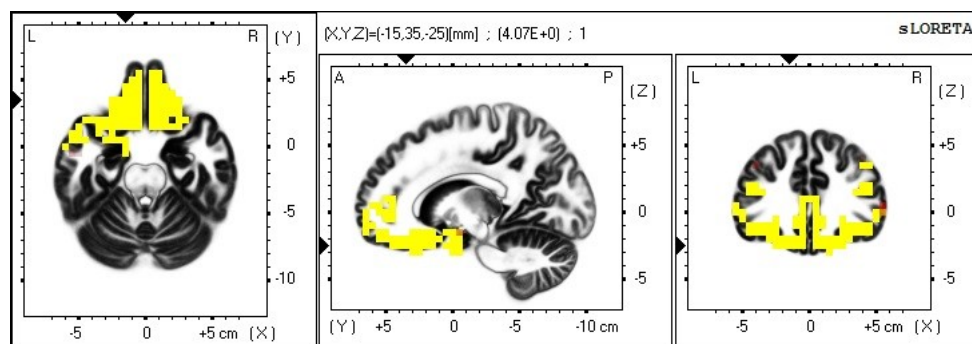


Obrázek 8: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace levé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 31, 5 a 7. Pohled shora, zesepodu a zprava. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.

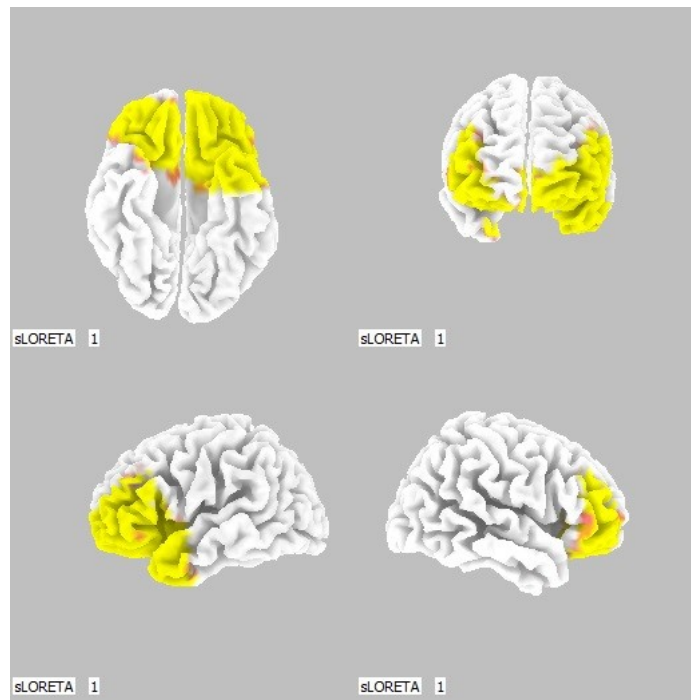
4.3 Výsledky k hypotéze č. 3

Statistické porovnání zdrojové aktivity mozku taktilní stimulace pravé ruky se zrcadlovou iluzí oproti klidovému stavu s otevřenými očima (RIGHT vs. OE).

Ve statistickém modulu programu sLORETA bylo provedeno porovnání EEG dat získaných od všech deseti probandů během taktilní stimulace pravé ruky skryté za zrcadlem a klidového stavu s otevřenými očima. Byl zjištěn statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu delta na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo zaznamenáno především ve frontálním laloku v BA 11 a 47 (viz obrázek č. 9 a 10). Výskyt byl četnější v levé hemisféře.



Obrázek 9: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace pravé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.



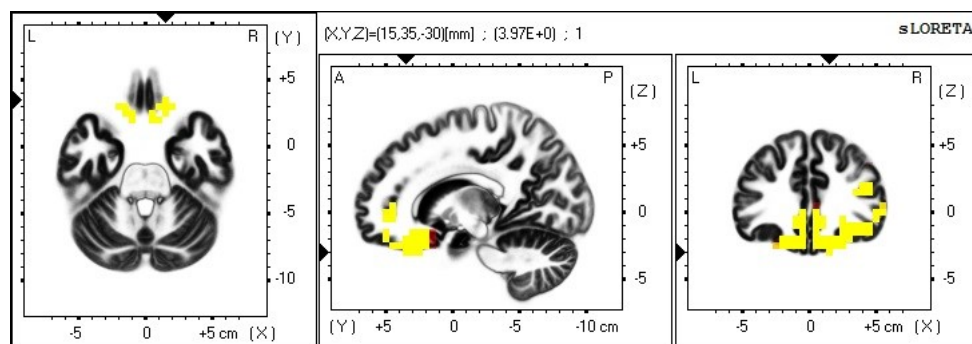
Obrázek 10: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace pravé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Pohled zesponu, zepředu zleva a zprava. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.

4.4 Výsledky k hypotéze č. 4

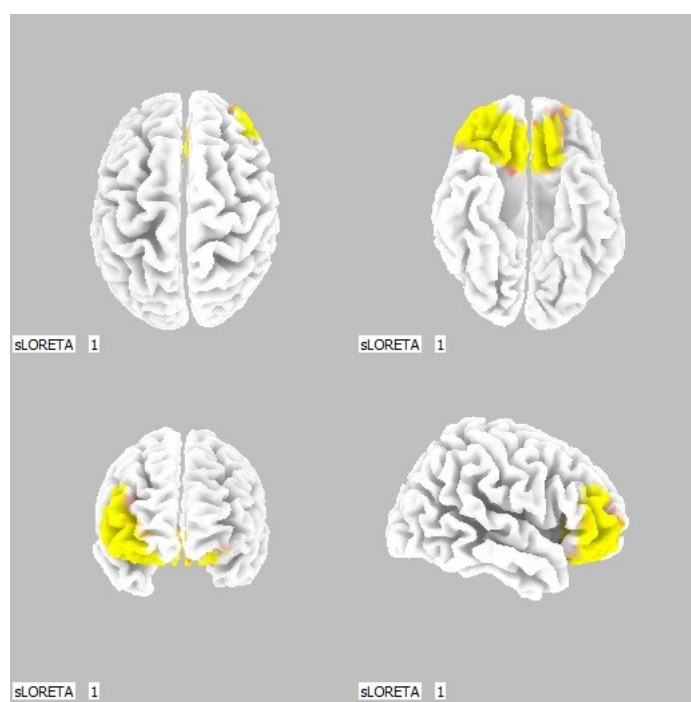
Statistické porovnání zdrojové aktivity mozku během situace se zrcadlovou iluzí bez taktilní stimulace oproti klidovému stavu s otevřenými očima (NONE vs. OE).

Ve statistickém modulu programu sLORETA bylo provedeno porovnání EEG dat získaných od všech deseti probandů během modifikace bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima. Byl zjištěn statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu delta a beta3 na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo zaznamenáno ve frekvenčním pásmu delta především ve frontálním laloku v BA 11 a 47 (viz obrázek č. 11 a 12). Výskyt byl četnější v pravé hemisféře.

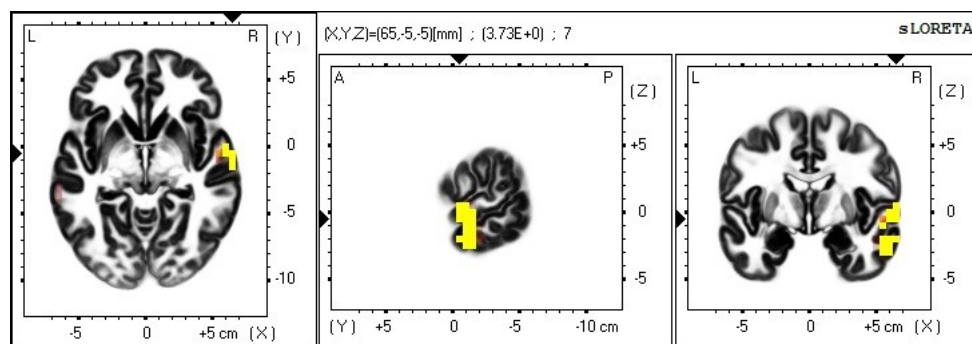
Ve frekvenčním pásmu beta3 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno v temporálním laloku v BA 21 a 20. Výskyt byl četnější v pravé hemisféře. Dále bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno v okcipitálním laloku v BA 18 v levé hemisféře (viz obrázek č. 13 a 14).



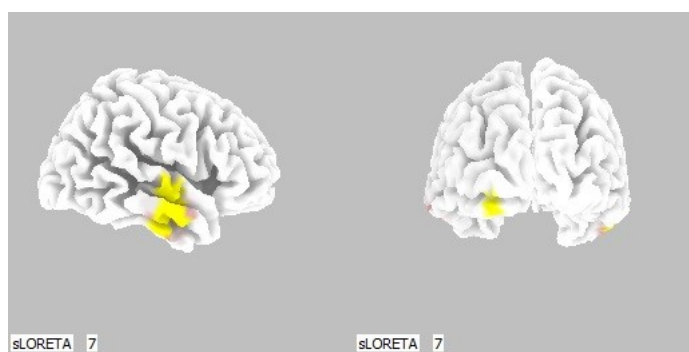
Obrázek 11: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.



Obrázek 12: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima a na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Pohled shora, zespodu, zepředu a zprava. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.



Obrázek 13: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 21 a 20. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.



Obrázek 14: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 21, 20 a 18. Pohled zprava a zezadu. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.

4.5 Souhrn výsledků

V programu sLORETA byly statisticky porovnávány celkem čtyři párové skupiny. U všech byl zjištěn statisticky významný rozdíl v proudové hustotě, tedy ve zdrojové aktivitě mozku, na hladině významnosti $p \leq 0,05$ a to ve frekvenčních pásmech beta2, beta3 a delta v různých Brodmannových areách (viz Tabulka č. 3). Podrobnější popis výsledků vč. relevantních funkcí jednotlivých Brodmannových areí je v tabulce č. 5, příloha č. 5.

Tabulka 3: Souhrn výsledků všech párových skupin na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$

Párová skupina	Frekvenční pásmo	Brodmannova area	Lokalizace
BOTH vs. OE	beta2	6	frontální lalok – premotorická kůra
BOTH vs. OE	beta3	6, 31, 24	frontální lalok – premotorická kůra; <u>gyrus cinguli</u> – anteriorní a posteriorní část
LEFT vs. OE	beta2	31, 5, 7	<u>gyrus cinguli</u> – posteriorní část; <u>superiorní parietální lobulus</u>
RIGHT vs. OE	delta	11, 47	frontální lalok – <u>gyrus rectus</u> , <u>inferiorní frontální gyros</u>
NONE vs. OE	delta	11, 47	frontální lalok – <u>gyrus rectus</u> , <u>inferiorní frontální gyros</u>
NONE vs. OE	beta3	21, 20, 18	temporální lalok – střední a inferiorní část; okcipitální lalok

4.6 Výsledky subjektivního hodnocení probandů

Součástí experimentu byl dotazník (viz příloha č. 3), který měl zajistit sběr anamnestických dat a informací vypovídajících o subjektivních pocitech účastníků výzkumu. Probandi se k jednotlivým fázím experimentu vyjadřovali spontánně vlastními slovy se zaměřením na celkový dojem, pocity spojené s emocemi, vegetativní změny, pocity na horních končetinách (HKK) a na tělesné schéma (viz tabulka č. 4).

Tabulka 4: Subjektivní hodnocení probandů

	Modifikace 1 BOTH vs. OE	Modifikace 2 LEFT vs. OE	Modifikace 3 RIGHT vs. OE	Modifikace 4 NONE vs. OE	Počet přípomínek
Počet připomínek	15	27	22	13	
Celkové hodnocení					
příjemné	4	3	2	1	10
nepříjemné		4	1		5
neutrální	2			2	4
zvláštní			2		2
příjemné, ale zvláštní	1	2	1	1	5
Emoce					
zmatenost		1	2		3
nejistota	1			1	2
nervozita	1	1	1	1	4
očekávání				2	2
Vegetativní změny					
zrychlený tep	1	1	2	1	5
pocení		1	1		2
pocit chladu		1	1		2
Pocity na HKK / tělesné schéma					
rozdíl teplot HKK		1			1
*parestézie		6	1		7
nutkání pohnout HK		2	1	1	4
dotek mimo HK	1	1			2
pocit "cizí" HK	1	1	1		3
pocit 3. HK účastníka			2		2
pocit 3. HK řešitele			1		1
hypestezie	1		1		2
očekávání doteku				1	1
Jiné					
nutkání zavřít oči	1	1	1	1	4
vyhoření iluze	1	1	1	1	4

Legenda: Čísly je označen počet probandů, kteří se vyjádřili k dané modifikaci v uvedeném smyslu, tučně je celkový počet připomínek k jednotlivým modifikacím, resp. modalitám. *Parestézie zahrnují pocity fantomového doteku, brnění, pálení, cukání, mravenčení apod.

5 DISKUZE

5.1 Diskuze k hypotéze č. 1

H1: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním symetrického haptického stimulu na obě ruce a klidovým stavem s otevřenými očima.

V programu sLORETA byly zjištěny statisticky významné změny zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu beta2 a beta3 na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo ve frekvenčním pásmu beta2 zaznamenáno především ve frontálním laloku v BA 6. Výskyt byl četnější v pravé hemisféře. Ve frekvenčním pásmu beta3 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno ve frontálním laloku a v limbické oblasti, a to v BA 6, 31 a 24. Výskyt byl četnější rovněž v pravé hemisféře. Tuto hypotézu lze tedy považovat za potvrzenou.

Zvýšení beta aktivity na EEG záznamu může svědčit o zvýšení afektivních reakcí nebo o aktivovaných exekutivních a kognitivních funkcích, stejně jako o zvýšené pozornosti (Pánek, 2016).

Jsou k dispozici studie, podle kterých je beta aktivita výsledkem synchronizace vzdálenějších regionů mozku, nebo dokonce celé nervové soustavy. Probíhá díky ní kontrola stavu periferie před samotnou motorickou aktivitou a zpětnovazebná synchronizace mezi motorickými a senzorickými korovými oblastmi (Baker, 2007; Baravalle, 2018; Gable, 2016; Khanna, 2014).

Podle dostupných studií beta aktivita pomáhá udržovat aktuální stav, přičemž dochází k opakované recalibraci senzomotorického systému. Je také spojována s vizuomotorickou integrací, pozorností, procesy učení a ukládání paměti. Zvýšená beta aktivita tedy svědčí o stavu připravenosti a očekávání předcházejícím účelný pohyb, který vyžaduje soustředění a motivaci (Baker, 2007; Baravalle, 2018; Gable, 2016; Khanna, 2014).

Beta aktivita také bývá zvýšena při svalové kontrakci izometrického charakteru, což může mít souvislost také s tím, že oproti dynamickému pohybu klade izometrie vyšší nároky na koaktivaci svalů (Baker, 2007; Baravalle, 2018; Gable, 2016; Khanna, 2014).

Beta aktivita je tím vyšší, čím více senzoričkových podnětů organismus dostává. Tato souvislost může být vysvětlována mj. tím, že během pohybu jsou fyziologicky utlumeny senzoričkové vjemy z periferie a také beta aktivita v průběhu exekuce pohybu na EEG ustupuje (Baker, 2007; Baravalle, 2018; Gable, 2016; Khanna, 2014).

Z pohledu našeho experimentu je zajímavý i fakt, že beta aktivita mozku se zvyšuje právě i během taktilní stimulace ruky a zápěstí (Khanna, 2014).

Ve výsledcích našeho experimentu frekvenční pásmo beta svojí aktivitou dominuje. Může to být dáno tím, že probandi se nacházeli v ustálené poloze, byl jim poskytován vizuální, a především taktilní stimul a celá situace pro ně byla nová. Jsem přesvědčena o tom, že zvýšený výskyt změn mozkové aktivity právě ve frekvenčním pásmu beta dokazuje stav pozornosti, soustředěnosti a očekávání u testovaných osob.

Aktivované Brodmannovy arey byly popsány s pomocí kortikálního atlasu (Cortical Functions: Reference, 2012) a interaktivního atlasu Brodmannových areí (2008).

Ve frekvenčním pásmu beta2 byly nejčetnější změny zdrojové aktivity zaznamenány v Brodmannově aree 6 a ve frekvenčním pásmu beta3 byly nejčetnější změny zdrojové aktivity zaznamenány v oblastech BA 6, 31 a 24.

Brodmannova area 6 je součástí premotorické kůry frontálního laloku a leží před primární motorickou oblastí v blízkosti Sylviovy rýhy. Je pravděpodobně největší Brodmannovou zónou vůbec a i díky tomu je spojena se širokou škálou funkcí.

Z pohledu naší studie jsou podstatné funkce BA 6 spojené s motorikou. Tato mozková oblast se aktivuje při procesech motorického plánování, motorického učení a pohybové imaginace. Dále také při senzoričkovém navádění během pohybu, plynulém navazování jeho jednotlivých komponent a koordinaci končetin opačných stran. Funkčně se tato area uplatňuje také při aktivitě okruhů zrcadlových neuronů při sledování a představě činností.

Dále je pro nás relevantní, že se BA 6 aktivuje při specifických úkonech pozornosti a při utváření paměti, a to především v operačních procesech, mnemotechnickém učení, ukládání dílčích stop do dlouhodobé paměti a tvorbě topografické paměti. BA 6 se také zapojuje do procesů zpracovávání řečových funkcí, řešení nových problémů sebeovládání, zpracování emocí, sebereflexe při rozhodování a celé řadě dalších situací.

Brodmannovy arey 24 a 31 leží v gyru cinguli. Ten je součástí limbického systému, z čehož vyplývá i jeho úzký vztah k emocím.

Jin et al. (2018) ve své studii provedli pomocí magnetické rezonance (MRI) detailní rozdělení gyru cinguli strukturálně i funkčně na jednotlivé regiony. Díky svému uložení je gyrus cinguli anatomicky i funkčně propojen s mnoha strukturami mozkové kůry. Patří mezi ně frontální i prefrontální oblast, premotorická oblast, kůra temporálního laloku, sekundární motorická kůra, gyrus postcentralis i precentralis, insula, precuneus a další. Díky tomu se gyrus cinguli zapojuje do mnoha neurálních okruhů a celé řady motorických, ale především také afektivních a kognitivních funkcí (Jin, 2018). Zvýšená aktivita v gyru cinguli během našeho experimentu ve frekvenčním pásmu beta tedy může dokazovat zvýšenou synchronizaci mezi sensorickými a motorickými oblastmi mozku.

BA 24 se nachází v anteriorní části gyru cinguli. Z vyšších funkcí se tato area aktivuje při zpracovávání nových zkušeností a emočních podnětů a také při inhibici jak kognitivní, tak motorické aktivity. V oblasti motoriky se podobně jako BA 6 účastní motorického plánování a motorické představy a dále reaguje na vestibulární a optické motorické podněty. Ze somatosenzorických funkcí se BA 24 účastní zpracovávání bolestivých vjemů. Svoji aktivitou se tato oblast podílí také na procesech spojených s pamětí a pozorností, vč. prostorově vizuální pozornosti. V neposlední řadě patří BA 24 do systému zrcadlových neuronů, konkrétně se zapojuje při rozlišování sebe sama od druhých při sociálních interakcích. Zapojuje se také do procesů induktivního i deduktivního uvažování.

Brodmannova area 31 se nachází v posteriorním gyru cinguli. Na rozdíl od anteriorní části se tato oblast příliš nepodílí přímo na motorice, nicméně se aktivuje u procesů spojených s učením komplexních motorických dovedností. BA 31 bývá spojována především s řečí, emocemi a pamětí. Také se aktivuje během zpracovávání náročných vizuálních stimulů, což by odpovídalo i podmínkám našeho experimentu. Sensoricky se BA 31 podílí na vnímání termických stimulů. Dále jsou s posteriorním gyrem cinguli spojovány funkce, jako je schopnost hodnotícího úsudku, rozhodování za účelem preventivních opatření (opatrnost), podmiňování strachu, odlišování sebe od druhých a další.

Subjektivně hodnotili probandi tuto modifikaci celkově jako spíše příjemnou nebo neutrální, nicméně dva účastníci uvedli pocit nervozity, resp. nejistoty.

Na základě výsledků se domnívám, že náš experiment v této modifikaci potvrdil vliv zrcadlové zpětné vazby na aktivaci systému zrcadlových neuronů.

Bez ohledu na randomizaci se jistě jednalo pro probandy o novou zkušenost, což potvrzuje charakteristika aktivovaných mozkových oblastí spojených s pozorností, učením a imaginací, ale také s emocemi, které jsou podmínkou učení a nedílnou součástí procesů tvorby paměti. Tato část experimentu obnášela jako jediná symetrické podávání haptického kontaktu, což mohlo podpořit aktivaci funkcí koordinace končetin opačných stran.

5.2 Diskuze k hypotéze č. 2

H2: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu na levou ruku situovanou před zrcadlem a klidovým stavem s otevřenýma očima.

V programu sLORETA byl zjištěn statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu beta2 na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo zaznamenáno především ve frontálním laloku v BA 31 a v parietálním laloku v BA 5 a 7. Výskyt byl četnější v pravé hemisféře. Tuto hypotézu lze tedy považovat za potvrzenou.

Aktivované Brodmannovy arey byly popsány s pomocí kortikálního atlasu (Cortical Functions: Reference, 2012) a interaktivního atlasu Brodmannových areí (2008).

Stejně jako modifikace č. 1 také tato modifikace zaznamenala statisticky nejvýznamnější diferenci zdrojové aktivity ve frekvenčním pásmu beta. Jak již bylo popsáno výše, tato frekvence je typická pro zvýšenou pozornost, připravenost a excitaci a také pro synchronizaci motorických a sensorických korových oblastí. I zde tedy tento fakt dokazuje stav zvýšené pozornosti, soustředěnosti a očekávání u testovaných osob.

Decomnick et al. (2014) zpracovali rozsáhlý systematický přehled o neurofyziologických účincích zrcadlové zpětné vazby. Výsledky potvrzují, že díky kognitivnímu i sensorickému konfliktu lze zrcadlovou iluzí aktivovat oblasti mozku, které kontrolní podmínky nedokážou ovlivnit. Tento účinek je výraznější během unimanuálních nebo asymetrických úkonů, což je i případ této fáze našeho experimentu. Mezi mozkové regiony aktivované přímo vlivem zrcadlové iluze patří posteriorní gyrus cinguli a superiorní parietální lalok bilaterálně, tedy včetně kontralaterální sekundární somatosenzorické kůry (BA 5 a 7). Všechny zmíněné oblasti byly aktivovány i v této fázi našeho experimentu. Lze tedy říci, že

výsledky této modifikace potvrzují teoretická východiska neurofyzilogických účinků zrcadlové zpětné vazby.

Brodmannovy Arey 5 a 7 jsou situovány v parietálním kortexu a tvoří vlastně sekundární somatosenzorické centrum. Jsou tedy zodpovědné především za zpracování somatosenzorických vjemů a mezi jejich funkce se řadí také vizuomotorická pozornost. Považují proto za logické, že byly při této fázi experimentu aktivovány, protože tato modifikace vyžadovala komplexní integraci a interpretaci vizuálních a taktilních stimulů.

BA 5 a 7 se dále podílejí na procesech prostorové představivosti, jako je otáčení 2D i 3D objektů v představě, odhad hloubky prostoru, schopnost odhadnout střed přímk, orientace v nepravidelných strukturách a aplikace prostorové představivosti při intuitivním rozhodování.

V pravé hemisféře jsou tyto arey aktivní při prostorovém vnímání, které zahrnuje i senzitivitu k osobní zóně. V našem experimentu byla aktivita BA 5 a 7 zaznamenána v obou hemisférách, ale právě v pravé hemisféře s větší mírou. To je dle mého názoru dáno tím, že haptický stimul byl podáván na příslušnou, tedy levou končetinu, ale také tím, že kognitivní a sensorický konflikt zapříčiněný zrcadlovou iluzí kladl zvýšené nároky na orientaci v prostoru, a tak zapříčinil aktivitu sensorických oblastí i v kontralaterální levé hemisféře mozku.

BA 5 a 7 jsou také součástí okruhů napodobování a motorického učení. Tyto funkce souvisejí s aktivitou zrcadlových neuronů a vzhledem k charakteru našeho experimentu považují zapojení těchto funkcí za logické. I při pouhém sledování doteku v zrcadle se aktivovala somatosenzorická kůra kontralaterální hemisféry, což podporuje teorii existence taktilního zrcadlového systému.

Co se týče taktilního vnímání, v superiorním somatosenzorickém centru probíhají procesy lokalizace, zatímco v inferiorním (BA 40 a 39) procesy identifikace objektů. I tento fakt koreluje s podstatou této modifikace, jejíž podmínky díky zrcadlové iluzi kladly zvýšené nároky na schopnost lokalizace.

V oblasti tvoření paměti jsou BA 5 a 7 zapojeny do operačních procesů, prostorové paměti a vědomého vybavování zkušeností. Mezi další funkce BA 5 a 7 patří také zpracování emocí a sebereflexe během rozhodování.

Subjektivně vyvolala tato část experimentu u probandů nejvíce kontroverzí. Celkem 9 probandů z 10 pocíťovalo potřebu vyjádřit svůj celkový dojem z této modifikace, ať už

byl příjemný, nepříjemný, nebo zvláštní, z toho 4 účastníci ji hodnotili jako nepříjemnou, čímž se stala jednoznačně nejméně příjemnou ze všech 4 modifikací.

Objevilo se během ní také několik vegetativních změn, což by mohlo mj. souviset s aktivací BA 31, která se zapojuje do afektivních procesů spojených s opatrností a strachem. Brodmannova area 31 v posteriorní části gyru cinguli se dále účastní procesování náročných vizuálních stimulů a zapojuje se při odlišování sebe od druhých. Aktivaci této BA tedy mohl způsobit fakt, že tato část experimentu byla značně náročná na orientaci v dané situaci.

Během této modifikace dále zaznamenali 2 probandi změny orientace v tělesném schématu, a co je zajímavé, objevilo se zde 6 případů parestézie ve formě fantomového doteku, brnění, pálení, cukání nebo mravenčení na opačné (pravé) končetině. Jak již bylo popsáno v teoretické části této práce, tento fenomén je známý jako zrcadlová synestézie a souvisí s hyperaktivitou taktilního zrcadlového systému.

Bolognini et al. (2014) zkoumali ve své studii senzorický zrcadlový systém se zaměřením právě na fenomén zrcadlové synestézie. Pomocí transkraniální magnetické stimulace zkoušeli vyvolat zrcadlovou synestézii u zdravých lidí při pozorování doteku. Zároveň se snažili zjistit, které oblasti mozku svojí interakcí tento fenomén způsobují. Z výsledků studie mj. vyplynulo, že primární somatosenzorická oblast S1 má úzkou funkční vazbu s posteriorní parietální kůrou (BA 5 a 7) a premotorickou oblastí (BA 6). Bimodální neurony v těchto oblastech reagují na vizuální a taktilní stimulaci a aktivují se právě i při sledování doteku (Bolognini, 2014). I v našem experimentu se tato provázanost během modifikace č. 2 potvrdila.

Získaná data dokazují, že i tato část experimentu potvrdila teorii zrcadlových neuronů. Tato modifikace obnášela asymetrický stimul se silnějším účinkem zrcadlové iluze, a dle mého názoru proto vyžadovala také zapojení oblastí, které se účastní integrace vizuálních a senzorických podnětů.

5.3 Diskuze k hypotéze č. 3

H3: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu na pravou ruku skrytou za zrcadlem a klidovým stavem s otevřenýma očima.

V programu sLORETA byl zjištěn statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu delta na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo zaznamenáno především ve frontálním laloku v BA 11 a 47. Výskyt byl četnější v levé hemisféře. Tuto hypotézu lze tedy považovat za potvrzenou.

Aktivita delta (< 4 Hz) se fyziologicky objevuje především u dětí do 3 let věku nebo v hlubokém spánku. U dospělých v bdělém stavu je spojována s ukládáním a vybavováním paměťových stop a celkově s inteligencí vyšetřovaného (Pánek, 2016).

Frekvence delta se na EEG záznamu objevuje během kognitivních procesů spojených s rozhodováním, strategickým uvažováním, zvýšenou pozorností a detekcí zevních podnětů. Je spojována také s očekáváním a evaluací prospěchu. Z hlediska motorického chování je aktivita delta přítomna u lokomoce vyžadující prostorovou orientaci. Aktivita delta je častěji přítomna u žen (Cavanagh, 2015; Güntekin, 2015; Liang, 2018).

Výsledky našeho experimentu vykazaly změny zdrojové aktivity ve frekvenčním pásmu delta v situacích, které byly pro probandy pravděpodobně nejméně přehledné, a proto vyžadovaly zvýšenou pozornost a aktivizaci vyšších kognitivních funkcí a inteligenčních kapacit. U modifikace č. 3 se probandi pravděpodobně snažili dekodovat skrytý taktilní stimul, který nekoreloval s vizuálním vjemem.

Aktivované Brodmannovy arey byly popsány s pomocí kortikálního atlasu (Cortical Functions: Reference, 2012) a interaktivního atlasu Brodmannových areí (2008).

Brodmannovy arey 11 a 47 leží ve frontálním laloku, gyrus inferioris a gyrus rectus.

Jejich funkce jsou spojené především s řečí, sémantickými procesy a porozuměním jazyku. Aktivují se také během procesů spojených s čichem a sluchem, jako je neverbální porozumění, ale i vnímání hudby. Vedle toho se účastní procesů rozhodování spojených s vidinou prospěchu a paměťovými úkony, především s operativní pamětí. Dále jsou spojovány s inhibicí negativních emocí, odhadováním záměrů druhých a intuicí.

Zmíněné oblasti byly aktivovány v obou mozkových hemisférách, více v levé, což odpovídá faktu, že taktilní stimul byl podáván na pravou končetinu. Ta byla ale skrytá za zrcadlem, proto mohl tento vjem vyvolat u probandů již zmiňovaný kognitivní i sensorický konflikt.

Subjektivně hodnotili tuto modifikaci někteří probandi jako zvláštní, zmiňovali afektivní pocity zmatenosti a objevily se při ní také některé vegetativní změny. Během této fáze experimentu bylo také zaznamenáno největší množství změn orientace v tělesném schématu.

S ohledem na subjektivní hodnocení, ale především na výsledky získané měřením a statistickým vyhodnocením dat se domnívám, že tato modifikace byla pro probandy kognitivně i sensoricky nejvíce matoucí. Jednalo se v ní o asymetrický taktilní stimul, který se navíc odehrával za zrcadlem, a byl tak překrytý falešným vizuálním vjemem. Tato nepřehledná situace jistě vyžadovala aktivaci oblastí spojených s intuicí a anticipací záměrů druhé osoby a jistě i kognitivní inhibici negativních emocí.

5.4 Diskuze k hypotéze č. 4

H4: Předpokládám, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí bez podání haptického stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima.

V programu sLORETA byl zjištěn statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčním pásmu delta a beta3 na hladině významnosti $p \leq 0,05$. Signifikantní zvýšení proudové hustoty bylo ve frekvenčním pásmu delta zaznamenáno především ve frontálním laloku v BA 11 a 47. Výskyt byl četnější v pravé hemisféře. Ve frekvenčním pásmu beta3 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno v temporálním laloku v BA 21 a 20 s vyšší četností v pravé hemisféře a dále v okcipitálním laloku v BA 18 v levé hemisféře. Tuto hypotézu lze tedy považovat za potvrzenou.

Také v této části experimentu byly aktivovány BA 11 a 47 ve frekvenčním pásmu delta, stejně jako v předchozí situaci. Nicméně v této modifikaci byly aktivovány s nižší četností a oproti modifikaci č. 3 se aktivita vyskytovala více v levé hemisféře.

Ve frekvenčním pásmu beta3 byly neaktivnější Brodmannovy arey 21 a 20 a s o něco nižší četností výskytu změn aktivity také BA 18. Jak již bylo řečeno, frekvenční pásmo beta je charakteristické pro pozornost, soustředěnost a připravenost vyšetřovaného.

Aktivované Brodmannovy arey byly popsány s pomocí kortikálního atlasu (Cortical Functions: Reference, 2012) a interaktivního atlasu Brodmannových areí (2008).

BA 21 leží ve střední části temporálního laloku. Její aktivita je spojována především s porozuměním řeči. K jejím funkcím patří také odhadování záměrů druhých, nicméně na těchto procesech se podílí většinou spolu s dalšími korovými oblastmi.

BA 20 leží v inferiorní části temporálního laloku v gyrech fusiformis a parahippocampus. Aktivuje se při komplexním zpracovávání vizuálních vjemů a při procesech rozpoznávání. Podle některých studií je area 20 součástí Wernickeho řečového centra. Zvláště v levé hemisféře se BA 20 svojí aktivitou podílí na porozumění řeči. Dále se coby součást gyru fusiformis účastní začleňování vizuálních prvků do vjemového celku a aktivuje se také při zrakové fixaci. Stejně jako area 21 se také BA 20 zapojuje do procesů odhadování záměrů druhých.

Brodmannova area 18 se nachází ve střední části okcipitálního laloku. V první řadě se jedná o sekundární zrakovou oblast, z čehož vyplývá, že její hlavní funkcí je integrace vizuálních vjemů. K modalitám zpracovávaným touto oblastí patří detekce intenzity světla, detekce struktur a vzorců pohybu, rozlišování gest jednotlivých prstů, pozornost k barvám a tvarům, zpracovávání prostorově vizuálních informací a využívání selektivní pozornosti v rámci orientace. Svoji roli ale hraje BA 18 také v procesech paměti a porozumění jazyku. V pravé hemisféře se BA 18 zapojuje do procesů emocí a pozornosti souvisejících se zrakovou integrací. V levé hemisféře se odehrávají procesy vizuální mentální imaginace.

Kdybychom měli popsat modifikaci č. 4 našeho experimentu jediným slovem, bylo by to slovo „očekávání“, které také dva z probandů doslovně uvedli v rámci popisu svých afektivních reakcí v dotazníkovém šetření. Domnívám se tak ale nejen na základě subjektivního hodnocení probandů, ale především s ohledem na výsledky měření.

Výsledky v obou frekvenčních pásmech mají stejného jmenovatele, a to je odhad záměrů druhé osoby. Jsem přesvědčená o tom, že probandi během této modifikace velmi výrazně prožívali očekávání. Může to být dáno i tím, že tato modifikace nebyla u žádného probanda v rámci randomizace vylosována jako první. Lze tedy předpokládat, že testované osoby po zkušenostech s ostatními fázemi experimentu očekávaly nějakou formu haptického

kontakty ze strany řešitele. Ten ale při této modifikaci podán nebyl, a pravděpodobně i proto byla aktivována sekundární zrková oblast, jejíž hlavní funkcí je zrková integrace. Navíc, jak již bylo uvedeno, v BA 18 v levé hemisféře probíhají procesy vizuální imaginace, což opět, dle mého názoru, svědčí o stavu očekávání. Také další aktivované oblasti BA 20 a 21 se zapojují do zrkové integrace a společně s BA 11 a 47 do procesů anticipace záměrů druhé osoby.

5.5 Diskuze – souhrn

Přestože se jednotlivé modifikace v rámci našeho experimentu lišily z hlediska metodiky i výsledků, považuji za přínosné nahlédnout na výsledky naší práce také jako na celek. Přehled výsledků jednotlivých fází experimentu, vč. popisu významu a funkcí jednotlivých frekvenčních pásem a aktivovaných Brodmannových areí, je v tabulce č. 5, příloha č. 5.

V našem experimentu se v mnoha případech aktivovaly oblasti, které se zapojují do vizuálního vnímání a procesů vizuální a motorické integrace. Vysvětlují si to tím, že systémy zpracovávající taktilní a vizuální vjemy při integraci spolupracují a mohou se vzájemně ovlivňovat. Lunghi et al. (2017) se ve své studii zaměřili na interakci taktilního a vizuálního procesování a ve svém experimentu sledovali, zda dotek podaný zároveň s vizuálním stimulem může facilitovat vnímání tohoto stimulu, i když má tento stimul sám o sobě podprahovou intenzitu. Výsledky jejich hypotézu potvrdily a prokázaly, že dotek zvyšuje vnímavost mozku k jiným modalitám a umožňuje tak podprahovému vjemu vstoupit do povědomí. Vedle toho z jejich studie vyplynulo, že vizuálně taktilní interakce se odehrává již v začátku procesů korového zpracování a že integrace vjemů různých modalit nemusí probíhat až na kognitivní úrovni (Lunghi, 2017).

Také Salomon et al. (2016) se ve své studii zaměřili na podobné téma. Vycházeli z teorie, že somatické podněty (taktilní, propioceptivní, viscerální a vestibulární) jsou dominantní v kognitivních procesech vnímání a určování sebe sama. CNS nicméně integruje vjemy na multimodálním principu, a to i v případě, jsou-li některé stimuly podprahové. I jejich experiment potvrdil, že taktilní stimul může facilitovat vizuální vnímání (Salomon, 2016).

Dále bylo v rámci našeho experimentu aktivováno množství mozkových oblastí spojených s řečí, porozuměním jazyku, neverbální komunikací a sémantickými procesy. Na základě toho se domnívám, že se probandi, ať už vědomě, nebo nevědomě, snažili

danou situaci interpretovat jako formu komunikace. Svědčí o tom i aktivace korových oblastí typických pro odhadování záměru druhých a areí integrovaných v systému zrcadlových neuronů. Ten se totiž nezapojuje pouze do motorického napodobování, ale má také funkce spojené s komunikací, jazykem a sociálním chováním (Fox, 2016). Jak bylo popsáno již v teoretické části, dotek je jedním ze základních komunikačních prostředků a v interakci mezi jedinci hraje významnou roli.

Dle poznatků z teoretické části a také na základě výsledků experimentu lze dojít k závěru, že haptický kontakt má úzkou neurofyziologickou souvislost s motorickým, vizuálním, afektivním i kognitivním procesováním, a proto věřím v jeho terapeutický potenciál. Vyjdeme-li z podkladů teorie zrcadlových neuronů, můžeme předpokládat, že prostřednictvím taktilního stimulu lze přímo ovlivnit senzomotorické funkce nebo alespoň ty oblasti mozku, které jsou zapojovány do procesů motorické přípravy, plánování a imaginace, a tím zacílit na neuroplasticitu CNS. Vhodnou aplikací haptického kontaktu lze také pozitivně ovlivnit sensorické procesování, vč. zpracovávání bolestivých vjemů.

Taktilní stimulace může rovněž přispět ke zvýšení pozornosti a pomoci dosáhnout prahu kognitivního zpracovávání podnětů jiných modalit.

Účastníky našeho experimentu byli zdraví probandi, proto nelze na základě našich výsledků určit, jaký vliv by měly podmínky naší studie na osoby s deficitem. To se může stát předmětem dalšího zkoumání.

Jako limit této studie vnímám fakt, že nebylo provedeno měření v kontrolních podmínkách bez použití zrcadla nebo s jeho okluzí, nicméně takové měření nebylo cílem této práce a může se tak stát předmětem dalších studií.

Také by jistě bylo zajímavé porovnat účinek manuálního kontaktu a doteku umělým objektem, nicméně naše studie byla zaměřená na haptický kontakt, tedy dotek podaný manuálně druhou osobou. Bylo to především proto, že byla psána z pohledu fyzioterapie, pro kterou je manuální kontakt základním nástrojem komunikace a terapeutické práce.

6 ZÁVĚR

Zrcadlové neurony a jejich specifické vlastnosti jsou bezpochyby pozoruhodným fenoménem nejen v oblasti neurověd. Prohlubující se znalosti o jejich fyziologii nám pomáhají pochopit, jak fungují zpětnovazebné mechanismy v rámci nervové soustavy, ale také mezi jedinci během sociálních interakcí.

Zrcadlový systém si jistě zaslouží pozornost i z pohledu rehabilitace. Jeho cílenou aktivací můžeme působit na neuroplasticitu mozku. Protože zrcadlové neurony u člověka reagují na podněty vizuální, akustické i taktilní, věřím, že nám to umožňuje potenciálně vstoupit do zpětnovazebných procesů prostřednictvím kteréhokoli z těchto systémů a díky motorickému charakteru zrcadlových neuronů tak pozitivně ovlivnit motorické funkce.

Využitím zrcadlového systému můžeme docílit zvýšení excitability kortikospinálních drah a aktivace motorických okruhů plánování a imaginace, které jsou předpokladem samotné exekuce pohybu.

Prostřednictvím zrcadlového systému můžeme v neposlední řadě působit také na emoce a integrační oblasti spojené s pamětí, což je podmínkou pro učení nových a reedukaci poškozených motorických programů.

Cílem této diplomové práce bylo vyhodnotit změny intracerebrální zdrojové aktivity v sLORETA zobrazení během haptického kontaktu na ruku modifikovaného zrcadlovou iluzí v porovnání s klidovým stavem s otevřenými očima a určit přesnou lokalizaci zjištěné zdrojové aktivity.

Na základě výsledků našeho experimentu věřím, že k aktivaci motorických oblastí můžeme přispět také s pomocí haptického kontaktu, a to i u osob s motorickým deficitem, pro něž je prosté napodobování pohybu nemožné nebo omezené. Jako efektivní k dosažení těchto cílů se zdá být sumace podnětů, které lze dosáhnout např. kombinací taktilních a vizuálních stimulů. Taktilní a vizuální integrační systémy spolupracují a vzájemně se ovlivňují. Na základě toho se domnívám, že kombinace principů zrcadlové terapie a haptického kontaktu může pozitivně ovlivnit poruchy sensorických funkcí a percepce bolesti a má také potenciál přispět k obnově orientace v tělesném schématu u deficitů, jako je neglect syndrom, ale také např. funkční posturální poruchy.

Zrcadlové neurony reagují na principu mapování sledované činnosti na motorickou kůru pozorovatele. Aby se tento princip mohl plně uplatnit, je nutné mít s danou činností nějakou

zkušenost. Proto jsem přesvědčená, že využívání zrcadlících mechanismů v rehabilitaci vyžaduje opakované poskytování podnětů a pravidelnou stimulaci struktur, na které je terapie zacílena.

Z teoretických podkladů i výsledků našeho experimentu vyplývá, že z hlediska rehabilitace hrají zrcadlové neurony důležitou roli při obnově motorických i somatosenzorických funkcí a díky provázanosti integračních systémů mozku lze k těmto mechanismům efektivně využít i haptický kontakt. Ten má totiž evidentně úzkou neurofyziologickou souvislost s motorickým, vizuálním, afektivním i kognitivním procesováním a díky tomu může pozitivně působit na neuroplasticitu.

Dotek je pro fyzioterapeuta nástrojem pro komunikaci, vyšetření i terapii. Vedle mechanického ovlivňování měkkých tkání nám na neurofyziologickém podkladě pomáhá facilitovat pohyb, ovlivňovat svalový tonus a působit analgeticky. Věřím, že prohloubení znalostí o neurofyziologických účincích haptického kontaktu může přispět k širšímu pochopení jeho významu a ke zvýšení efektivity jeho aplikace ve fyzioterapeutické praxi, a v tom také vidím možný přínos této diplomové práce.

Seznam použité literatury

AMBLER, Zdeněk. *Základy neurologie: učebnice pro lékařské fakulty*. 6., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Galén, c2006. ISBN 80-7262-433-4.

ARYA, Kamal Narayan. Underlying neural mechanisms of mirror therapy: Implications for motor rehabilitation in stroke. *Neurology India* [online]. 2016, roč. 64, č. 1, s. 38-44 [cit. 2020-02-06]. DOI: 10.4103/0028-3886.173622. ISSN 0028-3886. Dostupné z: <http://www.neurologyindia.com/text.asp?2016/64/1/38/173622>

BAKER, Stuart N. Oscillatory interactions between sensorimotor cortex and the periphery. *Current Opinion in Neurobiology* [online]. 2007, roč. 17, č. 6, s. 649-655 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.1016/j.conb.2008.01.007. ISSN 09594388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959438808000093>

BARAVALLE, Roman, Osvaldo A. ROSSO a Fernando MONTANI. Rhythmic activities of the brain: Quantifying the high complexity of beta and gamma oscillations during visuomotor tasks. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science* [online]. 2018, roč. 28, č. 7 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.1063/1.5025187. ISSN 1054-1500. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.5025187>

BAUER, Joachim. *Proč cítím to, co ty: intuitivní komunikace a tajemství zrcadlových neuronů*. Přeložila Iva MICHŇOVÁ. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-5737-7.

BJORBÆKMO, Wenche Schrøder a Anne Marit MENGSHOEL. A touch of physiotherapy: The significance and meaning of touch in the practice of physiotherapy. *Physiotherapy Theory and Practice* [online]. 2016, roč. 32, č. 1, s. 10-19 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.3109/09593985.2015.1071449. ISSN 0959-3985. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/09593985.2015.1071449>

BOLOGNINI, Nadia et al. Touch to See: Neuropsychological Evidence of a Sensory Mirror System for Touch. *Cerebral Cortex* [online]. 2012, roč. 22, č. 9, s. 2055-2064 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1093/cercor/bhr283. ISSN 1460-2199. Dostupné z:

<https://academic.oup.com/cercor/article-lookup/doi/10.1093/cercor/bhr283>

BOLOGNINI, Nadia et al. Sharing Social Touch in the Primary Somatosensory Cortex. *Current Biology* [online]. 2014, roč. 24, č. 13, s. 1513-1517 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.1016/j.cub.2014.05.025. ISSN 09609822. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982214005508>

BRUNSDON, Victoria E. A., Elisabeth E. F. BRADFORD a Heather J. FERGUSON.

Sensorimotor mu rhythm during action observation changes across the lifespan

independently from social cognitive processes. *Developmental Cognitive*

Neuroscience [online]. 2019, č. 38 [cit. 2019-09-09]. DOI: 10.1016/j.dcn.2019.100659. ISSN

18789293. Dostupné z: <https://lurl.cz/czEvj>

BRYANT, Lauren J. a Kimberly CUEVAS. Effects of active and observational experience on EEG activity during early childhood. *Psychophysiology* [online]. 2019, roč. 56, č. 7 [cit. 2019-09-09]. DOI: 10.1111/psyp.13360. ISSN 0048-5772. Dostupné z:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/psyp.13360>

Brodmann's Interactive Atlas. In: *fMRI Consulting* [online]. 2008 [cit. 2019-03-15].

Dostupné z: <http://www.fmriconsulting.com/brodmann/Interact.html>

BUCCINO, Giovanni, Ana SOLODKIN a Steven L. SMALL. Functions of the Mirror Neuron System: Implications for Neurorehabilitation. *Cognitive and Behavioral*

Neurology [online]. 2006, roč. 19, č. 1, s. 55-63 [cit. 2019-09-10]. DOI: 10.1097/00146965-

200603000-00007. ISSN 1543-3633. Dostupné z: <https://lurl.cz/kzEvT>

CARAMAZZA, Alfonso et al. Embodied Cognition and Mirror Neurons: A Critical

Assessment. *Annual Review of Neuroscience* [online]. 2014, roč. 37, č. 1, s. 1-15 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1146/annurev-neuro-071013-013950. ISSN 0147-006X. Dostupné z:

<http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-neuro-071013-013950>

CASILE, Antonino. Mirror neurons (and beyond) in the macaque brain: An overview of 20 years of research. *Neuroscience Letters* [online]. 2013, č. 540, s. 3-14 [cit. 2020-02-10].

DOI: 10.1016/j.neulet.2012.11.003. ISSN 03043940. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304394012014589>

CAVANAGH, James F. Cortical delta activity reflects reward prediction error and related behavioral adjustments, but at different times. *NeuroImage* [online]. 2015, č. 110, s. 205-216 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2015.02.007. ISSN 10538119. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053811915000993>

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053811915000993>

COLL, Michel-Pierre et al. Cross-modal repetition effects in the mu rhythm indicate tactile mirroring during action observation. *Cortex* [online]. 2015, č. 63, s. 121-131 [cit. 2020-02-18]. DOI: 10.1016/j.cortex.2014.08.024. ISSN 00109452. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010945214002871>

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010945214002871>

COOK, Richard et al. Mirror neurons: From origin to function. *Behavioral and Brain Sciences* [online]. 2014, roč. 37, č. 2, s. 177-192 [cit. 2019-09-10]. DOI:

10.1017/S0140525X13000903. ISSN 0140-525X. Dostupné z: <https://lurl.cz/OzEvs>

Cortical Functions: Reference [online]. Hong Kong: Trans Cranial Technologies ldt., 2012 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z:

https://thebrainstimulator.net/docs/external/Trans_Cranial_Technologies-cortical_functions_ref_v1_0.pdf

DEBNATH, Ranjan a Elizabeth A. FRANZ. Perception of hand movement by mirror reflection evokes brain activation in the motor cortex contralateral to a non-moving hand. *Cortex* [online]. 2016, č. 81, s. 118-125 [cit. 2020-02-10]. DOI:

10.1016/j.cortex.2016.04.015. ISSN 00109452. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010945216300910>

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0010945216300910>

DECONINCK, Frederik J. A. et al. Reflections on Mirror Therapy. *Neurorehabilitation and Neural Repair* [online]. 2014, roč. 29, č. 4, s. 349-361 [cit. 2020-02-10]. DOI:

10.1177/1545968314546134. ISSN 1545-9683. Dostupné z:

<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1545968314546134>

DI PELLEGRINO, G. et al. Understanding motor events: a neurophysiological study. *Experimental Brain Research* [online]. 1992, roč. 91, č. 1, s. 176-180 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1007/BF00230027. ISSN 0014-4819. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00230027>

DOHLE, Christian et al. Mirror Therapy Promotes Recovery From Severe Hemiparesis: A Randomized Controlled Trial. *Neurorehabilitation and Neural Repair* [online]. 2009, roč. 23, č. 3, s. 209-217 [cit. 2020-02-24]. DOI: 10.1177/1545968308324786. ISSN 1545-9683. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1545968308324786>

DUBOVÁ, Dita. *Bazální stimulace v dlouhodobé intenzivní péči: Bakalářská práce*. Kladno: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství, 2017. 93 stran, 6 příloh. Vedoucí práce Mgr. Irena Novotná.

DYLEVSKÝ, Ivan. *Funkční anatomie*. Praha: Grada, 2009. 544 s. ISBN 9788024732404.

EZENDAM, Daniëlle, Raoul M. BONGERS a Michiel J. A. JANNINK. Systematic review of the effectiveness of mirror therapy in upper extremity function. *Disability and Rehabilitation* [online]. 2009, roč., 31, č. 26, s. 2135-2149 [cit. 2020-02-24]. DOI: 10.3109/09638280902887768. ISSN 0963-8288. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/09638280902887768>

FABER, Josef. *Elektroencefalografie a psychofyziologie*. Vyd. 1. Praha: ISV, 2001, 170 s. Lékařství. ISBN 80-85866-74-9.

FERRARI, Pier Francesco a Giacomo RIZZOLATTI. Mirror neuron research: the past and the future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [online]. 2014, roč. 369, č. 1644 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1098/rstb.2013.0169. ISSN 0962-8436. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.2013.0169>

FOX, Nathan A. et al. Assessing human mirror activity with EEG mu rhythm: A meta-analysis. *Psychological Bulletin* [online]. 2016, roč. 142, č. 3, s. 291-313 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1037/bul0000031. ISSN 1939-1455. Dostupné z: <http://doi.apa.org/getdoi.cfm?doi=10.1037/bul0000031>

FRIEDLOVÁ, Karolína. *Bazální stimulace v základní ošetrovatelské péči*. 1. vyd. Praha: Grada, 2007. 168 s. ISBN 9788024713144.

GABLE, Philip A., A. Hunter THREADGILL a David L. ADAMS. Neural activity underlying motor-action preparation and cognitive narrowing in approach-motivated goal states. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* [online]. 2016, roč. 16, č. 1, s. 145-152 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.3758/s13415-015-0381-4. ISSN 1530-7026. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.3758/s13415-015-0381-4>

GILLMEISTER, Helge. A new perceptual paradigm to investigate the visual remapping of others' tactile sensations onto one's own body shows "mirror touch" for the hands. *Frontiers in Psychology* [online]. 2014, č. 5 [cit. 2020-03-06]. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00095. ISSN 1664-1078. Dostupné z: <https://lurl.cz/HzEvkl>

GULYAEVA, N. V. Molecular mechanisms of neuroplasticity: An expanding universe. *Biochemistry (Moscow)* [online]. 2017, roč. 82, č. 3, s. 237-242 [cit. 2019-09-30]. DOI: 10.1134/S0006297917030014. ISSN 0006-2979. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1134/S0006297917030014>

GÜNTEKIN, Bahar a Erol BAŞAR. Review of evoked and event-related delta responses in the human brain. *International Journal of Psychophysiology* [online]. 2016, č. 103, 43-52 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2015.02.001. ISSN 01678760. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167876015000318>

HOLUBÁŘOVÁ, Jiřina a Dagmar PAVLŮ. *Proprioceptivní neuromuskulární facilitace*. 3. vydání. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2017-. 116 s. ISBN 9788024636078.

HÖTTING, Kirsten a Brigitte RÖDER. Beneficial effects of physical exercise on neuroplasticity and cognition. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews* [online]. 2013, roč. 37, č. 9, s. 2243-2257 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2013.04.005. ISSN 01497634. Dostupné z: <https://lurl.cz/AzEvV>

ISMAIL, Fatima Yousif, Ali FATEMI a Michael V. JOHNSTON. Cerebral plasticity: Windows of opportunity in the developing brain. *European Journal of Paediatric Neurology* [online]. 2017, roč. 21, č. 1, s. 23-48 [cit. 2020-02-13]. DOI: 10.1016/j.ejpn.2016.07.007. ISSN 10903798. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1090379816300964>

JANČÍKOVÁ, Věra, Petr KONEČNÝ a Svatopluk HORÁK. Zrcadlová terapie a její využití v neurorehabilitaci. *Rehabilitace a fyzikální lékařství*. 2018, roč., 25, č. 4, s. 139-142.

JATOI, Munsif Ali et al. EEG based brain source localization comparison of sLORETA and eLORETA. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine* [online]. 2014, roč. 37, č. 4, s. 713-721 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.1007/s13246-014-0308-3. ISSN 0158-9938. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s13246-014-0308-3>

JIN, Fei et al. Functional and anatomical connectivity-based parcellation of human cingulate cortex. *Brain and Behavior* [online]. 2018, roč. 8, č. 8 [cit. 2020-03-05]. DOI: 10.1002/brb3.1070. ISSN 21623279. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/brb3.1070>

JUDAŠ, Miloš, Maja CEPANEC a Goran SEDMAK. Brodmann's map of the human cerebral cortex or Brodmann's maps?. *Translational Neuroscience* [online]. 2012, roč. 3, č. 1, s. 67-74 [cit. 2019-02-23]. DOI 10.1212/WNL.00000000000004795. Dostupné z: <https://www.degruyter.com/view/journals/tncsci/3/1/article-p67.xml>

KELLY, Martina Ann et al. Experience of Touch in Health Care: A Meta-Ethnography Across the Health Care Professions. *Qualitative Health Research* [online]. 2017, roč. 28, č. 2, s. 200-212 [cit. 2020-02-19]. DOI: 10.1177/1049732317707726. ISSN 1049-7323. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1049732317707726>

KHANNA, Preeya a Jose M CARMENA. Neural oscillations: beta band activity across motor networks. *Current Opinion in Neurobiology* [online]. 2015, č. 32, s. 60-67 [cit. 2020-03-03]. DOI: 10.1016/j.conb.2014.11.010. ISSN 09594388. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959438814002360>

KILNER, J.M. a R.N. LEMON. What We Know Currently about Mirror Neurons. *Current Biology* [online]. 2013, roč. 23, č. 23, R1057-R1062 [cit. 2019-09-10]. DOI:

10.1016/j.cub.2013.10.051. ISSN 09609822. Dostupné z:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982213013262>

KOLÁŘ, Pavel et al. Rehabilitace v klinické praxi. 1. vydání, dotisk, 2012. Praha: Galén, c2009. 714 s. ISBN 978-80-7262-657-1.

KOUKOLÍK, František. *Lidský mozek: funkční systémy, norma a poruchy*. 3., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Galén, c2012. ISBN 9788072627714.

LIANG, Mingli, Michael J. STARRETT a Arne D. EKSTROM. Dissociation of frontal-midline delta-theta and posterior alpha oscillations: A mobile EEG study. *Psychophysiology* [online]. 2018, roč. 55, č. 9 [cit. 2020-03-03]. DOI:

10.1111/psyp.13090. ISSN 00485772. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/psyp.13090>

LUNGHI, Claudia, Luca LO VERDE a David ALAIS. Touch Accelerates Visual Awareness. *I-Perception* [online]. 2017, roč. 8, č. 1 [cit. 2020-03-09]. DOI:

10.1177/2041669516686986. ISSN 2041-6695. Dostupné z:

<http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/2041669516686986>

MANCINI, Flavia et al. Pain relief by touch: A quantitative approach. *Pain* [online]. 2014, roč. 155, č. 3, s. 635-642 [cit. 2020-03-24]. DOI: 10.1016/j.pain.2013.12.024.

ISSN 0304-3959. Dostupné z: <https://lurl.cz/FzEgp>

MYSLIVEČEK, Jaromír, a kol. *Základy neurověd*. 2. vyd. Praha: Triton, 2009. 392 s. ISBN 978-80-7387-088-1.

NYSTRÖM, Pär. The infant mirror neuron system studied with high density EEG. *Social Neuroscience* [online]. 2008, roč. 3, č. 3-4, s. 334-347 [cit. 2019-09-09].

DOI: 10.1080/17470910701563665. ISSN 1747-0919. Dostupné z:

<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17470910701563665>

OREL, Miroslav a Roman PROCHÁZKA. *Výšetření a výzkum mozku: pro psychology, pedagogy a další nelékařské obory*. Vydání 1. Praha: Grada, 2017, 168 s. Psyché. ISBN 978-80-247-5539-7.

PÁNEK, David. *Elektroencefalografické koreláty pohybového chování a výkonnostní zátěže*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2016. 106 s. ISBN 9788024634357.

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. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12575463>.

PAVLŮ, Dagmar. *Speciální fyzioterapeutické koncepty a metody I.: koncepty a metody spočívající převážně na neurofyziologické bázi*. Brno: CERM, 2002. 239 s. ISBN 8072042661.

PLATA BELLO, Julio *et a.* The role of mirror neurons in neurosurgical patients: A few general considerations and rehabilitation perspectives. *NeuroRehabilitation* [online]. USA: IOS Press, 2014, roč. 35, č. 4, s. 665-671 [cit. 2019-09-10]. DOI: 10.3233/NRE-141167. ISSN 1878-6448. Dostupné z: <https://lurl.cz/DzEva>

RAKUSA, Martin *et al.* Separating the Idea from the Action: A sLORETA Study. *Brain Topography* [online]. 2018, roč. 31, č. 2, s. 228-241 [cit. 2020-02-24]. DOI: 10.1007/s10548-017-0584-9. ISSN 0896-0267. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10548-017-0584-9>

RAMACHANDRAN, Vilayanur Subramanian a Diane ROGERSRAMACHANDRAN. *Synaesthesia in phantom limbs induced with mirrors*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Science* [online]. 1996, roč. 263, č. 1369, s. 377-386 [cit. 2020-02-27]. DOI: DOI: 10.1098/rspb.1996.0058. ISSN 0962-8452. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.1996.0058>

RAMACHANDRAN, Vilayanur S. a David BRANG. Sensations Evoked in Patients With Amputation From Watching an Individual Whose Corresponding Intact Limb Is Being Touched. *Archives of Neurology* [online]. 2009, roč. 66, č. 10 [cit. 2020-03-08]. DOI: 10.1001/archneur.2009.206. ISSN 0003-9942. Dostupné z: <http://archneur.jamanetwork.com/article.aspx?doi=10.1001/archneur.2009.206>

RAMACHANDRAN, Vilayanur Subramanian a Diane ROGERS-RAMACHANDRAN. Mirror feedback assisted recovery from hemiparesis following stroke. In Reply to Morkisch et al: How to perform mirror therapy after stroke? Evidence from a meta-analysis. *Restorative Neurology and Neuroscience* [online]. 2019, roč. 37, č. 5, s. 437-443 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.3233/RNN-190971. ISSN 09226028. Dostupné z: <https://www.medra.org/servlet/aliasResolver?alias=iospress&doi=10.3233/RNN-190971>

RIZZOLATTI, Giacomo a Corrado SINIGAGLIA. The mirror mechanism: a basic principle of brain function. *Nature Reviews Neuroscience* [online]. 2016, roč. 17, č. 12, s. 757-765 [cit. 2019-09-10]. DOI: 10.1038/nrn.2016.135. ISSN 1471-003X. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/nrn.2016.135>

ROTHGANGEL, Andreas a Susy BRAUN. Mirror Therapy: Practical Protocol for Stroke Rehabilitation. *Pflaun Verlag* [online]. München, 2013, s. 1-17 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.12855/ar.sb.mirrortherapy.e2013. Dostupné z: <https://lurl.cz/kzEvR>

SALE, Patrizio a Marco FRANCESCHINI. Action observation and mirror neuron network: a tool for motor stroke rehabilitation. *European journal of physical and rehabilitation medicine* [online]. Torino, Italy: Minerva Medica, 2012, roč. 48, č. 2, s. 313-318 [cit. 2020 02-10]. ISSN 1973-9095. Dostupné z: <https://lurl.cz/2zEgE>

SALOMON, Roy et al. An invisible touch: Body-related multisensory conflicts modulate visual consciousness. *Neuropsychologia* [online]. 2016, č. 88, s. 131-139 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2015.10.034. ISSN 00283932. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0028393215302104>

STEFAN, K. Formation of a Motor Memory by Action Observation. *Journal of Neuroscience* [online]. 2005, roč. 25, č. 41, s. 9339-9346 [cit. 2020-02-10]. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2282-05.2005. ISSN 0270-6474. Dostupné z: <http://www.jneurosci.org/cgi/doi/10.1523/JNEUROSCI.2282-05.2005>

VYHNÁLKOVÁ, Lenka. *Využití Mirror terapie u pacientů po poškození mozku z pohledu ergoterapeuta: Diplomová práce*. Praha: Univerzita Karlova v Praze, 1. lékařská fakulta, 2016. 125 s., 8 příl. Vedoucí práce Bc. Zuzana Rodová M.Sc.

ZILLES, Karl. Brodmann: a pioneer of human brain mapping – his impact on concepts of cortical organization. *Brain* [online]. 2018, roč. 141, č. 11, s. 3262-3278 [cit. 2019-02-23]. DOI 10.1093/brain/awy273. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6202576/>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Brodmannovy arey (Cortical Functions: Reference, 2012).....	27
Obrázek 2: Poloha probanda s nasazenou EEG čepicí a umístění zrcadla během měření	33
Obrázek 3: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 6. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	36
Obrázek 4: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 6. Pohled shora. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	37
Obrázek 5: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 6, 31 a 24. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	37
Obrázek 6: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace obou rukou a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 6, 31 a 24. Pohled shora. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	37
Obrázek 7: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace levé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 31, 5 a 7. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	38
Obrázek 8: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace levé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta2 v BA 31, 5 a 7. Pohled shora, zespodu a zprava. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	38
Obrázek 9: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace pravé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	39
Obrázek 10: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání taktilní stimulace pravé ruky a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Pohled zespodu, zepředu zleva a zprava. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	40
Obrázek 11: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně.	41

- Obrázek 12: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima a na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu delta v BA 11 a 47. Pohled shora, zespodu, zepředu a zprava. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně. 41
- Obrázek 13: 2D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 21 a 20. Transverzální, sagitální a frontální řez. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně. 42
- Obrázek 14: 3D zobrazení statisticky významných změn proudové hustoty při porovnání stavu bez taktilní stimulace a klidového stavu s otevřenými očima na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$ ve frekvenčním pásmu beta3 v BA 21, 20 a 18. Pohled zprava a zezadu. Statisticky významné voxely jsou zobrazeny barevně. 42

Seznam tabulek

Tabulka 1: Brodmannovy arey, přehled základních funkcí (Myslivoček, 2009).....	27
Tabulka 2: Seznam probandů a vylosované pořadí modifikací.....	32
Tabulka 3: Souhrn výsledků všech párových skupin na hladině statistické významnosti $p \leq 0,05$	43
Tabulka 4: Subjektivní hodnocení probandů.....	44
Tabulka 5: Statisticky významné změny zdrojové aktivity u jednotlivých párových skupin na hladině významnosti $p \leq 0,05$; přehled frekvenčních pásem a Brodmannových areí a jejich relevantních funkcí.	Příloha č. 5

Seznam příloh

Příloha č. 1 – Vyjádření etické komise

Příloha č. 2 – Informovaný souhlas

Příloha č. 3 – Dotazník probandů

Příloha č. 4 – Mirror Therapy: Practical Protocol for Stroke Rehabilitation (strany 4-7)

Příloha č. 5 – Tabulka č. 5: Statisticky významné změny zdrojové aktivity u jednotlivých párových skupin na hladině významnosti $p \leq 0,05$; přehled frekvenčních pásem a Brodmannových areí a jejich relevantních funkcí