

UNIVERZITA KARLOVA  
Fakulta tělesné výchovy a sportu

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

**2022**

**Bc. Kateřina Pilátová**

UNIVERZITA KARLOVA  
Fakulta tělesné výchovy a sportu

**Změny mozkové aktivity při terapii s taktilním stimulem a  
terapií programem Ruka Ruk v porovnání se zrcadlovou  
terapií u rehabilitace horní končetiny**

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:

**MUDr. David Pánek, Ph.D.**

Vypracoval:

**Bc. Kateřina Pilátová**

Praha, 2022

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

V Praze, dne

.....

podpis diplomanta

## Poděkování

Ráda bych poděkovala MUDr. Davidu Pánkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a připomínky a za čas, který věnoval přípravě experimentu, dat a konzultacím. Dále děkuji doc. Ing. Karlu Hánovi, Ph.D. za odbornou konzultaci. V neposlední řadě děkuji všem probandům, kteří se ochotně zúčastnili našeho experimentu.

## **Abstrakt**

**Název:** Změny mozkové aktivity při terapii s taktilním stimulem a terapií programem Ruka Ruk v porovnání se zrcadlovou terapií u rehabilitace horní končetiny

**Cíle:** Cílem výzkumného projektu je zjistit změny zdrojové elektrické aktivity v sLORETA zobrazení při použití virtuální reality fungující na principu zrcadlové terapie v programu Ruka Ruk a při běžné zrcadlové terapii s variantou taktilní a haptické stimulace horní končetiny, v porovnání s klidovým stavem s otevřenými očima.

**Metody:** Výzkumu se účastnilo 12 zdravých osob ve věku 18-55 let. Elektrická aktivita mozku byla snímána pomocí skalpového EEG v 7 fázích experimentu. Aktivita mozku byla měřena v klidovém stavu, při terapii se sagitálně umístěným zrcadlem odrážejícím pohyb pravé horní končetiny a při terapii se senzorem Leap motion a monitorem se softwarem Ruka Ruk, kde účastníci viděli pouze virtuální horní končetiny. Software zrcadlil pohyb pravé horní končetiny na obě virtuální končetiny. Byla snímána elektrická aktivita mozku ve třech modifikacích u obou druhů terapie s přidáním stimulu levé horní končetiny haptického či taktilního s molitanovým válcem o šířce 10 cm. Pořadí modifikací bylo randomizováno. Záznam EEG byl zpracován a statisticky vyhodnocen v programu sLORETA, pro lokalizaci a 3D zobrazení zdrojové aktivity. Zdrojová aktivita při terapii byla porovnána s klidovým stavem před terapií. Pro vyhodnocení statisticky významných změn v mozkové aktivitě byl použit párový t-test s logaritmickou transformací dat o parametru vyhlazení 0,8 s použitím permutační metody využívající 5000 randomizací.

**Výsledky:** Zjistili jsme, statisticky významný rozdíl ve zdrojové aktivitě mozku na hladině významnosti  $p \leq 0,05$ , při terapiích s taktilním stimulem molitanovým válcem a bez taktilní stimulace a to ve frekvenčních pásmech alfa1-2, beta1-3, delta a theta. Zejména ve frontálním, parietálním a okcipitálním laloku specifikováno dle konkrétních Brodmannových areálů.

**Klíčová slova:** zrcadlová terapie, virtuální realita, haptický kontakt, taktilní stimulace, EEG, SLORETA, Leap motion

## **Abstract**

**Title:** Changes in brain activity in tactile stimulus therapy and Ruka Ruk therapy compared to mirror therapy in upper limb rehabilitation

**Objectives:** The aim of the research project is to determine the changes in source electrical activity in sLORETA imaging using virtual reality operating on the principle of mirror therapy in the Ruka Ruk program and in conventional mirror therapy with tactile and haptic upper limb stimulation, compared to the resting state with open eyes.

**Methods:** 12 healthy volunteers aged 23–42 participated in the experiment. The electrical activity of the brain was measured by scalp EEG in 7 phases of the experiment. Brain activity was measured at rest, during therapy with a sagittally placed mirror reflecting the movement of the right upper limb, and during therapy with a Leap motion sensor and a monitor with Ruka Ruk software, where participants saw only virtual upper limbs. The software mirrored the movement of the right upper limb on both virtual limbs. The electrical activity of the brain was sensed in three modifications in both types of therapy with the addition of a haptic or tactile left upper limb stimulus with a 10 cm wide foam cylinder. The order of modifications was randomized. The EEG record was processed and statistically evaluated in the sLORETA program, for localization and 3D display of source activity. The source activity during therapy was compared with the resting state before therapy. A paired t-test with logarithmic transformation of data with a smoothing parameter of 0.8 using a permutation method using 5000 randomizations was used to evaluate statistically significant changes in brain activity.

**Results:** We found a statistically significant difference in the source activity of the brain at the level of significance  $p \leq 0.05$ , in therapies with tactile stimulus foam cylinder and without tactile stimulation in the frequency bands alpha1-2, beta1-3, delta and theta. Especially in the frontal, parietal and occipital lobes specified according to specific Brodmann areas.

**Keywords:** mirror therapy, virtual reality, haptic contact, tactile stimulation, EEG, SLORETA, Leap motion

## Obsah

1	Úvod.....	11
2	Teoretická východiska práce .....	12
2.1	Pohyb a jeho řízení.....	12
2.2	Mozková kůra.....	13
2.2.1	Precentrální gyrus .....	13
2.2.2	Kortikální organizace.....	14
2.2.3	Role kůry v ovládní pohybů.....	14
2.3	Brodmannovy arey .....	15
2.3.1	Vybrané oblasti mozkové kůry rozděleny dle Brodmanna a jejich funkce 15	
2.4	Neuroplasticita .....	18
2.5	Zrcadlové neurony .....	20
2.5.1	Kanonické neurony .....	22
2.6	Zrcadlová terapie.....	22
2.6.1	Virtuální realita v zrcadlové terapii .....	25
2.6.2	Program Ruka Ruk.....	27
2.6.3	Leap motion .....	27
2.6.4	Kinetóza (cybersickness) .....	27
2.7	Elektroencefalografie .....	28
2.7.1	Mu rytmus.....	30
2.8	sLORETA .....	30
3	Experimentální část.....	32
3.1	Cíle práce .....	32
3.2	Úkoly práce .....	32

3.3	Výzkumné otázky.....	32
3.4	Hypotézy .....	33
4	Metodika práce .....	34
4.1	Popis výzkumného souboru .....	34
4.2	Použité metody.....	35
4.3	Měření a sběr dat.....	35
4.4	Analýza a statistické vyhodnocení dat .....	37
5	Výsledky .....	37
5.1	Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlovou iluzí bez podání taktilního stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima .....	37
5.2	Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima .....	40
5.3	Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima .....	41
5.4	Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě bez podání taktilního stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima .....	42
5.5	Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima	44
5.6	Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima	48
6	Diskuze .....	50



6.1	Diskuze k hypotéze č. 1 .....	50
6.2	Diskuze k hypotéze č. 2 .....	54
6.3	Diskuze k hypotéze č. 3 .....	55
6.4	Diskuze k hypotéze č. 4 .....	56
6.5	Diskuze k hypotéze č. 5 .....	58
6.6	Diskuze k hypotéze č. 6 .....	60
6.7	Limity studie .....	61
7	Závěry .....	61
8	Citovaná literatura.....	63
	Seznam příloh .....	75
	Příloha č. 1 .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
	Příloha č. 2 .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
	Příloha č. 3 .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>

## Seznam použitých zkratk

ANOVA	Analysis of variance
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
LORETA	low resolution brain electromagnetic tomography
M1	primární motorická oblast
MT	mirror therapy (zrcadlová terapie)
OE	open eyes (otevřené oči)
PCC	posterior cingulate cortex
PFC	prefrontální kortex
PET	pozitronová emisní tomografie
S1	primární sensorická oblast
SMA	supplementary motor area
sLORETA	standardized low resolution brain electromagnetic tomography
USB	Universal Serial Bus
VR	virtuální realita
MEG	extrakraniální magnetické pole
HPA	hypotalamus – hypofýza – nadledviny

# 1 Úvod

Optické iluze, které často vyvolávají fascinace nebo možné frustrace, jsou vytvářeny již delší dobu. Využívají se například v architektuře a obecně k upoutání pozornosti. Přestože jsou optické iluze zdrojem vzrušení, pro neurorehabilitaci jsou optické iluze považovány za zadní vrátka do lidské mysli a poskytují jedinečný způsob, jak ovlivnit nervové mechanismy, které jsou základem vnímání a jednání.

Zrcadlová terapie funguje především na principu teorie zrcadlových neuronů, neuroplasticity a zrcadlení pohybu aktivní končetiny přes středovou osu těla. Vytváří iluze o pohybu druhostranné neaktivní končetiny. Metoda se používá zejména v ergoterapii pro zlepšení motoriky horní končetiny, méně pro zlepšení pohyblivosti dolní končetiny. Ve fyzioterapii je pro nácvik motoriky končetin využíváno spíše jiných terapeutických konceptů se specifickými pohybovými vzory. Zrcadlová terapie je jednou z mála metod, kde postižená končetina je většinou pasivní a bez stimulace. To se však pomalu mění s příchodem virtuální reality do zrcadlové terapie. Virtuální realita nabízí lepší podmínky pro iluzi pohybu a přesvědčení pacienta o pravosti dané iluze. Virtuální prostředí lze nastavit na pacientovi známe, a tak podpořit emoční stopu terapie. Hlavní výhodou zrcadlové terapie ve virtuální realitě je umožnění pohybu nad rámec reálné aktivity. Dále je to možnost různorodosti terapie, včetně vytvoření terapeutických her pro větší motivaci či záznamů pohybu pacienta. Můžou se snížit i ekonomické náklady na terapii, i když zrcadlová terapie je nízkonákladová sama o sobě s virtuální realitou lze například zahájit skupinové cvičení a snížit tak personální náročnost terapie.

Tato práce se bude zabývat změnami zdrojové aktivity mozku při zrcadlové terapii a terapii se zrcadlením pohybu ve virtuální realitě. Obě tyto terapie se budou vyskytovat ve třech modifikacích – bez taktilní stimulace s taktilní stimulací molitanovým válcem a s haptickou stimulací lidským dotekem. Všechny tyto terapie budou provedeny při snímání elektrické aktivity mozku a následně vyhodnoceny pomocí programu sLORETA. Cílem práce bude zjistit, zda terapie vedou ke změnám zdrojové elektrické aktivity v mozkové kůře pozorovaným v zobrazení sLORETA.

## 2 Teoretická východiska práce

### 2.1 Pohyb a jeho řízení

Pohyb je základní aspekt života. Jeho aktivní provedení je řízeno nervovou soustavou za jistým účelem v reakci na podněty, které přicházejí z vnitřního i zevního prostředí. Zpětně lze z účelově řízeného pohybu posuzovat činnost CNS, čehož můžeme využít při diagnostice i terapii. (1) Pohyb je důležitý pro schopnost změny pozice v prostoru, vyjadřování, příjem a výdej energie a v neposlední řadě pro sociální kontakt. Pohyb vychází z interakce jednotlivce s úkolem v konkrétním prostředí. (2) Regulátorem a koordinátorem pohybu člověka je centrální nervový systém, který prostřednictvím zpětnovazebných informačních kanálů, reguluje efekторы pohybu, tedy svaly, což má dopad na opěrný subsystém. (3) Opakované pohybové chování ovlivňuje celkový výraz postury, držení těla i strukturu organismu. Pohybová aktivita má vliv na vnímání bolesti a samotný stav mysli, kdy podněty z vnitřního i vnějšího prostředí, které jsou přes receptory vedeny do CNS podněcují mentální i pohybovou aktivitu. (1)

Pojem *senzomotorika* vyjadřuje ovlivnění pohybu senzorickou aferencí, čehož je využíváno v rámci vybraných terapeutických metod. Při nedostatku zpětnovazebných informací pomocí povrchového i hlubokého cití je motorická funkce vždy nedokonalá. (1) V centrálním nervovém systému rozlišujeme tři úrovně senzomotorické kontroly pohybu: spinální, subkortikální a kortikální. Kortikální úroveň motorické integrace je nejvyšší úrovní kontroly CNS. Zahrnuje gnostickou funkci, například jako multisenzorická integrace umožňující uvědomění si obrazu těla, sebelokaci a perspektivu první osoby. Se zvyšující se schopností vnímání vlastního těla se zvyšuje kvalita fyzického pohybu a schopnost provádět izolovaný pohyb pouze v jednom segmentu. Zvyšuje se i schopnost relaxace. (4; 5) Pohyb vzniká interakcí více procesů, včetně těch, které souvisejí s vnímáním, poznáváním a akcí. Pro pohyb je zásadní percepce. Jedná se o integraci smyslových vjemů do psychologicky smysluplných informací. Vnímání zahrnuje jak periferní senzorický mechanismus, tak vyšší zpracování, které přidává interpretaci vjemu. Senzorické systémy poskytují informace o stavu těla (například o poloze těla v prostoru) a vlastnostech vnitřního i vnějšího prostředí, které jsou důležité pro provedení pohybu. (2) Na pohyb má vliv i emoční naladění jedince, limbický systém může měnit sílu motorické reakce a podporovat vývoj paměťových stop pro ukotvení

podmíněných reflexních spojení. (1) Vzhledem k tomu, že pohyb se obvykle neprovádí bez úmyslu, jsou pro motorickou kontrolu nezbytné kognitivní procesy. (2)

## **2.2 Mozková kůra**

Lidská mozková kůra se skládá z 2–5 mm silné vrstvy šedé hmoty obsahující 14–16 miliard neuronů. Po většině svého povrchu je dále stratifikována v šesti vrstvách. Šestivrstvá kůra je popsána jako „neokortex“, aby se odlišila od mnohem méně rozsáhlé oblasti kůry s méně vrstvami – allocortex. (6) Mozková kůra je rozdělena do 4 hlavních laloků: čelní, temporální, temenní a týlní. Pátým lalokem je Insula uložená na dně zevní brázdy. Mozková kůra obsahuje senzory, motorické a důležité asociační oblasti. (7) Na konci 18. století bylo klinickým lékařům zřejmé, že různé oblasti mozku, včetně podoblastí mozkové kůry, byly specializovány z hlediska jejich funkce. Jedním zajímavým a důležitým pozorováním je, že mnoho funkčně definovaných kortikálních modulů vykazuje vzory selektivní exprese shluků genů. To přináší surovou, klinicky definovanou makroskopickou organizaci kůry až na buněčnou a molekulární úroveň. Percepční a exekutivní část kůry je oddělena rýhou sledující centrální sulcus a poté boční trhlínu, čímž definuje přední frontální lalok jako velkou většinu exekutivní části mozkové kůry. (8)

Percepční část mozkové kůry je zodpovědná za zpracování smyslového vstupu a poté za rozpoznání vjemu, přiřazení jeho významu a jeho integraci s dalšími smyslovými vstupy. (8) Thalamus přijímá somatosenzorickou informaci a přenáší ji do primární somatosenzorické kůry v postcentrálním gyru temenního laloku. Mezi další důležité primární kortikální senzory patří sluchová kůra spánkového laloku a zraková kůra týlního laloku. (7)

Exekutivní oblast mozkové kůry se nachází převážně v čelním laloku, před centrálním sulkem. Je odpovědná za motorické reakce na podněty vnímané v prostředí. Exekutivní oblast plánuje a iniciuje vhodné reakce a současně potlačuje nevhodné reakce. Pro optimální behaviorální odpověď musí percepční i exekutivní část spolupracovat. (8)

### **2.2.1 Precentrální gyrus**

Nachází se zde primární a sekundární motorická kůra a kůra premotorická. Je odpovědný za řízení úmyslného pohybu. Významnou neuronální vrstvou primární motorické kůry je pátá vrstva, která se skládá z tzv. Becových pyramidových buněk poskládaných dle souvislosti k jednotlivým částem těla. Primární motorická kůra (M1) je

topograficky organizována a tvoří somatotropní mapu zvanou motorický homunkulus, kde největší plochu zaujímají neurony řídící svaly obličeje, jazyka, hrtanu a ruky. I proto bývá funkce ruky často změněna při korovém či subkorovém postižení. V oblasti M1 vzniká několik motorických drah. Kortikospinální trakt, kortikobulbární trakt a kortikobulbospinální trakt začínají v precentrálním gyrusu. (9; 10)

### **2.2.2 Kortikální organizace**

Obecným principem kortikální organizace, jak v percepční, tak v exekutivní části mozku, je to, že kortikální oblasti, které mají snadněji rozpoznatelné funkce (primární kůry), jsou ohraničeny regiony, které mají složitější organizační funkce a označují se jako asociační kůra. V tomto chápání se primární kůry často označují jako oblasti „nižšího řádu“, zatímco asociační kůry se nazývají „vyššího řádu“ mozkové kůry. Primární a asociační kůry jsou vzájemně propojeny krátkými kortikokortikálními spoji, které se skládají z axonů probíhajících od kůry jednoho gyrusu k sousedním oblastem kůry přes bílou hmotu v jádru gyru. (11)

Se vzdáleností od primárního kortexu se zvyšuje stupeň specifikace funkce v asociační kůře. Kortikální oblasti s nižší funkční složitostí jsou ohraničeny oblastmi, které vykazují postupně složitější sensorické zpracování. Například primární smyslová kůra (oblast zakončení axonů přenášejících informace vztahující se k jedné smyslové modalitě) je ohraničena kůrou, která se podílí na rozpoznání podstaty vjemu a přiřazení důležitosti vjemu. Tato druhá oblast se nazývá unimodální asociační kůra. S regiony unimodální asociační kůry sousedí oblasti multimodální asociační kůry, které integrují informace ze dvou nebo více sensorických modalit, což umožňuje stále složitější reprezentace prostředí. Podobná hierarchická organizace existuje i v motorických oblastech mozku. (11)

### **2.2.3 Role kůry v ovládní pohybu**

Zadní parietální kůra je zodpovědná za plánování pohybu. Premotorická kůra se zapojuje při pozorování pohybu či přípravě k pohybu. Doplňková motorická oblast obstarává bimanuální koordinaci. Všechny tyto oblasti také koordinují řízení pohybu. Cerebellum hraje klíčovou roli v motorické kontrole a motorickém učení. Nervové dráhy sestupující z těchto oblastí se k sobě blíží v bílé hmotě a většina vláken se kříží na úrovni mozkového kmene pro další inervaci na kontralaterální stranu těla přes míchu, zatímco zbytek pokračuje v inervaci ipsilaterální strany. Lidský mozek

se dále vyznačuje složitou neurální sítí, která navazuje komunikaci mezi několika senzomotorickými oblastmi. (12)

## 2.3 Brodmannovy arey

Korbidian Brodmann publikoval řadu příspěvků představujících základ moderního srovnání cytoarchitektoniky mozkové kůry savců pro snazší orientaci v mozkové kůře, kde každé centrum mozku má svojí funkci a jednotlivá centra spolu koordinovaně spolupracují v rámci synaptických drah a sítí. Poskytl základní pohledy na strukturální organizaci mozkové kůry a vytvořil koncept strukturních homologii kortikálních oblastí u savců. Brodmannova mapa kortikálních oblastí se postupem času měnila. (13) Nejčastěji se využívá rozdělení neokortexu na 11 krajin a 52 arey (viz obrázek 1). Rozlišují se primární korové oblasti (projekční) - tyto oblasti se zabývají jednou specifickou činností a sekundární korové oblasti, jejichž topické zapojení je méně přesné a plní roli pomocné oblasti zpracovávající informace pro primární oblasti včetně plánování pohybu. Sekundární oblasti můžeme rozdělit na suplementární a asociální. (14)

### 2.3.1 Vybrané oblasti mozkové kůry rozděleny dle Brodmanna a jejich funkce

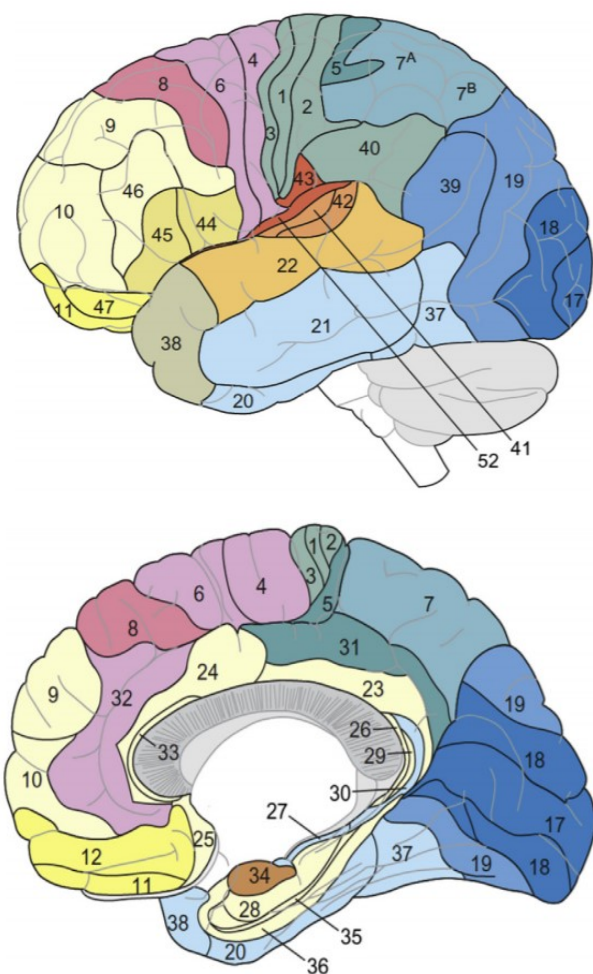
oblast	Označení dle Brodmanna	Funkce oblasti
Primární motorická (somatická) kůra (M1)	BA4	Zajišťuje přesné a zručné volní pohyby. Reaguje na senzorní stimulaci. Může být zahrnuta do mozkových obvodů podporujících smyslové vnímání. Aktivace BA4 může odrážet implicitní znázornění potenciálního pohybu. Při poruše oblasti vzniká paréza či plegie.
Premotorická kůra, suplementární motorická oblast (SMA)	BA6	Přijímá senzorní informace z ostatních oblastí cortexu, podílí se na iniciaci a zahájení pohybů, sekvencování a plánování pohybů. SMA se aktivuje také při představě pohybu. Hlavní jazykovou funkcí oblasti je motorické programování řeči.

		Při porušení vzniká apraxie, pacient ztrácí schopnost využít zpětnou vazbu k provedení účelného pohybu.
Frontální zrakové pole, laterální a mediální suplementární motorická oblast	BA 8	Odpovídá za sledování pohyblivého cíle, účastní se široké škály funkcí, včetně motorických, jazykových i k udržení pozornosti, motorickému učení a předvídání bolesti. Dále se podílí na procesech paměti, zejména pracovní paměti, topografické paměti a plánování pohybu.
Brocova oblast	BA 44, 45	Koordinuje tvorbu řeči, uchování pracovní paměti slov a řeči, podílí se na procesech uvažování
Primární somatosenzitivní kůra	BA 1-3	Zajišťuje somatosenzorické vnímání, účastní se organizace pohybu, dále předvídání pohybu a je jednou z oblastí, kde se vyskytují zrcadlové neurony.
Sekundární somatosenzitivní asociační oblast	BA 5, 7	Účastní se zpracování gestikulace, motorických obrazů, bimanuální manipulace a jiných dovedností. Je zde centrum pracovní paměti a aktivity zrcadlových neuronů. Pravá sekundární senzomotorická kůra je zjevně zapojena do zpracování vizuálních vzorů a obrazů, včetně vnímání prostoru. Klinické pozorování ukazuje, že poškození levého parietálního laloku je spojeno s ideomotorickou apraxií.
Primární zraková oblast	BA 17	Aktivuje se nejen fyzickou prezentací vizuálních informací, ale také při představě. Podílí se na detekci intenzity světla, rozpoznávání barev a detekci vizuálních



		vzorů. Dále na zpracování vizuoprostorových informací, sledování pohybu, vizuální pozornosti, kódování slov a tváří.
Asociační zrková oblast	BA 18, 19	Oblast se účastní detekce intenzity světla, vzorů a dalších vizuálních funkcích.
Asociační oblasti: Cortex prefrontalis, všeobecná analyzační oblast, řečová oblast	BA 9, 10, 11, 46	BA9, 10, 46 mají významnou účast na paměti, zejména na kódování paměti, načítání paměti a pracovní paměti, roli při organizování paměťových strategií a ovládání paměti, BA11 je oblastí osobní integrity a změny osobnosti, oblast BA46 se navíc účastní aktivity zrcadlových neuronů v rámci neuronové sítě.
Insula	BA 13,14,15,16	Přijímá informace z thalamu a amygdaly. Je propojena s primární somatosenzorickou kůrou. Má širokou škálu rozmanitých funkcí, které jsou spojeny s vnímáním a interpretací bolesti, změn teploty, doteku, čichu, chuti, jazyka, paměti a emocí.

*1: Vybrané oblasti mozkové kůry dle Brodmanna a jejich funkce. Zdroj:(15–17)*



Obrázek 1: Brodmannovy arey. Zdroj:(18)

## 2.4 Neuroplasticita

Neuroplasticita je schopnost mozku krátkodobě podstoupit funkční změny a také dlouhodobě podstoupit strukturální změny, aby se přizpůsobil změnám v životním prostředí, centrálním nebo periferním zraněním a stárnutí. (19) Hlavním mechanismem pro dosažení neuroplasticity je reorganizace mozku.

Stimulace reorganizace mozku se provádí: obohacením prostředí, stimulací pozornosti, sociální interakcí, hmatovou stimulací, motorickým přeučněním a přímou stimulací mozku. (19; 20)

Kortikální reorganizace pro obnovení pohybu ruky postižené mrtvicí se provádí třemi způsoby, které se navzájem nevylučují:

1. Oboustranná kortikální aktivace s významným nábořem nervových sítí na neovlivněné hemisféře.
2. Zvýšení nábořu v sekundárních kortikálních oblastech na postižené hemisféře.

### 3. Nábor nervových cest kolem infarktové oblasti. (19)

K reorganizaci může dojít na různých úrovních ve formě změněné syntézy neurotrofních faktorů, synaptogeneze, kortikální excitace, reprezentace a motorického chování. Studie (21) zabývající se morfometrií také poskytla poznatky o změně množství šedé hmoty mozkové tkáně při reorganizaci. Pomocí MRI byla zjištěna významná expanze šedé hmoty mozkové v perilesionální premotorické kůře, ipsilesionálním mediodorsálním thalamu a caudate nucleus a koncentrace šedé hmoty mozkové v contralesionálním cerebellum u pacientů v subakutní fázi po proděláním ischemické cévní mozkové příhody. Podle modelu interakce měli pacienti s rychlou rekonvalescencí více perilesionální než subkortikální expanzi, zatímco u pacientů s poruchou zotavení to bylo naopak. Expanze šedé hmoty mozkové je spojena s úspěšným zotavením po mozkové mrtvici, což pravděpodobně odráží restrukturalizaci místních kortikálních sítí. (21) Index laterality nebo index asymetrie (výpočet dominance hemisféry) pomocí funkčního zobrazování magnetickou rezonancí (fMRI) rovněž potvrzuje existenci plasticity mozku indukovanou motorickými terapiemi. (12)

Funkční obnova po poškození CNS vyžaduje, aby pacient vyvinul pohybové vzorce, které splňují požadavky funkčních úkolů perцепčním, motorickým a kognitivním poruchám navzdory. Neuroplasticita mozkové tkáně je umožněna díky difúznímu ukládání paměťových stop, nikoliv lokálnímu. (1) Terapeutické strategie, které pomáhají pacientovi znovu se naučit plnit funkční úkoly, s přihlédnutím k základním poruchám, jsou tedy zásadní pro maximalizaci obnovení funkční nezávislosti. (2)

Kortikální reprezentace těla je u zdravých dospělých osob neustále modifikována v reakci na aktivitu, chování a získávání dovedností. Kortikální reorganizace také nastává po periferním poranění, či při poranění CNS. Příkladem může být amputace a proděláním cévní mozkové příhody. Výzkum kortikální reorganizace po poranění nervu naznačuje, že fokální léze otevírá okno zvýšené plasticity v CNS. (22)

Po přerušení periferního nervu není korespondující část somatosenzorického kortexu zaniklá, i když do ní z receptorů v dané periferní části nepřichází žádný imput. Sousední receptory rozšíří svá vnímavá pole tak, aby pokrývala velkou část denervované oblasti. Při přetnutí větší oblasti může dojít k tomu, že některé somatosenzitivní části mozkové kůry nebudou reagovat ani měsíce po lézi. Reaktivace je způsobena zvýšenou citlivostí slabých vstupů nervů ze sousedních oblastí. Pokud denervace překročí určitý rozsah, mohou na periférii zůstat oblasti bez odezvy na příhodný stimul. (11; 24)

Při postižení CNS dochází ke změnám kortikálních map a změnám ve vzorech nervové aktivace. Ohniskové postižení CNS může zvýšit kapacitu strukturálních a funkčních změn v CNS, jako je tomu v období vývoje. (2) Mozky jsou v podstatě predikční stroje, které se neustále pokoušejí přizpůsobit příchozí smyslové vstupy očekáváním nebo předpovědím. (11; 23; 24)

Při studiu jedinců s poraněním mozku je důležité si uvědomit, že výsledkem procesu obnovy není na nervové a základní kognitivní úrovni návrat do předtraumatické situace. Místo toho výsledek obnovy představuje nový stav věcí, který byl vytvořen v interakci s prostředím během období rehabilitace. Algoritmické strategie, které tvoří základ posttraumaticky pozorovatelných povrchových jevů, byly vybrány a potenciálně konstruovány prostřednictvím interakcí mezi jedincem postiženým traumatem a široce definovaným prostředím. (20)

## **2.5 Zrcadlové neurony**

Zrcadlové neurony byly původně pozorovány u makaků ve ventrální premotorické kůře oblasti F5 a parietální kortikální oblasti, později byly objeveny také u lidí. Aktivují se, když osoba provádí daný motorický akt, i když jen pozoruje jinou osobu provádějící motorický akt s podobným cílem. (25) Zrcadlové neurony pravděpodobně hrají klíčovou roli v porozumění činnosti, předvídání, napodobování a sociálnímu chování jedince, tedy v interních reprezentacích akcí. Pozorování akcí prováděných jinou osobou může aktivovat neurony v senzomotorické kůře a toto zjevné zrcadlení pozorovaných akcí v mozku vedlo k výrazu „zrcadlové neurony“. Aktivace senzomotorické oblasti během pohybového výkonu odráží její účast v rozsáhlé pohybové neuronální síti, která obvykle zahrnuje nejen primární motorickou kůru, ale také premotorickou kůru, bazální ganglia a mozeček. Předpokládá se, že zrcadlový systém je konfigurován pomocí senzomotorického učení, tj. opakovaným společným výskytem mezi senzorickým vstupem a motorickou odpovědí. (16)

Studie s využitím fMRI (26; 27) prezentují, že frontální systém zrcadlových neuronů u lidí může být součástí širší sítě mozkových oblastí zapojených do imitace učení. Neurony do ní spadající jsou umístěny v dolním parietálním laloku, zadní části dolního frontálního gyru, horním temporálním sulcu, přilehlé premotorické kůře a limbickém systému. Dále se aktivují struktury zapojené do motorické přípravy. (16) Tato širší síť, která má schopnost spojit vnímání vnějšího prostředí s vnitřními senzomotorickými

reprezentacemi, může hrát klíčovou roli v mnoha aspektech sociálního poznání od vnímání biologické akce po empatii. (27)

Mozek funguje v první řadě jako plánovací a kontrolní systém pro organismy, jejichž hlavním úkolem je zkoumat okolní svět, čelit jeho výzvám a uniknout hrozbám. (18) K tomu může být funkce zrcadlových neuronů značně nápomocná. Pro jedince v moderní společnosti je důležité tyto funkce umět korigovat.

Během pozorování akce zrcadlové neurony kódují nejen samotné akce, ale hlavně samotné cíle akce. Pomocí zachování cíle pohybu s různými variantami jeho provedení bylo zjištěno, že parietofrontální zrcadlové neurony reagují na cíl pohybu jako je například uchopení kousku jídla, i když je tato akce prováděna různými způsoby. Naopak při stejném pohybu, ale jiném cíli dané akce se aktivita zrcadlových neuronů mění. To znamená, že tyto zrcadlové neurony kódují výsledek akce. (28)

Směr, kterým je výzkum zrcadlových neuronů veden, má však i svoje odpůrce. Greg Hickok (2009) napsal kritický článek s názvem „Osm problémů teorie zrcadlení neuronů porozumění akce u opic a lidí“. Tvrdí, že je to přímý důsledek nadměrného důrazu na teorii porozumění akci, která odvrátila pole od vyšetřování dalších možných (a potenciálně stejně důležitých) funkcí. (18; 25)

Ačkoli se většina motorických dovedností získává fyzickou praxí, ukázalo se, že pouhé pozorování pohybů vede také k následným konkrétním nárůstům výkonu. Důležitou fyziologickou složkou zvýšení behaviorálního výkonu je trvalá změna lokálních kortikálních pohybových reprezentací, drah motorické paměti. Není však známo, zda samotné pozorování je dostatečné k zanechání stopy paměti v pohybových reprezentacích a tvorbě motorických programů v primární motorické kůře. Bylo navrženo, že zrcadlový neuronový systém je nástrojem motorického učení. Lidská primární motorická kůra (M1) se aktivuje v rámci zrcadlového neuronálního systému při pozorování pohybu a je schopna vytvořit motorickou paměťovou stopu a podílet se tak na motorickém učení. (29)

Zrcadlové neurony u lidí se na rozdíl od opic aktivují i při sledování mimovolných pohybů. Pozorování volní motoriky způsobuje aktivaci zrcadlového neuronového systému z frontálních a temporálních uzlů, zatímco pozorování mimovolných pohybů má za následek aktivaci pouze zrcadlových neuronů z frontálního uzlu. Jsou aktivní během pozorování akce, mentální stimulace (zobrazování) a provádění akce. Ukázalo se

například, že pasivní pozorování akce usnadňuje M1 excitabilitu svalů využitých k provedení této konkrétní akce. Zrcadlové neurony jsou nyní obecně chápány jako systém, který je základem učení nových dovedností skrze vizuální kontrolu dovednosti. (30)

Zrcadlové neurony se začleňují do mechanismu anticipace. Jejich aktivita se dále zvyšuje při pozorování biologicky významného kontextu ve smyslu aktivit denního života jedince. (31) Zrcadlové neurony mají klíčovou roli v zrcadlové iluzi a zrcadlové terapii. Tyto neurony poskytují neurofyziologický mechanismus, jehož prostřednictvím jsou vizuální signály interpretovány jako proprioceptivní a poté vyvolávají zrcadlovou iluzi. (32)

Aktivité zrcadlových neuronů může při pozorování manipulace s předmětem předcházet aktivita kanonických neuronů.

### **2.5.1 Kanonické neurony**

Podobně jako u zrcadlových neuronů činnost kanonických neuronů byla zaznamenána ve ventrální premotorické korové oblasti F5 dolního frontálního laloku, u lidí oblast Brocova centra řeči. Aktivita kanonických neuronů stoupá, pokud pozorovaný statický předmět je určen k osobě již známé činnosti, tedy pokud osoba pozorující objekt rozpoznává jeho možné využití (např. hrníček – pít). Psycholog Gibson zkoumal tyto vztahy mezi jedincem a prostředím a označil je termínem affordance. (33; 34)

## **2.6 Zrcadlová terapie**

Použití rukou u lidí hraje klíčovou roli pro většinu sociálních a kognitivních funkcí, včetně komunikace a činností pro výkon povolání. Ruční motorická dovednost neboli schopnost správně, rychle, racionálně a vynalézavě vyřešit motorický problém ovlivnila přežití druhu, jak fylogeneticky, tak ontogeneticky, a tato dovednost dosáhla u lidí maximální exprese. To naznačuje, že centrální nervový systém se vyvinul tak, aby dosáhl velmi složitých vzorů propojení mezi oblastmi. Taková konektivita je základem komplexních nervových obvodů, které podporují specifické motorické funkce. (26)

Vystavení vizuálnímu pohybovému poli, které simuluje optický tok na sítnici generovaný vlastním pohybem, obvykle působí vnímání subjektivního pohybu vlastního těla. Tento jev je znám jako „vekce“. Například když osoba uvnitř stojícího vlaku pozoruje vlak na sousední trati, který se začíná pohybovat, je pravděpodobné, že vnímá,

že je to její vlak, který se pohybuje v opačném směru, zatímco pozorovatelé stojící venku na nástupišti při pohledu na vlak málokdy zažijí iluzi vlastního pohybu. Tento jev je známý jako „vlaková iluze“. (35)

Zrcadlová terapie (mirror therapy) je neinvazivní terapeutická technika, kterou poprvé zavedli Ramachandra a Rogers-Ramachandra v roce 1996. Tato terapie vznikla použitím zrcadlových obrazů ke studiu účinků vizuálního podnětu zpětné vazby pro ovlivnění bolesti a jiných pocitů fantomové končetiny. U této metody je postižená končetina skryta a pacient se během aktivity soustředí na zrcadlový odraz zdravé končetiny. Vznikne vizuální iluze, která navodí u pacienta dojem, že zasažená končetina je plně funkční a je schopna pohybu. (12) Existují dva způsoby použití tohoto typu léčby. V jednom pacient umístí postiženou končetinu do „zrcadlového boxu“, aby ji skryl před zrakem. Nepostižená končetina je poté sledována v zrcadle. Druhou metodou je umístit pacienta s postiženou končetinou v úhlu k zrcadlu tak, že v zrcadle je vidět pouze plně funkční končetina. Pacient nabírá vizuální dojem, že obě horní končetiny či obě dolní končetiny provádějí plné pohyby. Výsledná stimulace mozku podporuje proces obnovy spojený s neuroplasticitou CNS. (36; 37)

Odraz pohybu horní končetiny v zrcadle je účinným prostředkem k vyvolání kinestetické iluze ve statickém rameni skrytém za zrcadlem. Výsledky výzkumu naznačují, že tato iluze není pouze vizuálního původu, ale je výsledkem kombinace vizuálních a proprioceptivních signálů z obou horních končetin. Zrcadlová iluze vyvolaná odrazem vlastní pohybující se ruky, zrcadlem umístěným v sagitální rovině, dává vzhled symetrických, bimanuálních pohybů. (32)

Zrcadlová terapie se běžně používá s příznivými výsledky k úlevě od fantomové bolesti u amputovaných končetin, ke zlepšení motoriky a vnímání zasažené horní končetiny u pacientů po proděláním cévní mozkové příhody. Dále se využívá u komplexního regionálního bolestivého syndromu, zřídka u stavu po zlomeninách zápěstí a při somatoparafenii. Příznivá obnova kontroly motorických funkcí může být způsobena nervovou adaptací. (12; 38)

Tato nízkonákladová terapie je jediná motorická technika, při které je postižená končetina v klidové poloze. Motorické zotavení poškozené končetiny je tedy nejspíše výsledkem nervové reorganizace na určité úrovni. Je však třeba dále prozkoumat jeho modus operandi pro indukci neuroplastických změn. (12)

Furukawa (2012) zkoumal pomocí povrchové elektromyografie, jak sledování zrcadlového obrazu během terapie se zrcadlem zvyšuje svalovou aktivitu nedominantní nepohyblivé horní končetiny skryté za zrcadlem u 24 zdravých dobrovolníků. Výsledkem bylo zjištění dvou až šestinásobného nárůstu amplitudy povrchové myografie na nedominantní horní končetině, oproti stavu bez zrcadlení pohybu dominantní horní končetinou. Může to znamenat, že změna mozkové aktivity vyvolaná sledováním zrcadlového obrazu ovlivnila motorickou funkci nedominantní horní končetiny. EMG svalová aktivita dominantní horní končetiny zůstávala během každého úkolu konstantní. (38)

U zdravých jedinců zrcadlová terapie vyvolává výraznou mozkovou aktivitu. Mozková hemisféra, kontralaterální k pohyblivé končetině, vykazuje aktivaci v primární motorické kůře a také změnu v inter- nebo intra-hemisférické inhibici. Zrcadlová terapie také indukuje svalovou aktivitu v neaktivní postižené končetině. U hemiparetických subjektů po prodělání cévní mozkové příhody indukuje zrcadlová intervence v ipsilesionální primární motorické kůře zvýšení interhemisférické komunikace, normalizuje asymetrické elektrické aktivity a aktivuje specifické oblasti, jako je precuneus a posterior cingulate cortex. (12)

Od svého původního návrhu byla zrcadlová terapie zavedena jako úspěšná neurorehabilitační intervence u vybraných neurologických poruch k obnovení motorických funkcí nebo ke zmírnění bolesti. (39)

Použití zrcadlové terapie v léčbě a výzkumu je redukováno několika technickými a koncepčními omezeními, jako je velikost a hmotnost končetiny v poměru k zrcadlu, což snižuje míru volnosti pro možné pohyby před zrcadlem a omezuje jeho použitelnost v terapii. Bylo navrženo, že vidět skutečnou pohybující se ruku, kromě vizuálního odrazu pohybující se ruky, může být irelevantní distraktor, který snižuje schopnost subjektu zůstat soustředěný na odraz pohybující se ruky. (39)

Christopher Milde a jeho tým ve své studii (39) využili zrcadlové brýle, které omezují zorné pole na vizuální odraz zdravé končetiny. Tento odraz nahrazuje skrytou končetinu v zorném poli, čímž je skutečně pohyblivá končetina vizuálně uzavřena. Toho je dosaženo zakrytím oka ipsilaterálně k pohybu a zrcadlením vizuálního hemifieldu do druhého oka. Při využití zrcadlových brýlí zjistili zvýšení interhemisférické konektivity mezi M1 oblastí kontralaterálně k pohyblivé ruce a senzomotorickou reprezentací



nezrcadlené ruky oproti využití zrcadlového boxu. Funkčně však byly výsledky obou terapií srovnatelné.

Yavuzer (2008) a jeho tým ověřovali efekt zrcadlové terapie na zlepšení motoriky horní končetiny u 36 pacientů v postakutní fázi po proděláním cévní mozkové příhody. (30) Pacienti cvičili každý den 30 minut po dobu čtyř týdnů navíc k normálnímu rehabilitačnímu programu. Došlo ke zlepšení v porovnání vstupního a výstupního hodnocení Functional independence movement u testované skupiny (o 0.83, 0.89 a 4.10; všechny  $P < 0,1$ ) po čtyřech týdnech a při šesti měsíčním sledování (o 0.16, 0.43, respektive 2.34; vše  $P < 0,05$ ). Dále došlo ke zjištění, že vliv této formy intervence na spasticitu se nijak nelišil od kontrolní skupiny ani po čtyřech týdnech od zahájení intervence ani po šesti měsících. (30)

### **2.6.1 Virtuální realita v zrcadlové terapii**

Videa s virtuální realitou jsou dnes využívána nejen v herním průmyslu, ale i při sportu, k edukaci a v medicíně. S pokrokem na poli informačních technologií se vyskytla možnost využití virtuální reality pro rehabilitaci ve virtuálním prostředí. Virtuální prostředí je softwarový systém, který poskytuje simulaci skutečných úkolů v rehabilitační terapii. Virtuální realita se v dnešní době hojně využívá ke zvýšení intenzity intervence ve spojení s přístrojovou rehabilitací. Pacientovi toto propojení poskytuje vjemy, které mohou být v jeho reálném světě nedosažitelné. Úkolem virtuální reality je přesvědčit mozek, aby na vizuální a akustické podněty reagoval tak, jako by se jednalo o skutečné události a tomu podmínil řízení eferentních odpovědí na dané podněty. Lze ji využít jako doplněk k běžné terapii či pro domácí trénink a ke kontrole správnosti provedení cviků. (40; 41)

Ve virtuální realitě může být pacient veden k soustředění pozornosti pouze na danou část těla či vykonávat pohyb, který v normální realitě nezvládne. Terapie ve virtuálním prostředí se v kombinaci s přístrojovou rehabilitací používá u pacientů s poruchou stability či s poruchou motoriky horní končetiny, například po proděláním cévní mozkové příhody. (42–44)

Ve virtuální zrcadlové terapii je, stejně jako při terapii se zrcadlem, zrcadlena aktivita zdravé horní končetiny a představuje tak pohyb druhé horní končetiny. Jednou z výhod používání virtuálního prostředí při rehabilitaci horní končetiny je snadnost úpravy parametrů terapie. Pacientovi může být zobrazena pouze jedna či obě horní

končetiny. Při využití virtuální reality nemusí pacient zaujímat asymetrickou polohu s rotací hlavy a trupu směrem k zrcadlu. Je možné například perцепčně rekalibrovat propriocepci v postižené horné končetině, aby byl pacient klamán o skutečném rozsahu pohybu postižené horní končetiny. (32)

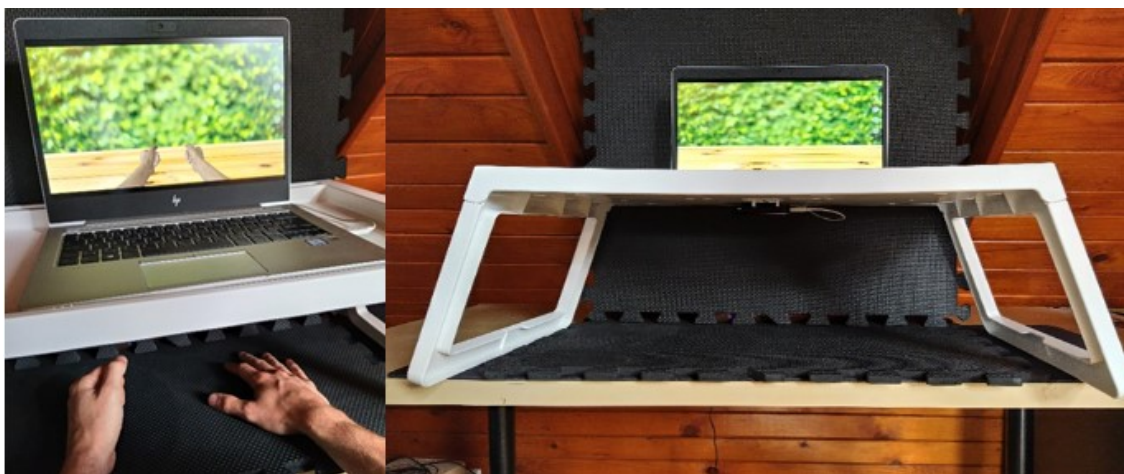
Kombinací vizuálních a proprioceptivních podnětů při terapii ve virtuální realitě se zrcadlením pohybu horní končetiny a jejich vlivem na vyvolání kinestetické iluze se zabýval Marion Giroux a jeho tým. Studie (32) se zúčastnilo 34 žen. Účastnicím byla nasazena náhlavní souprava pro virtuální realitu. Jedna z paží účastnic mohla být vedena k pasivní flexi či extenzi motodlahou. Tento pohyb byl kombinován s posuny levého a pravého předloktí avatara ve virtuální realitě. Studie probíhala ve třech podmínkách: 1. Motodlaha pohybovala jednou rukou účastnic, ve VR brýlích byl naznačen pohyb obou horních končetin (bimodální podmínka), 2. Motodlaha nepohybovala ani jednou rukou účastnic, ve VR brýlích byl naznačen pohyb obou horních končetin (testuje se vizuální dojem) a 3. Motodlaha pohybovala jednou rukou, ale ve VR brýlích byly obě ruce zakryté (testuje se proprioceptivní dojem). Celkem 28 účastnic zažilo kinestetickou zrcadlovou iluzi ve své statické paži. ANOVA odhalila významný účinek sensorických podmínek ( $F(2,54) = 29, p < 0.0001, \eta^2_p = 0.52$ ) s průměrem  $\pm$  SD trvání kinestetické iluze delší v bimodálním stavu ( $69.5\% \pm 30.4$ ) než ve dvou unimodálních podmínkách: vizuální stimul:  $31.5\% \pm 32$ ; propriocepce:  $20.5\% \pm 28$ ). Síla iluze (vyjádřená rychlostí a dobou trvání) vyvolaná bimodálním stavem byla vyšší než ta, která byla pozorována v obou unimodálních podmínkách. (32)

Již více autorů ve svých studiích (19; 37; 45) popisuje efekt taktilní stimulace při terapii ve virtuálním prostředí. Poskytování haptických podnětů má tedy potenciál maskovat smyslové nesrovnalosti mezi vizuálním a proprioceptivním vnímáním a napomáhat k reorganizaci mozkové kůry. Statisticky významné rozdíly hlavního účinku haptické zpětné vazby pro vysoké prahové hodnoty jasně ukazují, že přidání hmatových dotykových událostí zvyšuje prahovou hodnotu, při které je patrný nesoulad mezi vizuálním a proprioceptivním vnímáním.

Ve studii (19) je haptická stimulace pro zvýšení efektu terapie ve virtuálním prostředí zprostředkována formou vibrační rukavice. Při kontaktu pacienta s předmětem ve virtuální realitě se spustí vibrace, která taktilně stimuluje receptory povrchového cití pro pocit kontaktu s předmětem.

### 2.6.2 Program Ruka Ruk

Počínaje již popsanými účinky terapie se zrcadlem byl nakonfigurován systém, který nahradil zrcadlo soupravou využívající virtuální prostředí. Systém obsahuje zařízení Leap Motion pro sledování pohybů horních končetin pacienta, program Ruka Ruk pro zobrazení horních končetin a možnosti výběru různého prostředí a stolek bránící výhledu na fyzické horní končetiny pacienta. Horní končetiny pacienta jsou umístěny tak, aby pacient jejich vlastní pohyb neviděl a mohl se plně soustředit na virtuální prostředí. Pacient vidí obraz pohybu jedné horní končetiny zrcadlený a imitující stejný pohyb obou virtuálních horních končetin (viz obrázek 2). Technologie umožňuje konfiguraci optimální pozice zobrazení horních končetin přímo pro daného pacienta. Dále je možné pacientův pohyb horní končetinou zaznamenat a následně pacientovi přehrát, například pro vytvoření cvičební jednotky či zjištění zlepšení oproti předchozí terapii. Scéna je vykreslena pomocí enginu Unity3D. Program Ruka Ruk by do budoucna mohl usnadnit, zintenzivnit a obzvláštnit terapii pacientů s poruchou motoriky horní končetiny, zatím však nelze očekávat jeho diagnostické využití. (46)



Obrázek 2: Virtuální zrcadlová terapie s programem Ruka Ruk. Zdroj: vlastní

### 2.6.3 Leap motion

Je komerční zařízení sestavené ke sledování pohybu předloktí, rukou a prstů. Obsahuje dvě kamery a tři infračervené diody. Na základě těchto prvků integrovaná procesorová jednotka generuje a přenáší obraz ve stupních šedi do počítače pomocí připojení USB. V zahraničí se využívá při rehabilitaci u pacientů s poruchou motoriky, zejména po cévní mozkové příhodě. (40; 42; 43)

### 2.6.4 Kinetóza (cybersickness)

Kinetóza, neboli nemoc z pohybu (motion sickness), je způsobena smyslovým konfliktem nebo smyslovým nesouladem mezi skutečnými a očekávanými vzory vestibulárních, vizuálních a kinestetických vstupů. Důsledkem „teorie smyslového konfliktu“ je to, že podobně jako reakce bojovat či utéct je pohybová nemoc považována za obranný reflex, který je zachován evolučně již od úrovně ryby. Podporovaná hypotéza navrhuje, že se mozek vyvinul tak, aby rozpoznal jakékoli narušení očekávaných vzorců vestibulárních, vizuálních a kinestetických informací jako důkaz poruchy centrálního nervového systému a aby zahájil nevolnost a zvracení jako varování a obranu proti možnému požití neurotoxických látek. Pohybová nemoc u člověka nebo jiných zvířat je neúmyslná aktivace obranného reflexu smyslovými konflikty. (47)

Nemoc z virtuálního prostředí (VR sickness, cybersickness) je doprovázená pocením, zíváním, závratěmi, prostorovou dezorientací, nestabilitou, únavou a nevolností. Přesný mechanismus vzniku tohoto jevu nebyl dosud objeven. Vědci se pouze domnívají, že příčina tkví ve smyslovém konfliktu, latenci pohybu k fotonu, rychlosti optického toku a věrohodnosti virtuálního prostředí. Subjektivně se dá míra kinetózy při využití virtuální reality změřit pomocí dotazníku Motion sickness susceptibility questionnaire. Pro objektivní měření změn v mozku při nemoci z virtuálního prostředí se ve studiích využívá EEG. (44, 48) Dosud byly zaznamenány změny vln zejména ve frontální oblasti mozku. Oblast čelního mozku je zapojena do motorických funkcí, spontánnosti a kontroly impulzů. Proto nepřetržitě vystavení silným stimulům VR může způsobit, že se vlny frontální oblasti mozku změní a naznačují stav excitace, úzkosti nebo zahlcení podněty. (44)

## 2.7 Elektroencefalografie

Mozková tkáň je schopna vytvořit měřitelnou elektrickou rytmickou aktivitu, které kmitá o různých frekvencích. Tato aktivita je tvořena současnou akcí jednotlivých neuronů, které se vyskytují v různých neuronálních sítích. (49) Prostřednictvím elektroencefalografie se tato aktivita hodnotí v klinické diagnostice. Při neuronální aktivitě dochází k pružným změnám v rámci následujících frekvenčních pásem (delta 0–3 Hz, theta 4–7 Hz, alfa (Mu) 8–13 Hz, beta 14–30 Hz a gamma nad 30 Hz). (50)

Elektrická aktivita mozku vzniká synchronizací činností neuronů kůry mozku. Elektroencefalogram je tvořen současnou činností neuronů thalamu a kortexu. Za hlavní zdroj aktivity se zde považuje synchronizace membránových potenciálů

synaptodendritických membrán v povrchových vrstvách kortexu a thalamu generujícího rytmy pro alfa a beta aktivitu. Theta a delta aktivitu produkuje systém asociačních a komisurálních drah. Základním rytmem je aktivita alfa-a s největší aktivitou v okcipito-parieto-temporální oblasti při zavřených očích. Má frekvenci 8–13 Hz, což značí počet cyklů za vteřinu. Na elektroencefalografu by se tato aktivita měla projevit jako rytmická se sinusoidním tvarem. Alfa aktivita je modifikována při výskytu organické léze, u biologicky nezralého mozku a při jiném než bdělém stavu se rozpadá. Základními vlastnostmi mozkové kůry z pohledu vedení elektrické aktivity jsou stejnosměrný potenciál a impedance. (51–53)

Elektroencefalografie (EEG) je efektivní vyšetřovací metoda funkce mozku, která pomáhá získávat z povrchu pokožky hlavy sumační postsynaptické korové neurální potenciály odpovídající různým stavům. Slouží k pochopení základních neurálních procesů, které jsou základem složitých kognitivních operací vyššího řádu a funkčních domén. (53, 54) Pro snímání elektrické aktivity mozku z oblasti pokožky hlavy se využívá speciální EEG čepice zhotovená z elastické tkaniny. Do čepice jsou zabudované registrační elektrody, jejichž funkce závisí na správném nasazení čepice vyškoleným laborantem a aplikaci vodivého gelu pro snížení elektrického odporu. Na hlavě je rozmístěno 19 elektrod dle schváleného systému 10-20. Elektrody jsou rozmístěny na vzdálenost 10 % a 20 % z celkové vzdálenosti od krajních bodů, jak pro sagitální rovinu, tak pro rovinu frontální. Prostor pro rozmístění elektrod je ohraničen čtyřmi body, jsou to: kořen nosu, protuberantia occipitalis externa a body těsně před ušními boltci. (53)

EEG záznam je následně vizuálně vyhodnocen. Pozornost se upíná na výskyt jednotlivých frekvencí ve vztahu k mozkovému regionu a stavu bdělosti. EEG je při výzkumu s virtuální realitou nejčastěji používaná diagnostická neinvazivní technika pro srovnání mezi skutečnou a virtuální realitou pro kognitivní tréninkové úkoly, srovnání dvoudimenzionální a trojdimenzionální zobrazení a simulaci řízení pohybu ve VR (44; 53)

Mezi metody hojně používané k topografickému mapování elektrické aktivity mozkové tkáně patří: amplitudové mapování, mapování frekvence, koherence a kordance. (55)

### 2.7.1 Mu rytmus

Pro vyhodnocení EEG se jako zástupce zrcadlových neuronů při pozorování akce či vlastním provedení akce používá modulace senzomotorického mu rytmu. Mu rytmus je EEG oscilace, výsledkem spontánního aktivování senzomotorických neuronů synchronně kolem frekvenčního pásma 8–13 Hz. Je zaznamenán z centrálních oblastí překrývajících senzomotorickou kůru. V klidu je aktivita senzomotorické kůry synchronní, ale během provádění akce i pozorování akce se aktivita senzomotorické kůry desynchronizuje, což odráží změny v kortikální aktivitě. Snížení síly mu v centrálních oblastech ve stavu pozorování či provádění akce ve srovnání se základním stavem nečinnosti naznačuje, že mu rytmus byl desynchronizován s výkonem při pozorování akce, což odráží změny při aktivaci senzomotorické kůry. (56; 57)

V průběhu přípravy motorické akce je mu desynchronizace nejvíce projevna na hemisféře kontralaterálně k pohybu. Během samotné akce je desynchronizace šířena po obou hemisférách symetricky. (57) Mu rytmus se tedy využívá jako spolehlivý indikátor aktivity lidského zrcadlového neuronového systému. (58)

## 2.8 sLORETA

Elektrické potenciály pokožky hlavy (EEG) a extrakraniální magnetická pole (MEG) jsou způsobeny primárním (imponovaným) rozdělením hustoty proudu, které vzniká z neuronálních postsynaptických procesů. Elektromagnetická tomografie s nízkým rozlišením (LORETA) a standardizované přístupy založené na LORETA (sLORETA) umožňují vypočítat a lokalizovat zdrojovou oblast elektrické aktivity v mozkové tkáni z povrchového EEG. LORETA tak činí prostřednictvím matematického řešení inverzní úlohy EEG. Poskytuje výpočet primární proudové hustoty v 3D objemu mozkové tkáně, čímž určí přesnou lokalizaci aktivovaných či deaktivovaných mozkových oblastí. sLORETA je podobná přesnější metoda, při které jsou odhady proudové hustoty standardizovány odhadem variability dat. Je založena na výpočtu distribuce proudu v celém objemu mozku, což poskytuje statistiku pseudo-F jako výstup. Standardizací hustoty proudu při měřeních EEG nezohledňuje pouze rozptyl šumu, ale také uvažuje biologickou odchylku ve skutečném signálu. Tato biologická odchylka je považována za nezávislou a rovnoměrně distribuovanou v mozku, což vede k lineární zobrazovací lokalizační technice s přesnou nulovou chybou lokalizace. (53; 59; 60)

I přes nízké rozlišení metoda sLORETA generuje souřadnice pro umístění přesného elektrického pole a minimalizuje epileptiformní aktivitu. sLORETA tak efektivně označí kortikální oblasti vykazující změny v aktivitě. (61)

Metoda vypočítává přenos proudové hustoty celkem v 6430 voxelech, jednotkách prostorového objemu s prostorovým rozlišením 5 mm. Data k určení pozice voxelů v šedé hmotě mozkové tkáně jsou definována za použití Talairachova atlasu a shodného digitálního pravděpodobnostního atlasu mozku. (53)

V zájmu etické vědy je třeba uvést také negativní vlastnosti metody. sLORETA má velmi nízké prostorové rozlišení a prostorové rozlišení klesá s hloubkou. Kromě toho sLORETA neporušuje zákon zachování odporu, pokud program dostane nekvalitní data, ani jeho výstupy nebudou kvalitní. (62)

Aby bylo možné najít jedinečné řešení pro trojrozměrné rozdělení mezi nekonečnou sadou různých možných řešení, metoda předpokládá, že sousední neurony jsou simultánně a synchronně aktivovány. Tento základní předpoklad spočívá na důkazech ze záznamu jednotlivých buněk v mozku, který ukazuje silnou synchronizaci sousedních neuronů. S ohledem na tuto fyziologickou úvahu je výpočetním úkolem vybrat nejhladší ze všech možných trojdimenzionálních distribucí proudu, což je úkol, který je běžným postupem při zobecněném zpracování signálu. Výsledkem je skutečná trojrozměrná tomografie s charakteristikou, že lokalizace je zachována s určitým množstvím disperze, v důsledku čehož má relativně nízké prostorové rozlišení. (63–65)

## **3 Experimentální část**

### **3.1 Cíle práce**

Cílem výzkumného projektu je zjistit změny zdrojové elektrické aktivity v sLORETA zobrazení při použití virtuální reality fungující na principu zrcadlové terapie v programu Ruka Ruk a při běžné zrcadlové terapii s variantou taktilní a haptické stimulace horní končetiny, v porovnání s klidovým stavem s otevřenými očima.

### **3.2 Úkoly práce**

1. Zpracování rešerše odborné literatury s převahou zahraničních zdrojů na téma kortex, Brodmannovy arey, zrcadlové neurony, zrcadlová terapie, virtuální realita v zrcadlové terapii, software Ruka Ruk, EEG a sLORETA programu.
2. Stanovení metodického postupu a oslovení zdravých dospělých probandů pro experimentální část.
3. Realizace vlastního výzkumu.
4. Analýza a vyhodnocení získaných dat
5. Diskuse o stanovených hypotézách konfrontovaných s odbornou literaturou a stanovení závěru.

### **3.3 Výzkumné otázky**

V1: Existuje registrovatelná změna zdrojové elektrické aktivity hodnocená pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlovou iluzí bez taktilní stimulace oproti klidovému stavu?

V2: Existuje registrovatelná změna zdrojové elektrické aktivity hodnocená pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlovou iluzí s taktilní stimulací neaktivní horní končetiny oproti klidovému stavu?

V3: Existuje registrovatelná změna zdrojové elektrické aktivity hodnocená pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlovou iluzí s haptickou stimulací neaktivní horní končetiny oproti klidovému stavu?

V4: Existuje registrovatelná změna zdrojové elektrické aktivity hodnocená pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě bez taktilní stimulace oproti klidovému stavu?



V5: Existuje registrovatelná změna zdrojové elektrické aktivity hodnocená pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s taktilní stimulací neaktivní horní končetiny oproti klidovému stavu?

V6: Existuje registrovatelná změna zdrojové elektrické aktivity hodnocená pomocí sLORETA programu za podmínek modifikovaných zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s haptickou stimulací neaktivní horní končetiny oproti klidovému stavu?

### **3.4 Hypotézy**

H1: Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí bez podání taktilního stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima.

H2: Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima.

H3: Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima.

H4: Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě bez podání taktilního stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima.

H5: Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima.

H6: Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima.

## 4 Metodika práce

### 4.1 Popis výzkumného souboru

Do výzkumu bylo zařazeno celkem 12 zdravých osob ve věku 18–55 let (viz tabulka 2). Všichni probandi měli platnou zdravotní prohlídku a jejich dominantní horní končetinou byla pravá HK. Kontraindikací pro vstup do studie bylo prodělání cévní mozkové příhody či jiné nemoci, která by souvisela s poruchou koordinace pohybu horních končetin. Dále závažný zrakový či sluchový deficit a dekompenzovaná epilepsie vzhledem ke sledování pohybu na obrazovce. Testování se nezúčastnily osoby s akutním (zejména infekčním) onemocněním či v úrazu a v rekonvalescenci po onemocnění či úrazu. Všichni probandi se do výzkumu přihlásili dobrovolně a byli předem seznámeni s průběhem experimentu. Účastníci podepsali informovaný souhlas (viz příloha č. 2), jehož znění i s celým výzkumem bylo schváleno etickou komisí UK pod jednacím číslem 200/2020 (viz příloha č. 1). Každý z probandů byl testován samostatně v kineziologické laboratoři FTVS UK. Výzkum probíhal dle aktuálních hygienických nařízení.

Tabulka 2: Informace o účastnících výzkumu

Pořadí	Proband	Věk probanda	Pohlaví	Pořadí měření
1.	M. T.	26	Muž	1, 3, 2, 4, 6, 5
2.	J. P.	54	Žena	3, 2, 1, 4, 5, 6
3.	J. P.	54	Muž	1, 2, 3, 6, 4, 5
4.	V. H.	24	Muž	2, 3, 1, 4, 5, 6
5.	J. P.	18	Žena	1, 3, 2, 5, 4, 6
6.	I. Z.	27	Žena	2, 3, 1, 4, 5, 6
7.	M. S.	27	Muž	2, 3, 1, 5, 6, 4
8.	L. Š.	28	Žena	1, 2, 3, 4, 6, 5
9.	K. M.	27	Žena	3, 1, 2, 5, 4, 6
10.	M. S. K.	28	Žena	2, 3, 1, 6, 5, 4
11.	K. H.	51	Muž	3, 2, 1, 4, 6, 5
12.	J. K.	26	Muž	3, 1, 2, 4, 5, 6

## 4.2 Použité metody

K měření aktivity mozku byl použit telemetrický 32 kanálový EEG přístroj Wireless EEG Nicolet. Probandům byla ke snímání aktivity mozkové tkáně nasazena speciální 32 kanálová čepice Electro-Cap, včetně elektrod (Fp1, Fpz, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, FC5, FC1, FC2, FC6, T7/T3, C3, Cz, C4, T8/T4, CP5, CP1, CP2, CP6, P7/T5, P3, Pz, P4, P8/T6, O1, Oz, O2). Distribuce elektrod na čepici podléhala mezinárodnímu systému 10/20, pod elektrody byl injekčně aplikován speciální EEG gel pro lepší vodivost. Vzorkovací frekvence byla nastavena na 256 Hz, pásmová propustnost 0,5–70 Hz a impedanční odpor byl nižší než 10 k $\Omega$ . Experiment probíhal za podmínek stanovených vypracovaným St. Gallen protokolem (90) u části využívající zrcadlo k terapii. Odraz v zrcadle měl neutrální pozadí, stejně tak pozadí ve virtuální realitě bylo neutrální. Probandi měli holé ruce bez šperků či hodinek. Ve druhé části se zrcadlením pravé horní končetiny pomocí softwaru Ruka Ruk byly podmínky experimentu upraveny na základě dřívějších studií využívajících virtuální realitu k modifikaci zrcadlové terapie. Probandi viděli pouze své virtuální horní končetiny a ve virtuálním prostředí viděl proband pouze iluzi obou svých horních končetin. Pro vytvoření iluze o vlastnictví virtuálních horních končetin byl pacientovi zakryt výhled na jeho vlastní horní končetiny.

## 4.3 Měření a sběr dat

Měření probíhalo v listopadu 2021 v Kineziologické laboratoři FTVS. První měřicí den bylo změřeno 5 probandů, druhý měřicí den bylo změřeno 7 probandů. Všichni probandi používali jako aktivní horní končetinu pravou HK. Měření probandů nepřesáhlo hodinu na jednoho probanda. Před zahájením měření zabrala 30 minut příprava speciální čepice a EEG gelu. Před samotným měřením byl účastník seznámen s průběhem měření. Speciální čepici pro snímání EEG signálu z povrchu hlavy účastníkům nasadil vyškolený pracovník laboratoře.

Jednotlivé části měření:

1. Klidové měření EEG s otevřenýma očima (2,5 minuty) následně se zavřenýma očima (2,5 minuty) celkem (5 minut)
2. Sledování odrazu pohybu aktivní pravé horní končetiny v zrcadle, levá horní končetina je skrytá za zrcadlem (viz obrázek 3)
  - a. Měření bez taktilní či haptické stimulace horní končetiny (2 minuty)

- b. Měření s haptickou stimulací horní končetiny (2 minuty)
  - c. Měření s taktilní stimulací horní končetiny molitanovým válcem o délce 10 cm (2 minuty)
3. Sledování iluze pohybu obou horních končetin na displeji, při pohybu pouze pravou horní končetinou
- a. Měření bez taktilní či haptické stimulace horní končetiny (2 minuty)
  - b. Měření s haptickou stimulací horní končetiny (2 minuty)
  - c. Měření se stimulací horní končetiny molitanovým válcem o délce 10 cm (2 minuty)

Taktilní a haptická stimulace byly lokalizovány na dorzální straně levé, neaktivní ruky a distální části předloktí. Pořadí jednotlivých modifikací bylo randomizováno losem. Mezi jednotlivá měření byla vložena dvouminutová pauza pro odpočinek účastníků studie. Průběh experimentu byl zaznamenán videokamerou a byly pořízené fotografie ke zdokumentování.



*Obrázek 3: pozice probanda při sledování aktivní pravé horní končetiny v zrcadle, levá horní končetina je skryta za zrcadlem. Zdroj: vlastní*

## 4.4 Analýza a statistické vyhodnocení dat

Data o mozkové aktivitě probandů při experimentu naměřená pomocí EEG byla dále zpracována v programu NeuroGuide. Z každého měřeného úseku byl vybrán bezartefaktový záznam o délce 30 s. Byl proveden výpočet vzájemného spektra pro všechna pásmová rozmezí (delta, theta, alfa1, alfa2, beta1, beta2, beta3). Výsledná data s koncovkou .slor lze zobrazit v Talairachově kortikálním atlasu. (53)

K výpočtu 3D distribuce elektrické aktivity proudové hustoty generované neurony v mozku byl použit program sLORETA. Program vypočítal zdroj elektrických signálů z povrchových dat pokožky hlavy řešením problému „inverze“. Z nativních dat EEG program sLORETA vytvořil elektrodové koordináty, které následně byly převedeny na transformační matrix. Ten slouží k výpočtu distribuce proudových hustot v každém voxelu mozku jako lineární vážený součet potenciálu pokožky hlavy. (53; 61)

Při statistickém zpracování nativních EEG dat bylo v rámci programu sLORETA porovnáváno všech šest párových skupin uvedených v hypotézách. V každé skupině byly porovnány změny elektrické aktivity mozku u všech probandů. Pro vyhodnocení statisticky významných změn byl použit statistický modul, který je součástí programu sLORETA. Tento program zpracovává statistické hodnoty za pomoci párového studentova t-testu. Byly vybrány soubory bez normalizace s logaritmicou transformací dat, parametrem vyhlazení 0,5 a počtem randomizací 5000. výsledná data šlo zobrazit v programu s LORETA Viewer. V programu se ukázaly statisticky významné změny proudové hustoty. Tyto změny byly zobrazeny jako zdrojová aktivita v jednotlivých Brdmannových areích. V programu lze výsledky zobrazit pro jednotlivá frekvenční pásma, na trojdimenzionálním kortikálním modelu a na dvoudimenzionálních řezech přes mozkovou tkáň v různých rovinách. Výsledné statisticky významné voxely byly zvýrazněny barevně.

## 5 Výsledky

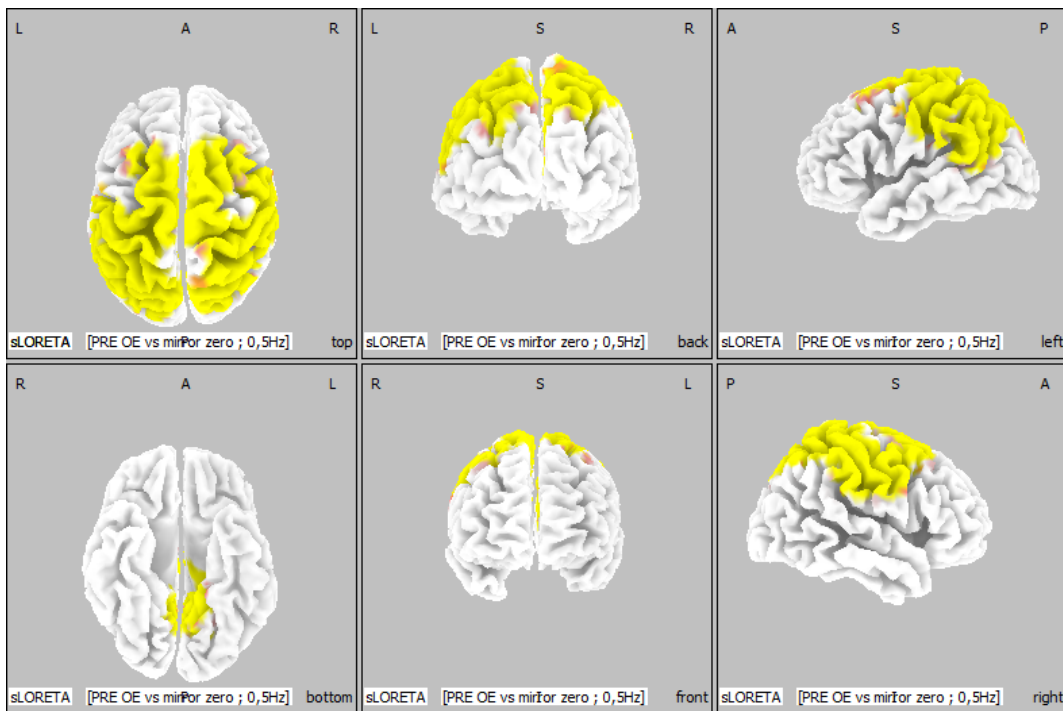
### 5.1 Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlovou iluzí bez podání taktilního stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima

Statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku mezi klidovým stavem s otevřenými očima a situací se zrcadlovou iluzí byl zaznamenán ve všech hodnocených

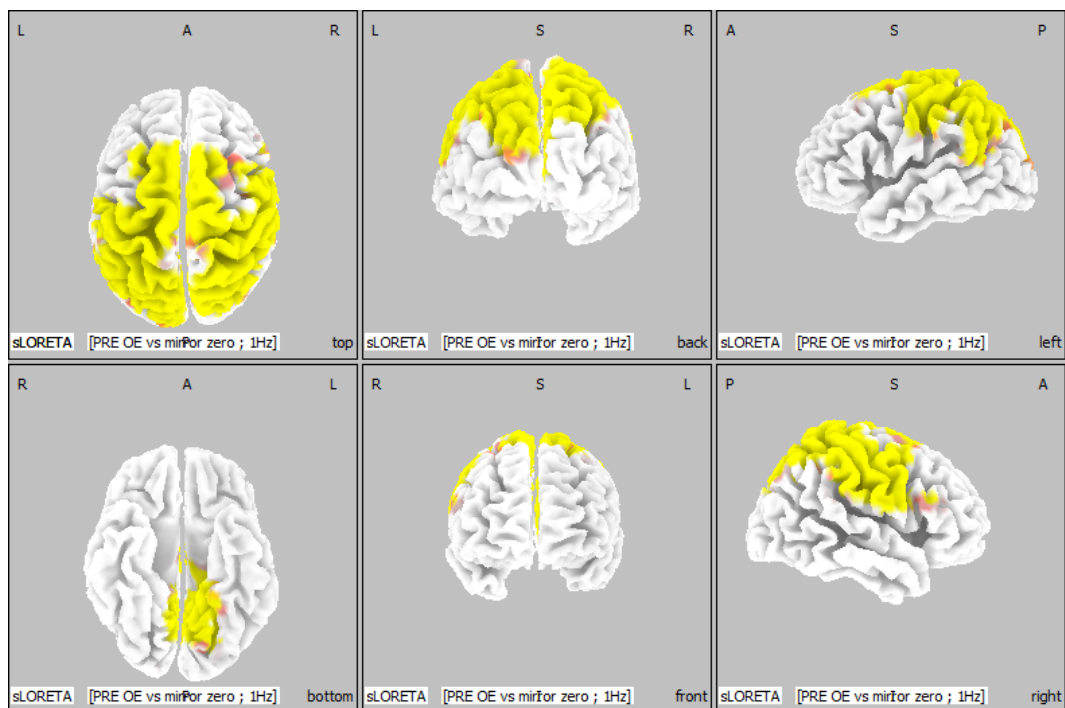
frekvenčních pásmech: delta, theta, alfa1, alfa2, beta1, beta2, beta3 a vyhodnocen na hladině významnosti  $p \leq 0,05$  (viz tabulka 3).

Ve frekvenčním pásmu delta bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním parietálním lóbu parietálního laloku v BA 40, angulárním gyru parietálního laloku BA 39, horním parietálním lůbu parietálního laloku BA 7, postcentrálním gyru parietálního laloku BA 2 a precuneu parietálního laloku BA 19. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 2, 3, 40 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz příloha č. 3).

Ve frekvenčních pásmech theta (viz obrázek 4), alfa1 (viz obrázek 5) a alfa2 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především v zadní cingulární části limbického laloku v BA 30, 29, 23, 31 a lingválním gyru okcipitálního laloku v BA 18. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 6, 7, 40 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz obrázek 3).



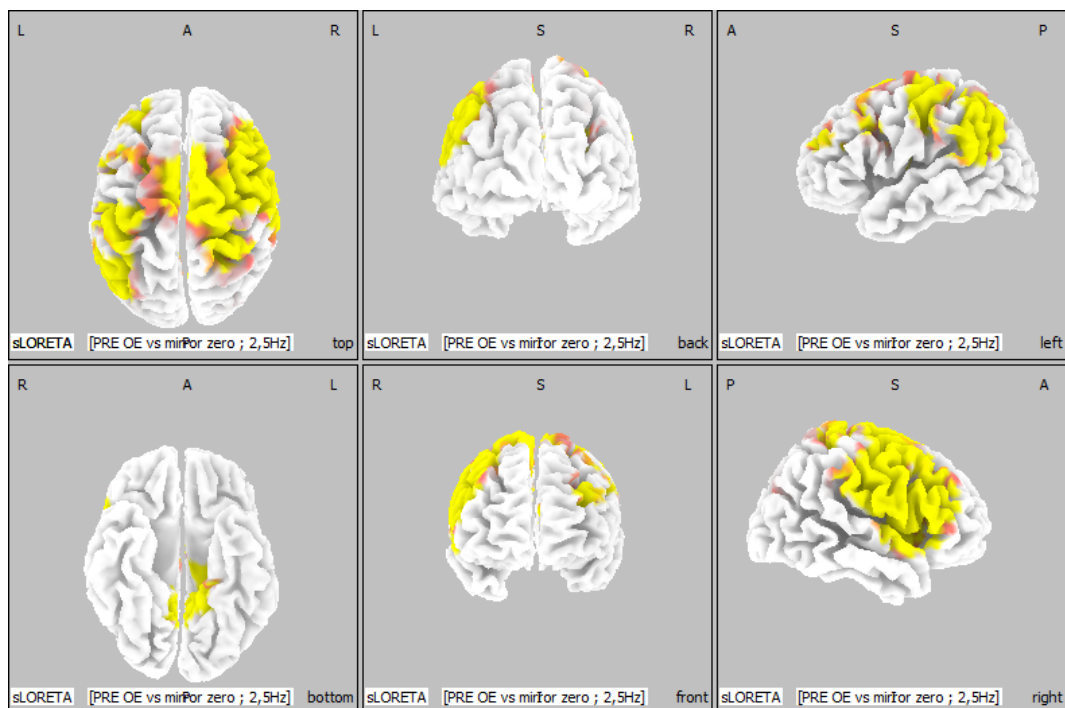
Obrázek 4: Frekvenční pásmo theta, 3D zobrazení, L = levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P = zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty v zadní cingulární části limbického laloku u BA 30, 29, 23, 31, okcipitálním laloku u BA 18, frontálním laloku BA 6 a parietálním laloku BA 7.



Obrázek 5: Frekvenční pásmo alfa1, 3D zobrazení, L = levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P = zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty v zadní cingulární části limbického laloku u BA 30, 29, 23, 31, okcipitálním laloku u BA 18, frontálním laloku BA 6 a parietálním laloku BA 7.

Ve frekvenčním pásmu beta1, bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním frontálním gyru frontálního laloku v BA 45, 44, 9, středním frontálním gyru frontálního laloku v BA 46 a precentrálním gyru frontálního laloku v BA 6. Výskyt byl častější v pravé hemisféře. BA 6 měla zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz příloha č. 3).

Ve frekvenčním pásmu beta2, bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním frontálním gyru frontálního laloku v BA 45, 44, 9, středním frontálním gyru frontálního laloku v BA 46 a spodním frontálním gyru frontálního laloku v BA 13. Výskyt byl častější v pravé hemisféře. BA 6 měla zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz obrázek 6).



Obrázek 6: Frekvenční pásmo beta2, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty ve frontálním laloku u BA 45, 44, 9, 46, 13, 6.

## 5.2 Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima

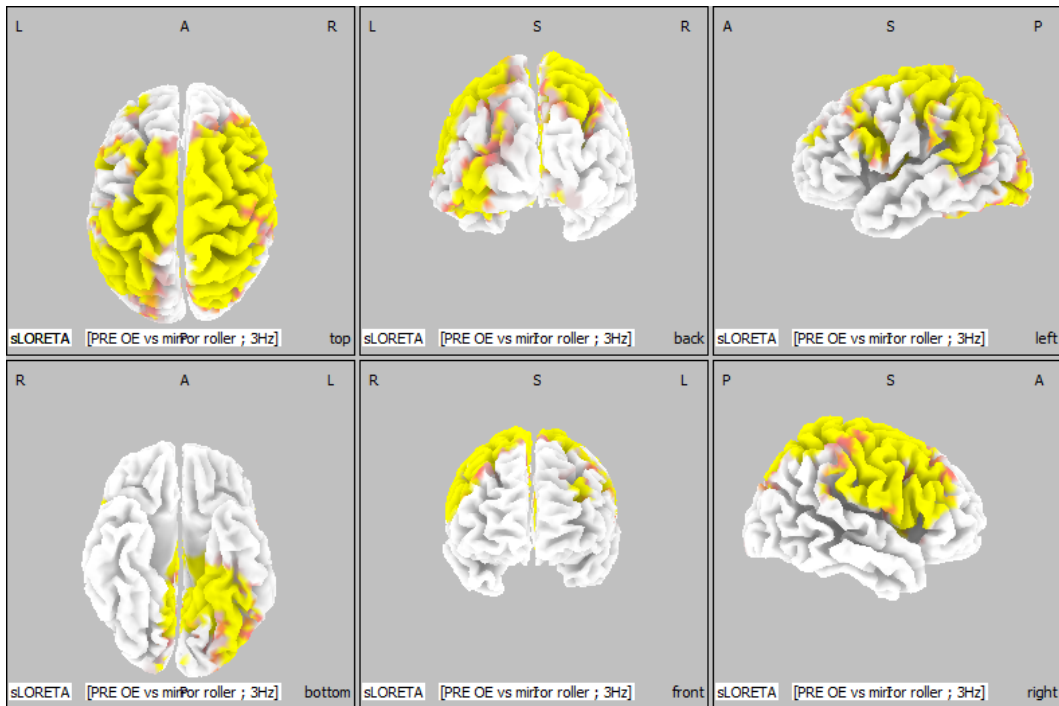
Statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku mezi klidovým stavem s otevřenými očima a situací se zrcadlovou iluzí s podáním taktilního stimulu molitanovým válcem na neaktivní horní končetinu byl zaznamenán ve frekvenčních pásmech beta 2, beta 3 na hladině významnosti  $p \leq 0,05$  (viz tabulka 3).

Ve frekvenčním pásmu beta2 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především v zadní cingulární části limbického laloku v BA 29, 30, linguálním gyru okcipitálního laloku v BA 19, 18 a parahippokampální gyrus limbického laloku BA 27. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 30 a 40 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz příloha č. 3).

Ve frekvenčním pásmu beta3 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním parietálním lóbu parietálního laloku v BA 40, angulárním gyru parietálního laloku BA 39, horním parietálním lóbu parietálního laloku



BA 7, postcentrálním gyru parietálního laloku BA 2 a precuneu parietálního laloku BA 19. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 6 a 7 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz obrázek 7).



Obrázek 7: Frekvenční pásmo beta3, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty v parietálním laloku u BA 40, 39, 7, 2, 19 a frontálním laloku u BA 6.

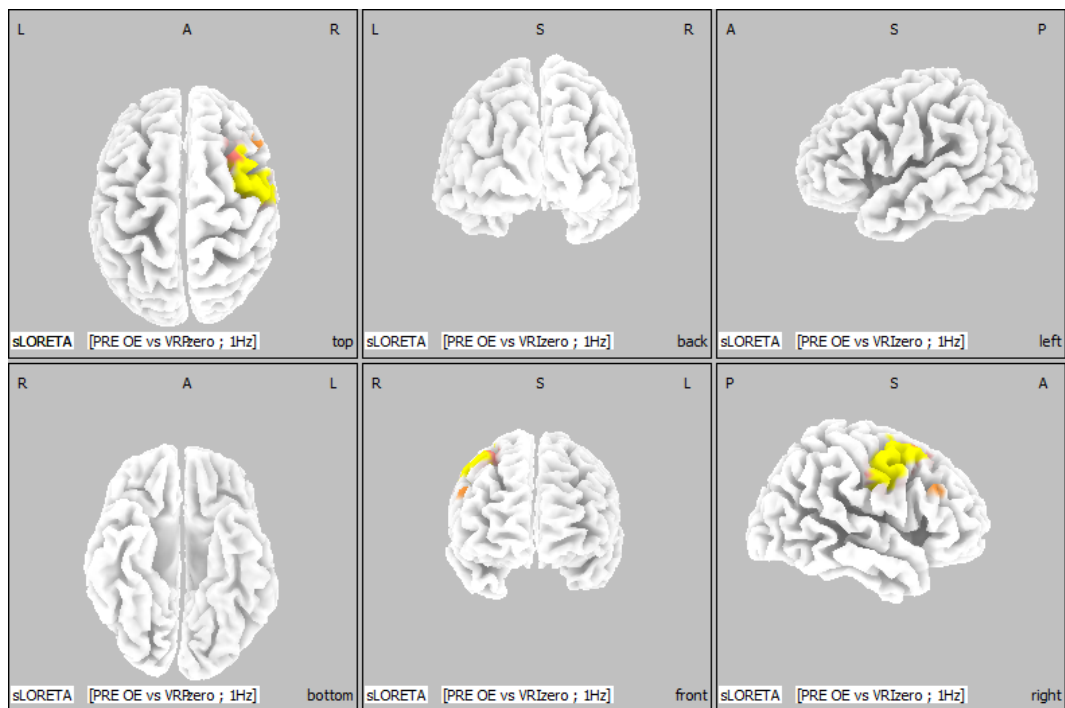
### 5.3 Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima

Při tomto měření na hladině významnosti  $p \leq 0,05$  ani  $p \leq 0,1$  nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku při podání haptického stimulu na neaktivní horní končetinu oproti klidovému stavu (viz tabulka 3).

#### 5.4 Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě bez podání taktilního stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima

Byl zaznamenán statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčních pásmech theta, alfa1, beta1, beta2, beta3 na hladině významnosti  $p \leq 0,05$  (viz tabulka 3).

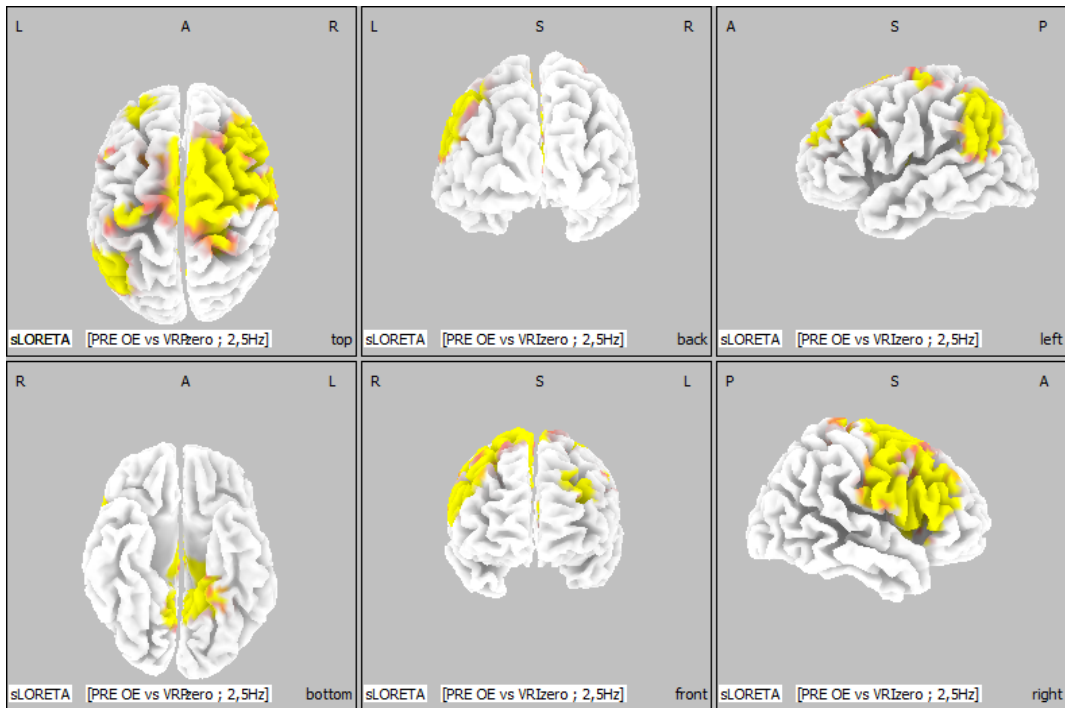
Ve frekvenčních pásmech theta a alfa 1 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především v precentrálním gyru frontálního laloku v BA 6, 4, středním frontálním gyru frontálního laloku v BA 8 a spodním frontálním gyru frontálního laloku v BA 9. Výskyt byl častější v pravé hemisféře. BA 6 a 9 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz obrázek 8).



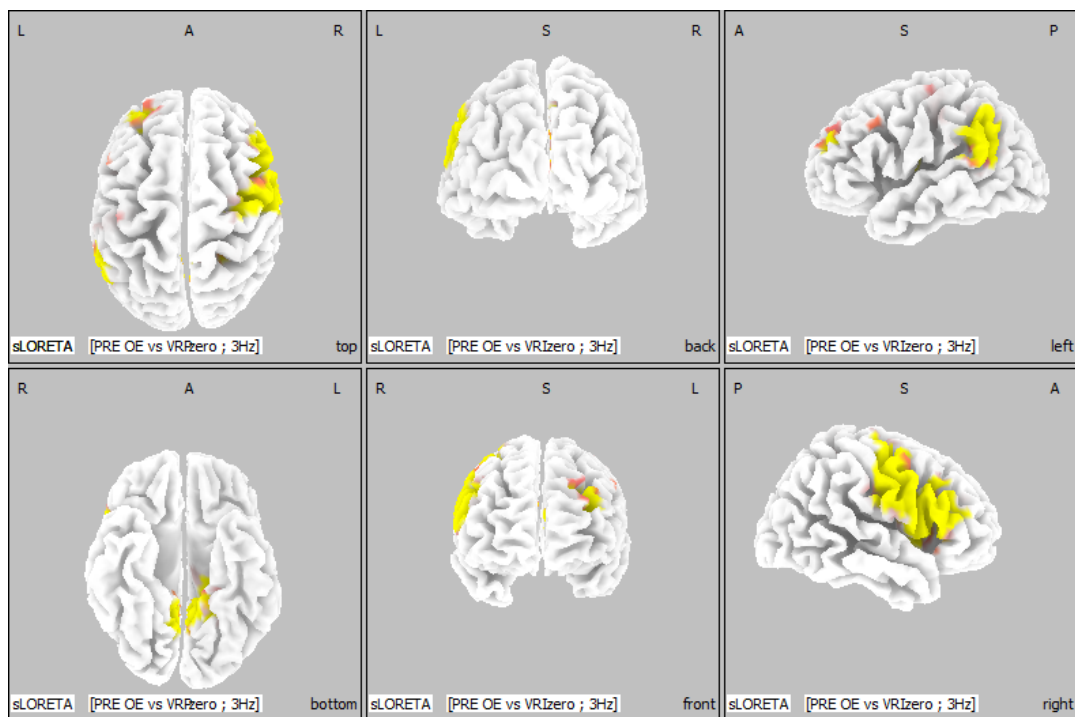
Obrázek 8: Frekvenční pásmo alfa1, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty ve frontálním laloku u BA 6, 4, 8, 9.

Ve frekvenčních pásmech beta1, beta2 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve středním frontálním gyru frontálního laloku v BA 46 a spodním frontálním gyru frontálního laloku v BA 45, 9, 44, 13. Výskyt byl častější

v pravé hemisféře. BA 6 měla zastoupení podle míry výskytu nad 10 %, ve frekvenčním pásmu beta3 též u BA 31 (viz obrázek 9). Stejná aktivita byla u beta3 (viz obrázek 10).



Obrázek 9: Frekvenční pásmo beta2, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty ve frontálním laloku u BA 45, 9, 44, 13, 6.



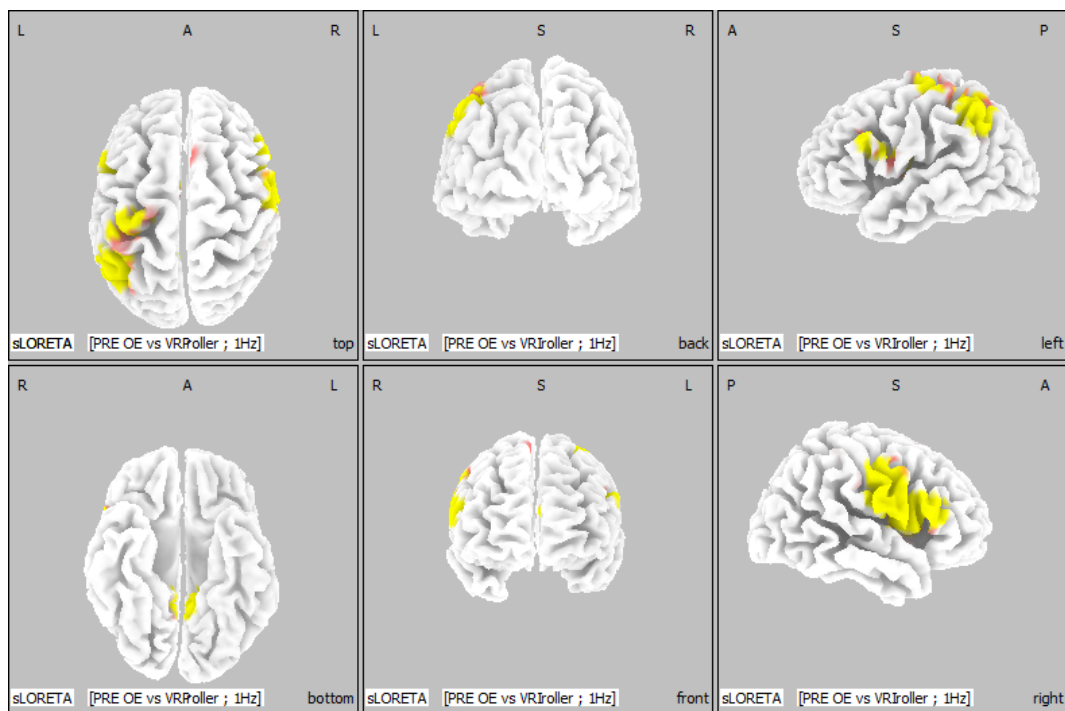
Obrázek 10: Frekvenční pásmo beta3, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty ve frontálním laloku u BA 45, 9, 44, 13, 6, 31.

## 5.5 Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenýma očima

Byl zaznamenán statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku ve frekvenčních pásmech theta, alfa1, alfa2, beta1, beta2, beta3 na hladině významnosti  $p \leq 0,05$  (viz tabulka 3).

Ve frekvenčním pásmu theta bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především v zadní cingulární části limbického laloku v BA 30, 29, 23, 31 a lingválním gyru okcipitálního laloku v BA 18. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 6, 30, 40 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz příloha č. 3).

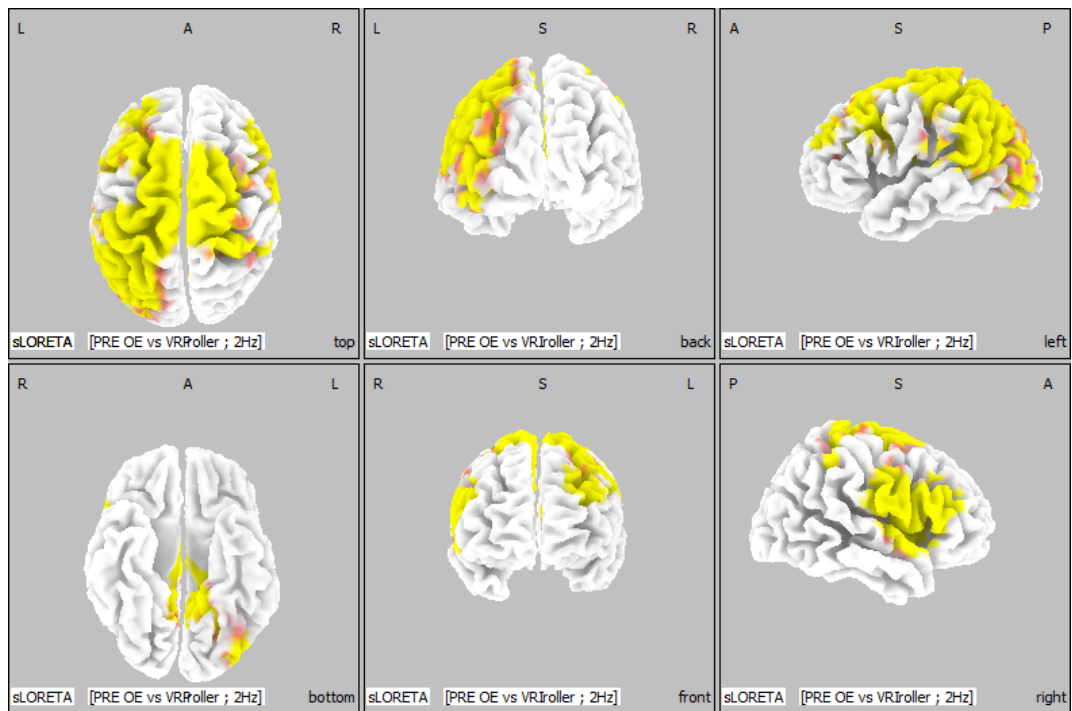
Ve frekvenčním pásmu alfa1 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním parietálním laloku v BA 40, angulárním gyru parietálního laloku v BA 39, horním parietálním laloku v BA 7, postcentrálním gyru parietálního laloku v BA 2 a 5. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 6 a 40 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10% beta3 (viz obrázek 11).



Obrázek 11: Frekvenční pásmo alfa1, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty v parietálním laloku u BA 40, 39, 7, 2, 5 a frontálním laloku u BA 6.

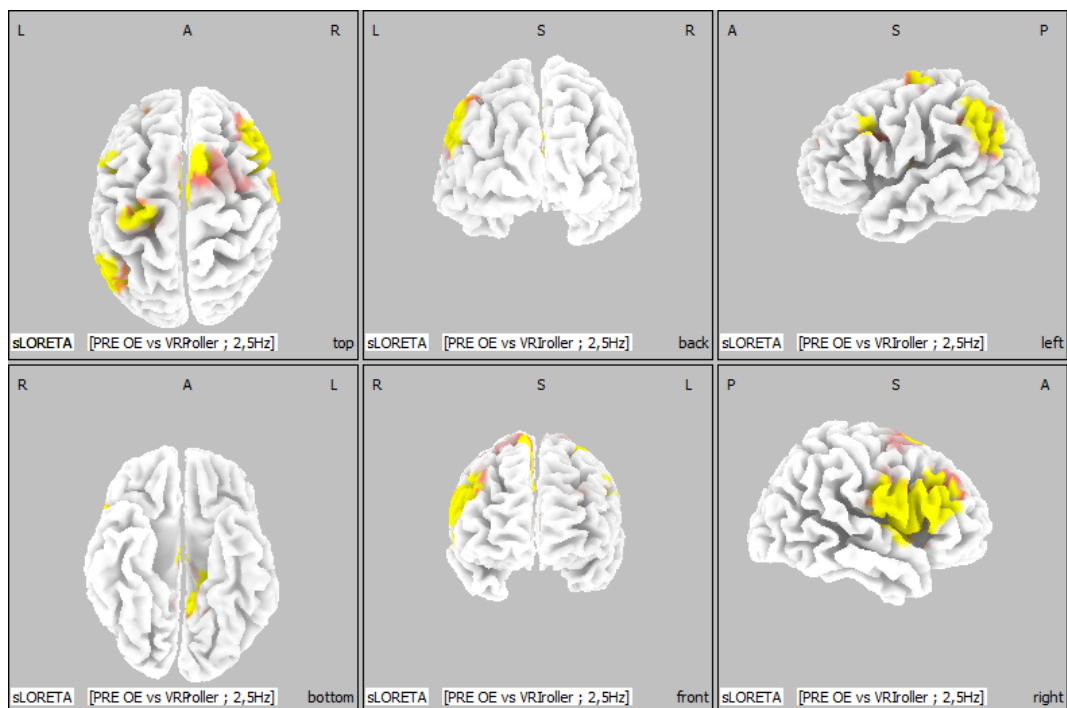
Ve frekvenčním pásmu alfa2 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním parietálním laloku v BA 40, angulárním gyru parietálního laloku v BA 39 a horním parietálním laloku v BA 7. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 40 měla zastoupení podle míry výskytu nad 10 % (viz příloha č. 3).

Ve frekvenčním pásmu beta1 bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním parietálním laloku v BA 40, v angulárním gyru parietálního laloku v BA 39, horním parietálním laloku v BA 7, postcentrálním gyru parietálního laloku v BA 2 a precuneu parietálního laloku BA 19. Výskyt byl častější v levé hemisféře. BA 6 měla zastoupení podle míry výskytu nad 10 % beta3 (viz obrázek 12).

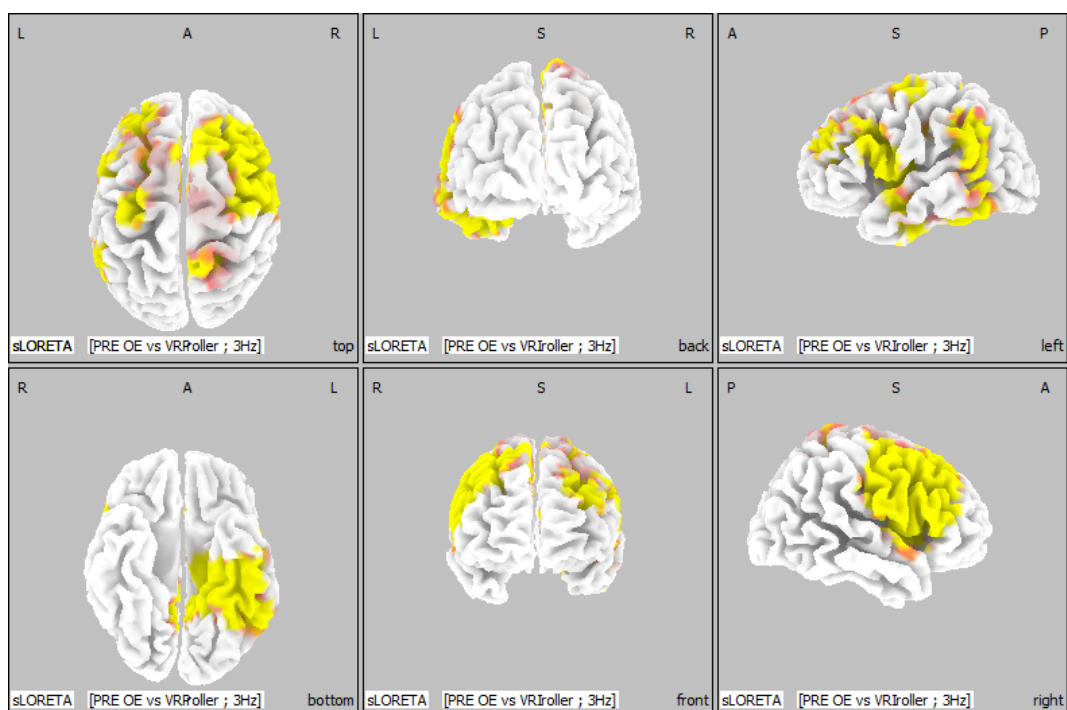


Obrázek 12: Frekvenční pásmo beta1, 3D zobrazení, L = levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P = zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty v parietálním laloku u BA 40, 39, 7, 2, 19 a frontálním laloku u BA 6.

Ve frekvenčních pásmech beta2 beta3 (viz obrázek 13) a beta3 beta3 (viz obrázek 14) bylo signifikantní zvýšení proudové hustoty zaznamenáno především ve středním frontálním gyru frontálního laloku v BA 46 a ve spodním frontálním gyru frontálního laloku v BA 45, 9, 44, 13. Výskyt byl častější v pravé hemisféře BA 6 a 9 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 %, ve frekvenčním pásmu beta2 též BA 24.



Obrázek 13: Frekvenční pásmo beta2, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty ve frontálním laloku u BA 46, 45, 9, 44, 13 a přední části cingulárního gyru BA 24.



Obrázek 14: Frekvenční pásmo beta3, 3D zobrazení, L= levá hemisféra, A = přední část, R = pravá hemisféra, S = střed, P= zadní strana, žlutě je označena oblast s největší změnou proudové hustoty ve frontálním laloku u BA 46, 45, 9, 44, 13.

## **5.6 Diference zdrojové elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenýma očima**

Data z měření EEG od všech dvanácti probandů byla zpracována v programu sLORETA, porovnána a následně statisticky vyhodnocena. Hodnocen byl rozdíl zdrojové aktivity mozku mezi klidovým stavem s otevřenýma očima a situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním haptické stimulace neaktivní horní končetiny. Při tomto měření na hladině významnosti  $p \leq 0,05$  nebyl zaznamenán statisticky významný rozdíl zdrojové aktivity mozku (viz tabulka 3).



Tabulka 3: Souhrn výsledků všech šesti hypotéz pro hladinu statistické významnosti  $p \leq 0,05$

Hypotéza	frekvenční pásmo	Brodmannova area	Lokalizace mozkové aktivity	častější výskyt v hemisféře
H1	delta	40, 39, 7, 2, 19, 3	parietální lalok	levé
	theta, alfa1, alfa2	30,29, 23, 31, 18, 6, 7, 40	limbický lalok PCC, okcipitální lalok, frontální lalok, parietální lalok	levé
	beta1, beta2, beta3	45, 44, 9, 46, 6, 13	frontální lalok	pravé
H2	beta2	29, 30, 19, 18, 27, 40	okcipitální lalok, limbický lalok PCC, parietální lalok	levé
	Beta3	40, 39, 7, 2, 19, 6	parietální lalok, precentrální gyros	levé
H3	x	x	x	x
H4	theta, alfa1	6, 8, 4, 9	frontální lalok	pravé
	beta1, beta2, beta3	45, 44, 9, 46, 13, 6	frontální lalok	pravé
H5	theta	30, 29, 23, 31, 18, 6, 40	okcipitální lalok, limbický lalok PCC, frontální lalok	levé
	alfa1	40, 39, 7, 2, 5, 6	parietální lalok, frontální lalok	levé
	alfa2	40, 39, 7	parietální lalok	levé
	beta1	40, 39, 7, 19, 2, 6	parietální lalok, frontální lalok	levé
	beta2	46, 9, 45, 44, 13, 6, 24	frontální lalok, přední cingulární gyros	pravé pravé
	beta3	46, 9, 45, 44, 13, 6	frontální lalok	
H6	x	x	x	x

Legenda: H1 – zrcadlová iluze bez taktilního stimulu vs. OE; H2 – zrcadlová iluze s podáním taktilního stimulu vs. OE; H3 – zrcadlová iluze s podáním haptického stimulu vs. OE; H4 – zrcadlení pohybu horní končetiny ve virtuální realitě bez taktilního stimulu vs. OE; H5 – zrcadlení pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s taktilním stimulem vs OE; H6 – zrcadlení pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s haptickým stimulem vs. OE;

## 6 Diskuze

### 6.1 Diskuze k hypotéze č. 1

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

Analýza zjistila statisticky významné rozdíly ve frekvenčních pásmech delta, theta, alfa1, alfa2, beta1, beta2 a beta3.

Delta vlny jsou nejpomalejší zaznamenané mozkové vlny u lidí. Nejčastěji se vyskytují u kojenců a malých dětí a jsou spojeny s nejhlubšími úrovněmi relaxace a regeneračního spánku. Delta je prominentně vidět u poranění mozku, problémů s učením a těžké poruše pozornosti s hyperaktivitou. Adekvátní produkce delta vln podporuje imunitní systém a regeneraci. (66) Delta vlny jsou také přítomny při pohybu náročnějším na prostorovou orientaci. (67)

Při frekvenci delta byl největší rozdíl proudové hustoty oproti klidovému stavu zaznamenan v parietálním laloku, zejména v oblasti BA 40, 39, 7, 2, 19, 3. Jeho role spočívá v prostorových znalostech a zejména v řízení pohybů vedených vizuálně prostorovými informacemi. Parietální kůra se podílí nejen na motorickém rozhodování, ale také při prostorovém vnímání a pozornosti. Parietální kůra hraje hlavní roli při vnímání bolesti, a to díky svému zapojení do integrace informací přicházejících z různých zdrojů. (68) Toho by se dalo využít u ovlivnění bolesti při fantomových bolestech či při CRPS.

Funkcí BA 40 je zejména rozhodování o akci a plánování akce. Tato oblast je součástí neuronální sítě zapojené do imitace učení, tedy oblastí s aktivitou zrcadlových neuronů (26; 16; 27) Tyto zrcadlové neurony kódují především výsledek akce. (28)

Zadní parietální kortex je klíčovým uzlem v anatomických sítích spojujících vizuální kůru s prefrontální a temporální kůru s částmi frontální. (68) Je rovněž považován za důležitý pro vizuomotorické funkce. (12) Patří sem oblasti BA 39, 7 a 19, která přechází do spodního okcipitálního gyru. BA 39, spodní část zadního parietálního laloku je oblast zapojená do krosmodální asociace mezi somatosenzorickými informacemi, sluchovými informacemi a vizuálními informacemi, podílí se na vizuoprostorovém zpracování včetně prostorového zaměření pozornosti. Poškození má

za následek těžké hemiprostorové zanedbávání (16). BA 7, horní část zadního parietálního laloku, je aktivní při zpracování gest pomocí nástrojů, motorických obrazů, bimanuální manipulaci a podobných praktických schopnostech. Oblast se může zúčastnit okruhu, který je základem pro napodobování při motorickém učení. (16) Tato oblast je též součástí sítě mozkových oblastí zapojených do imitace učení, tedy oblastí s aktivitou zrcadlových neuronů. (26; 16; 27; 69) Oblast BA19 souvisí s vizuálním zpracováním a propojením vizuálních informací. (69) Oblast se obvykle aktivuje spolu s oblastí BA 18, pokud je aktivní pouze BA 19, značí to funkci prostorové pracovní paměti, tedy lokalizace podnětů, kde se, co nachází. Tato oblast na pravé hemisféře se podílí na vizuálně-prostorovém zpracování informací a sledování vizuálních pohybových vzorů. (16) Dále byla změna proudové hustoty zaznamenána v primárním somatosenzorickém kortexu, který souvisí se somatosenzorickým vnímáním, ale také se účastní organizace pohybu, například u cílených pohybů rukou. Byla zaznamenána i jeho funkce předvídání spojovaná s aktivitou zrcadlových neuronů. (70)

Změna proudové hustoty byla výrazná na obou hemisférách, ale dle očekávání výraznější v levé hemisféře, v tomto frekvenčním pásmu iluze pohybu levou horní končetinou nevyvolala tak silnou neuronální aktivitu jako skutečný pohyb pravou horní končetinou.

Frekvenční pásmo theta se podílí především na denním snění a spánku. Pokud je theta aktivita prominentní, značí to poruchu v podobě deprese či těžké poruchy pozornosti s hyperaktivitou. Pokud jsou theta vlny potlačeny, lze u dané osoby pozorovat úzkost a stres. V optimálním stavu theta pomáhá v kreativě, emočním spojení, intuici a relaxaci. (66) Liang (2018) uvádí, že hipokampální a v menší míře i kortikální nízkofrekvenční oscilace v pásmech delta, theta a alfa (1–12 Hz) se u lidských pacientů s epilepsií zvyšují během lokomoce, a to, jak v reálném světě, tak ve virtuální realitě. Ve své studii popsal souvislost růstu delta-theta oscilací s aktivitou i u zdravých volně se pohybujících účastníků. (67) Villafaina a kol. (2019) zjistili, že zvýšení síly theta v zadních oblastech mozkové kůry během hry šachu by mohlo znamenat, že síla theta je spojena s dlouhodobou pamětí a vyhráváním. Pravá hemisféra se také ukázala být o něco aktivnější během šachových partií. (72) Fuentes-Garcia a kol. (2019) došli k výsledkům, že aktivita theta souvisí s vysokou úrovní obtížnosti motorických úloh a stresem při řešení problémů. (71) Ve frekvenci theta byl největší rozdíl proudové hustoty oproti klidovému stavu

zaznamenán v gyrus cingulate posterior v BA 30, 29, 23, 31 a BA 18 ve středním okcipitálním gyru. BA 6, 7 a 40 měly zastoupení podle míry výskytu nad 10 %.

BA 30, 29, 23 a 31 se vyskytují na mediální straně hemisfér, plní funkci při učení komplexní motorické dovednosti, ale jsou zapojeny do motorického učení méně než gyrus cingulate anterior. Jsou součástí limbického systému, a proto mají úzkou souvislost s emocemi. Dávají do souvislosti emoce a schopnost zapamatování si. Pro jedince je snažší si zapamatovat informace významné z emočního tedy motivačního hlediska. BA 18 má toho hodně společného s oblastí BA 19, jejíž funkce byla popsána u frekvence delta. Tato oblast se podílí na vizuálně prostorovém zpracování informací a u pravé hemisféry je funkcí reakce na emoce. U BA 6 precentrálního gyru frontálního laloku je dle výsledků zřejmá aktivita především na pravé hemisféře, zahrnuje premotorický kortex a doplňkovou motorickou oblast SMA. Hlavní funkcí je motorické řízení a plánování dobrovolného pohybu. Dále je to například koordinace pohybu mezi končetinami – bimanuální aktivity a aktualizace informací o vnějším prostoru. Doplňková motorická oblast je ve svých funkcích plánování pohybu závislá na vnitřním stavu organismu (73; 74). SMA se aktivuje také při představě pohybu. Účast BA 6 v paměti, pozornosti a výkonných funkcích je pravděpodobně způsobena aktivací rozšířené mozkové sítě, sítě zrcadlových neuronů, kam spadá i oblast BA 40 a 7. Oblasti BA 7 a 40 již byly zmíněny ve frekvenčním pásmu delta. Jejich aktivita je převážně spojena se zpracováním gest pomocí nástrojů, motorických obrazů a bimanuální manipulace.

Ve frekvenčním pásmu alfa1 byly zjištěny stejné změny proudové hustoty jako ve frekvenčním pásmu theta. Předpokládá se, že aktivita frekvenčního pásma alfa (8–12 Hz) v centrální, parieto – frontální oblasti mozku souvisí s aktivací motorického kortexu. Tato aktivita koreluje s frekvencí Mu rytmu (8-13 Hz). (69)

V motorické kůře bylo popsáno, že rytmy podobné alfa se podílejí na inhibici plánovaných akcí. Ve frontálním laloku jsou vlny podobné alfa zapojeny do dočasného ukládání paměťových stop. Synchronizace i desynchronizace alfa vln může hrát roli v kognitivních procesech. Hranice mezi theta a alfou nemusí být nutně stabilní v jejich vlnovém konvenčním rozsahu. (75) Což by vysvětlovalo zapojení stejných oblastí se stejnou změnou proudové hustoty ve frekvenčním pásmu theta a alfa. Změna proudové hustoty ve frekvenčním pásmu Mu rytmu oproti klidovému stavu zaujala zejména v oblastech BA 40, 7 a 6. Jedná se o oblasti kortikální sítě zařazené do zrcadlového neuronového systému. Tyto oblasti měly četnost výskytu nad 10 %.

Z výsledků vyplývá, že změna aktivity byla zaznamenána na obou hemisférách avšak s převahou nad levou hemisférou.

Aktivace jádrové kortikální sítě zrcadlového neuronového systému a její funkční integrace se senzomotorickým kortexem za zrakového vnímání akce je jedním z teoretických základů pro aplikaci pozorování akce v neurorehabilitaci motorických deficitů. (69; 76)

Četnost výskytu BA v parietálním a frontálním gyru, tedy u oblastí zapojených do zrcadlového neuronálního systému, může být způsobena i tím, že situace byla pro probandy nová. Jak popisuje Hamilton (2007) ve své studii, kde porovnával aktivitu ve spodní frontální oblasti a spodním parietálním laloku při nových výsledcích pohybu, ale stejným způsobu provedení pohybu byla aktivita v těchto oblastech statisticky významnější než při stejném výsledku pohybu. (69; 77)

Aktivita ve frekvenčním pásmu beta je spojená s nárůstem aktivity a bdělosti jedince, ale zároveň se zvýšením stresujících faktorů vedoucích k ostražitosti. (53) Pásmo beta souvisí s excitací nebo senzoričkou stimulací při pohybu (69). Aktivita roste v reakci na vizuální podnět a s nárůstem podnětů senzoričkových. Umožňuje pochopit důsledky kognitivních funkcí jako je pracovní paměť a rozhodování. (78)

Ve frekvenčním pásmu beta byla pozorována největší aktivita mozku. Souvisí to s nárůstem aktivity na vizuální a senzoričkové podněty, a značí to náročnost prováděných úkolů probandem, na pochopení dané situace. Aktivita byla pozorována ve spodním frontálním gyru frontálního laloku BA 46, 45, 44, 9, 13. Kde oblasti BA 45, 46 a 9 jsou zapojeny do zrcadlové neuronální sítě pro expresivní pohyby a úchopové pohyby. To by souhlasilo s charakterem probandy prováděného pohybu, imitujícího úchop. Z výsledků je též patrné, že aktivita byla na obou hemisférách, ale výraznější nad pravou hemisférou, tedy překvapivě oblastí kontralaterálně k horní končetině, která se nepohybovala. Funkcí těchto oblastí je účast v pracovní paměti, vnitřní reprezentace přichozících informací a tvoří Brocovo centrum. Aktivita u těchto oblastí naznačuje zapojení emocí při provádění úkolu a přítomnost vnitřní řeči, kde má právě pravá oblast BA 44 provázet zapojení emoční složky děje. Funkcí BA 9 je kódování paměti, načítání paměti a čištění paměti úmyslným zapomináním nepotřebných informací. Může značit, že u probandů probíhal vnitřní konflikt vizuálně senzoričkové zpětné vazby se záměrem pohybu. Probandi viděli v zrcadle, že by se jejich levá horní končetina měla pohybovat, což se rozcházel se senzoričkou aferentní informací. BA 13, insula představuje jednu z nejméně prozkoumaných oblastí

s velmi rozmanitou škálou funkcí. Je aktivní i při plánování pohybu, koordinaci končetin v prostoru, emoční složka pohybu a také zpracovává vestibulární informace. (16) Oblasti BA 6 a 45 byly též aktivní ve studii Kim (2021) během pozorování pohybů ruky ve stylu úchopu a oblékání, bylo zjištěno že tyto oblasti zrcadlového neuronálního systému reagují více na pohyby spojené s ADL, než na pozorování obrazů krajiny. (79)

Další aktivita byla v precentrálním gyru frontálního laloku BA 6 a horní části parietálního laloku BA 7. Jak už bylo popsáno výše tyto oblasti jsou také zahrnuty do zrcadlové neuronální sítě.

Tuto hypotézu můžeme považovat za potvrzenou.

## **6.2 Diskuze k hypotéze č. 2**

*Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenýma očima.*

Analýza zjistila statisticky významné rozdíly ve frekvenčních pásmech beta2 a beta3. Jak již bylo zmíněno, aktivita v této oblasti souvisí s nárůstem aktivity na vizuální a sensorické podněty, a značí náročnost prováděných úkolů probandem, na pochopení dané situace.

Ve frekvenčním pásmu beta2 došlo zejména k propojení limbického a okcipitálního laloku. BA 29, 30 se aktivují při učení motorické dovednosti, spojují emoce s motivací a pamětí. Tato aktivita značí vysoce náročné vizuální zpracování při vnímání sensorické stimulace nepohyblivé horní končetiny a kolize s vizuálním vjemem pohybující se horní končetiny na stejném místě. Konflikt je umocněn tím, že v této oblasti probíhá kontrola pohybů vlastních prstů. Molitanový válec zřejmě vytvářel i termické stimuly na horní končetině, i to se odráží na aktivitě těchto oblastí. BA 18 a 19 při společné aktivaci plní funkci logického uvažování. Aktivita v této oblasti značí jistou nelogičnost nastalé situace s kolizí mezi sensorickým a vizuálním vjemem, mozek si snaží udělat obraz pro uložení do vizuální prostorové paměti. Prostřednictvím BA 27 se mozek snaží rozlišit, zda, byla poskytována informace v průběhu úkolu nová a měla by se zakódovat do paměti a nebo je již známá a není ji nutné ukládat, přitom se snaží vyhledávat již v zažitých motorických schopnostech a dovednostech. (80) Byla zde

aktivní i oblast BA 40, může zde pomáhat s učením a plánováním pohybu, je zapojena do zrcadlové neuronální sítě s kódováním výsledku akce. (28)

Ve frekvenčním pásmu beta3 byla největší aktivita v parietálním laloku. Byly zde aktivní jak oblasti pro učení a plánování pohybu zapojené do neuronální zrcadlové sítě BA 40 a BA 6 tak oblast BA 7, která se podílí na zpracování gest a vytvoření vizuoprostorové paměti. BA 39 zajišťovala propojení somatosenzorických a vizuálních informací a jejich vizuoprostorové zpracování. Se zpracováním a propojením vizuálních informací pracovala během úkolu i oblast BA 19. Organizace cílených pohybů pravé horní končetiny a vnímání somatosenzorické aference se projevila výraznou aktivitou v BA 2. (70) Celková aktivita však byla znatelnější v levé hemisféře.

Tuto hypotézu tedy můžeme považovat za potvrzenou.

### **6.3 Diskuze k hypotéze č. 3**

*Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlovou iluzí s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenýma očima.*

U této hypotézy nebyly žádné statisticky významné výsledky na hladině významnosti  $p \leq 0,05$ . Nemůžeme ji tedy potvrdit ani vyvrátit. I tento výsledek je zajímavý, jelikož obdobný pokus (modifikace č. 2) s taktilní stimulací molitanovým válcem statisticky významné změny zaznamenal. Válec i haptický kontakt byl provedeny stejnou osobou pro zachování podobnosti kontaktů. Haptická stimulace mohla silně rušit vizuální efekt zrcadlové terapie, což by vypovídalo o intenzitě vnímání haptického kontaktu.

Dubová (2020) ve své práci zaznamenala aktivitu v oblasti delta při zrcadlové terapii, v situaci s haptickým stimulem ruky skryté za zrcadlem. Výsledek odůvodnila, že daný úkol byl pro probandy kognitivně nejnáročnější. I v subjektivním dotazníku probandi úkol popisovali jako nejvíce matoucí. Narozdíl od naší studie Dubová v této bimodální stimulaci zrcadlila aktivitu nedominantní horní končetiny. Popsaná aktivita v BA 11 a 47 byla výraznější právě v dominantní hemisféře. Je možné, že aktivita byla výraznější, protože byla hapticky stimulována právě dominantní hemisféra. V naší studii jsme hapticky stimulovali nedominantní horní končetinu. (81)

Schirmer (2019) popisuje, že jemný haptický dotek při rychlosti 1-10 cm/s stimuluje jak vlákna A $\beta$  tak i vlákna C, ty se zdají být naladěná lidský kontakt a jsou označovány jako C -taktilní. Jejich stimulace cílí na změnu aktivity v oblasti insuly. (82)

Eckstein et al. (2020) - předpokládá, že sociální dotek může tlumit stres a má uklidňující účinky. Snížení psychobiologického strachu nebo stresových reakcí v neurofyziologických a endokrinních výsledcích po dotyku je nejčastěji hodnoceno pomocí hladiny kortizolu jakožto markeru osy hypotalamus–hypofýza–nadledviny (osa HPA). Mechanismus inhibice strachu a stresu je popisován jako snížení aktivity amygdaly prostřednictvím vstupu prefrontálního kortexu (PFC) a insuly. (83)

Osobu, která v naší studii prováděla haptický stimul mělo 11 z 12 probandů čas poznat a všichni k ní měli kladný vztah. Můžeme se tedy domnívat, že dotek uklidnil pacienty natolik, že potlačil neuronální aktivitu vyvolanou pohybem pravé horní končetiny natolik aby snížil rozdíl mezi klidovým stavem a a zrcadlovou terapií.

Efekt lidského doteku oproti nepersonálnímu doteku hodnotil ve studii Strauss (2019), kde u pacientů s posttraumatickou poruchou lidský dotek vyvolal vzpomínky na trauma na rozdíl od umělého – neosobního doteku. A to zejména v situaci, když byl dotek zastíněn a proband neviděl na daný akt. (84) Jako kontrolní skupina zde figurovali zdraví dospělí. Dotek může stres tlumit i vyvolat, záleží na charakteru doteku a předchozích zkušenostech pacienta.

Ve své studii Schmalzl et. al. (2013) zrcadlili hlazení u 6 pacientů s phantomovou bolestí horní končetiny po amputaci. Mirror therapy s haptickou stimulací zdravé horní končetiny pozitivně ovlivnilo fantomovou bolest u 5 ze 6 pacientů na dobu 5 minut po terapii a u 1 pacienta byla úleva na dobu 4 hodiny. Pokud ovšem pozorovali pacienti pouze pohyb zdravé končetiny bez haptické stimulace úleva od bolesti byla pouze na 1 minutu. Zrcadlení multisenzorické stimulace tak přineslo větší efekt než pouhá zrcadlová terapie. Tato studie je však založená na subjektivním hodnocení probandů a omezena nízkým počtem účastníků. Můžeme ji proto brát pouze jako orientační.

#### **6.4 Diskuze k hypotéze č. 4**

*Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě bez podání taktilního stimulu a klidovým stavem s otevřenými očima.*



Modifikace zaznamenala statisticky významnou diferenci zdrojové aktivity ve frekvenčních pásmech theta, alfa a beta. Jak již je popsáno výše (modifikace č. 1) tento fakt potvrzuje zvýšenou excitabilitu, zapojení motorického kortexu a soustředěnost na pohyb s orientací v prostoru u probandů.

Ve frekvenčních pásmech theta a alfa byl největší rozdíl proudové hustoty oproti klidovému stavu zaznamenán ve frontálním laloku v BA 6, 4, 8, 9. BA 6 je oblastí s největší změnou proudové hustoty a zároveň četností výskytu nad 10 %. tato oblast byla aktivní i u zrcadlové terapie bez stimulace (modifikace č. 1). Hlavní funkcí je motorické řízení a plánování dobrovolného pohybu. Je zapojena do zrcadlové neuronální sítě.

U VR scény, do které je pacient zapojen z pohledu první osoby změny proudové hustoty na jádrech kortexu zrcadlového neuronového systému vedou ke zvýšení ERP, výraznější suprese ve frekvenčních pásmech alfa1 a alfa2 a významnému zlepšení funkční konektivity mezi Jádry kortexu u zrcadlového neuronového systému a senzomotorického kortexu. Tato zjištění naznačují, že ve srovnání s tradičním akčním pozorováním, vizuální znovuobjevení vlastních akcí ve VR scéně stimuluje aktivitu jádrových kortexů systému zrcadlových neuronů a podporuje jeho funkční integraci. (69).

Největší změna oproti klidovému stavu v oblasti BA 6 i nejčetnější aktivita v této oblasti s převahou na pravé hemisféře značí kvalitní, věruhodné provedení zrcadlení pohybu a vtáhnutí probandů do vizuální iluze. Funkčně se BA 8 vyznačuje vizuomotorickou a vizuoprostorovou pozorností, účastní se motorického učení včetně provádění složitějších sekvencí pohybů v určitém pořadí. Primární motorická oblast BA 4 se účastní především motorických a somatosenzorických funkcí, řízení pohybů prstů, rukou a zápěstí kontralaterálních k aktivní hemisféře, kinestetické vnímání končetin. Dále je aktivní při ovládání rytmických motorických úloh. Rytmičtý aktivní pohyb – opakované zatínání pravé ruky v pěst byl hlavní součástí této modifikace. Zapojení BA 9 je stejně tak jako u klasické zrcadlové terapie v první modifikaci znatelné více nad pravou hemisférou což umocňuje skutečnost, že tato oblast je zapojena do zrcadlové neuronální sítě pro expresivní pohyby a úchopové pohyby. To by také souhlasilo s charakterem probandy prováděného pohybu, imitujícího úchop.

Ve studii Milde (39) zakryli zdravým účastníkům výhled na samotnou aktivní horní končetinu což zlepšilo aktivitu v M1 oblasti a centru senzomotorické reprezentace pasivní horní končetiny. Tyto podmínky odpovídaly části studie s použitím VR, kdy proband vlastní končetiny neviděl.

Ve frekvenčních pásmech beta1, beta2 a beta3 byla signifikantní změna proudové hustoty zaznamenáno především ve spodním frontálním gyru frontálního laloku v BA 46, 45, 9, 44, 13 a v BA 6. Stejně oblasti byly aktivní i u klasické zrcadlové terapie (modifikace č. 1) v pásmu beta. Ve frekvenčním pásmu beta byla pozorována největší aktivita korových oblastí. Jak už bylo zmíněno souvisí to s nárůstem aktivity na vizuální a sensorické podněty, a značí to náročnost prováděných úkolů probandem, na pochopení dané situace. Na rozdíl od klasické zrcadlové terapie, zde byla pozorována aktivita v BA 31. Výskyt byl častější v pravé hemisféře. I v této frekvenci byly tedy aktivní oblasti zrcadlové neuronální sítě pro expresivní a úchopové pohyby, spolu s nimi mohlo docházet prostřednictvím BA 31 k učení komplexní motorické dovednosti a pohyb spojit s emočním laděním pro lepší uložení do paměti.

Popsané Brodmannovy arey kortexu ve frekvenčních pásmech beta1–3 jsou shodné s Brodmannovými arey, které jeví největší změny proudové hustoty při klasické zrcadlové terapii bez taktilní stimulace (modifikace č. 1). V těchto frekvenčních pásmech mohou mít tedy oba druhy terapie shodný efekt na aktivitu kortexu.

Rakib (2020) Používal senzor Leap motion pro terapii ve virtuální realitě pro zlepšení motoriky horní končetiny. Do studie zařadil 10 zdravých subjektů, hodnotil výsledky her a přišel k závěru, že starší subjekti mají problém s pochopením hry. To mohlo být způsobeno i tím, že jeho horní končetina se nepodobala lidské ruce, což zhoršovalo orientaci ve virtuálním prostředí.

Mekbib et. al. (2020), autoři této metaanalýzy, hodnotili studie zkoumající efekt terapie ve VR u pacientů po cévní mozkové příhodě. Jako nejčastější výhody terapie ve VR udávali možnost individuální terapie, různá sensorická zpětná vazba, která může rozšířit reálnou zpětnou vazbu například iluzí zvětšení rozsahu pohybu oproti reálnému rozsahu. V naší studii nebyl použit žádný konkrétní program pro terapii ve VR. Do budoucna by bylo vhodné provést studii se softwarem Ruka Ruk u konkrétní diagnózy pacientů a s rozšířením o sensorické zpětné vazby.

Tuto hypotézu můžeme považovat za potvrzenou.

## **6.5 Diskuze k hypotéze č. 5**

*Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se*

*zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním taktilního stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima.*

Analýza zjistila statisticky významné rozdíly ve frekvenčních pásmech theta, alfa1, alfa2, beta1, beta2 a beta3.

V pásmu theta byly aktivní stejné oblasti jako u modifikace č. 1 ve frekvenčním pásmu theta. A to především v parietální kůře. To může značit podobnost mezi oběma druhy terapie, zde však byla podle výsledků vizuálně velmi slabší odpověď. I tato forma intervence by tedy mohla ovlivnit fantomové bolesti či bolest při CRPS. (68) Převažovala zde aktivita na levé hemisféře

Ve frekvenčním pásmu alfa1 byly aktivní jak oblasti pro učení a plánování pohybu zapojené do neuronální zrcadlové sítě BA 40, 6, tak oblasti BA 7, 5, které se podílí na zpracování gest a vytvoření vizuoprostorové paměti. BA 39 zajišťovala propojení somatosenzorických a vizuálních informací a jejich vizuoprostorové zpracování. Organizace cílených pohybů pravé horní končetiny a vnímání somatosenzorické aference se se projevila výraznou aktivitou v BA 2. (70)

I v tomto frekvenčním pásmu převažovala aktivita na levé hemisféře.

Ve frekvenčním pásmu alfa2 byly aktivní pouze oblasti BA 40, 39 a 7. Pořád se však jedná o převážnou část parietálního laloku a funkce tak zůstávají stejné, tedy podíl na motorickém učení, aktivita v rámci zrcadlové neuronální sítě, zajištění zpracování gest, vytvoření vizuoprostorové paměti a propojení somatosenzorických informací s vizuálními.

Ve frekvenčním pásmu beta1 je znovu nejvíce aktivní oblast parietálního laloku BA 40, 39, 7, 19, 2 a frontálního laloku 6. Tato aktivita je stejná jako aktivita ve frekvenčním pásmu beta3 u modifikace č. 2, zrcadlové terapie s taktilním stimulem molitanovým válcem.

Ve frekvenčních pásmech beta2 a beta3 je, kromě již zmíněných oblastí z frekvenčního pásma beta1, aktivita doplněná o BA 13, insulu. Tato oblast, jak už bylo popsáno výše, představuje jednu z nejméně prozkoumaných oblastí s velmi rozmanitou škálou funkcí. Je aktivní i při plánování pohybu, koordinaci končetin v prostoru, zajišťuje emoční složka pohybu a také zpracovává vestibulární informace. U frekvenčního pásma beta2 je zajímavá aktivita v BA 24 tato přední část cingulárního gyru je nejvíce zapojená do motorického učení. Aktivita v přední části cingulárního gyru se nevyskytuje u žádné

jiné modifikace. Je zajímavé, že na rozdíl od haptického kontaktu v modifikaci č. 6, kontakt molitanovým válcem více podporuje aktivitu oblastí s funkcí motorického učení a vizuoprostorové vnímání. Je možné že rozdíl byl umocněn odlišným povrchem a jinou teplotou mezi danými stimulanty. Teplota, tlak délka a frekvence doteku hrají při stimulaci výraznou roli. (87)

Více studiích (19, 87) autoři konstatují, že multimodální terapie ve VR může být pro aktivaci korových oblastí přínosnější než unimodální a urychlit tak následný efekt terapie. Záleží však na charakteru stimulu. Tyto studie rozšiřují zpětnou vazbu a podporují vizuální efekt, v naší studii jsme taktilní stimulací vizuální efekt konfrontovali. Jednou z možností pro podporu efektu ve VR je robotická rukavice, která stimuluje pasivní horní končetinu a pasivně za ní provádí pohyb. (87)

I tuto hypotézu můžeme považovat za potvrzenou.

## **6.6 Diskuze k hypotéze č. 6**

*Předpokládáme, že existuje statisticky významná diference elektrické aktivity v jednotlivých mozkových oblastech hodnocená pomocí sLORETA mezi situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima.*

U této hypotézy nebyly žádné statisticky významné výsledky na hladině významnosti  $p \leq 0,05$ . Nemůžeme ji tedy potvrdit ani vyvrátit. I tento výsledek je zajímavý, jelikož obdobný pokus (modifikace č. 5) s taktilní stimulací molitanovým válcem statisticky významné změny zaznamenal. Válec i haptický kontakt byl provedeny stejnou osobou a pro zachování podobnosti kontaktů. Stejně tak, jako je popsáno u modifikace č.3, haptická stimulace mohla silně narušit a tlumit vizuální efekt. To by vypovídalo o intenzitě vnímání haptického kontaktu probandy. K potlačení statisticky významné změny zdrojové aktivity došlo jak u situací se zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s podáním haptického stimulu neaktivní horní končetiny a klidovým stavem s otevřenými očima, tak stejného úkolu bez VR se zrcadlem. Zřejmě se tedy nejedná o chybu v měření, ale je zapotřebí vícero prozkoumat aktivitu samotného haptického kontaktu. Haptický kontakt umocňuje vizuoproprioceptivní nesoulad mezi propiocepcí z neaktivní končetiny a vizuálním jevem iluzí pohybu zrcadlení aktivity druhé horní končetiny.

Lanillos (2021) ve své studii předpovídá, že probandi zažívající tělesnou iluzi v přítomnosti vizuoproprioceptivního nesouladu mají tendenci vytvářet akce ve formě zvýšení svalové aktivity v paži u neaktivní horní končetiny, které by snížily vizuoproprioceptivního nesoulad. Zvýšením nesouladu tak možná může dojít k rušení efektu zrcadlové terapie. (88)

## 6.7 Limity studie

Studie byla omezena zejména v počtu účastníků. Místo předpokládaných 20–25 se studie účastnilo 12 probandů. Podařilo se mít vyrovnaný počet mužů a žen mezi probandy.

V softwaru Ruka Ruk je nyní možné zobrazit pouze pánské horní končetiny což, ale podle studie (58) nemá vliv na výsledek terapie u obou pohlaví. Bohužel software neumožňuje iluzi haptické či taktilní stimulace, a proto aktivní horní končetina, jejíž pohyb byl zrcadlen, nemohla být stimulována ani v části bez VR. Tento stav se zrcadlovou terapií zkoušela ve své studii Dubová (2020) a její výsledky vyvolaného vizuálního a proprioceptivního konfliktu potvrdily neurofyzilogické účinky zrcadlové zpětné vazby. Podobný výzkum provedl i (19) kdy vytvořil iluzi kontaktu s předmětem ve VR pomocí nasazení vibrační rukavice probandům

Studie Ding (2020) poskytuje předběžný záznam, že zrcadlová terapie v kombinaci se zrcadlením vibrotaktilní stimulace aktivní horní končetiny (jak kontinuální, tak přerušovaná stimulace) by mohla zlepšit vnímání ztělesnění iluze stimulace u končetiny zakryté za zrcadlem u zdravých subjektů. Výsledky ukázaly, že integrace těchto dvou sensorických vstupů taktilního a vizuálního by mohla posílit zkušenost se ztělesněním a se zvýšením motorické kortikální aktivity. (89)

## 7 Závěry

Pomocí zobrazení výsledků statistického porovnání v programu sLORETA byly zjištěny oblasti mozku s největší změnou proudové hustoty oproti klidovému stavu a s největší četností výskytu aktivity pod danou elektrodou. Aktivované Brodmannovy arey byly popsány s pomocí kortikálního atlasu a interaktivního atlasu Brodmannových areí. Byly potvrzeny čtyři ze šesti hypotéz. Hypotézy s haptickým stimulem nemůžeme potvrdit.

Z výsledků našeho experimentu vyplývá, že při zrcadlové terapii se hojně aktivovaly oblasti neuronové sítě zapojené do imitace učení, tedy oblasti s možností výskytu aktivity zrcadlových neuronů především BA (40, 6, 9, 7, 44). Lze pozorovat častou koaktivaci parietální kůry s precentrálním gyrem. Aktivita parietální kůry značí snahu probandů o zpracování rozdílných vizuálních a proprioceptivních informací, které jim byly poskytovány pomocí iluze pohybu pasivní horní končetiny. Precentrální gyrus se podílel na motorickém řízení pohybu jeho aktivita může zvýšit snahu o zapojení pasivní horní končetiny do pohybu pro jeho koordinaci bimanuálních pohybů. Toho by se dalo lépe využít například při přidání bimanuálního úkolu úchopu ve virtuální realitě.

Aktivita v parietálním kortexu posteriorní oblasti je výrazná při vybírání různých motorických vzorů. Léze v této oblasti může u pacientů způsobit opomíjení kontralaterální horní končetiny při pohybu či vizuálního podnětu ležícího na kontralaterální straně. Proto aktivita v této oblasti při zrcadlové terapii značí přínos pro pacienty s danou lézí. Podílí se i na vnímání bolesti, a proto lze terapií tlumit fantomové bolesti či bolesti při CRPS.

Aktivita v okcipitálním gyru značí vhodnost terapie pro učení komplexní motorické dovednosti a taky, že úkol v probandech vyvolával emoční reakce. Pro tyto případy je do budoucna vhodné studii doplnit o dotazník na subjektivní vnímání terapie probandem.

U úkolu sledování zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě bez taktilní stimulace došlo k nejlepším výsledkům, co se týká zapojení BA v pravé hemisféře. Tedy hemisféry kontralaterální k neaktivní ruce. Pro účastníky byla iluze v tomto úkolu nejspíše nejvíce věrohodná a došlo ke ztělesnění účastníků s virtuálním prostředím.

Při zrcadlové terapii bez taktilního stimulu a zrcadlením pohybu horní končetiny ve virtuální realitě s taktilním stimulem i bez stimulu se objevila aktivita v oblastech neuronální sítě pro expresivní pohyby a úchopové pohyby BA 9, 45, 46 Tyto úkoly budou do budoucna vhodné pro nácvik úchopu v rámci terapie.

Porovnání zrcadlové terapie a terapie se zrcadlením pohybu ve virtuální realitě ukázalo schodu těchto terapií pro frekvenční pásmo beta. Obě terapie zde měly největší změnu proudové hustoty oproti klidovému stavu v oblastech BA 45, 44, 9, 46, 13, 6.

Je potřeba více dopodrobna prozkoumat skutečnost, zda haptický stimul na končetinu skrytou za zrcadlem potlačil rozdíl ve zdrojové aktivitě při zrcadlové terapii a terapii se zrcadlením ve VR oproti klidovému stavu.

## 8 Citovaná literatura

1. VÉLE, F. *Kineziologie: přehled klinické kineziologie a patokineziologie pro diagnostiku a terapii poruch pohybové soustavy*. Praha: Triton, 2006. ISBN 978-80-7254-837-8.
2. SHUMWAY-COOK, A. a M. H. WOOLLACOTT. *Motor control: translating research into clinical practice*. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2007. ISBN 978-0-7817-6691-3.
3. DYLEVSKÝ, I. *Speciální kineziologie*. Praha: Grada, 2009. ISBN 978-80-247-1648-0.
4. IONTA, S., R. GASSERT a O. BLANKE. Multi-Sensory and Sensorimotor Foundation of Bodily Self-Consciousness – An Interdisciplinary Approach. *Frontiers in Psychology* [online]. 2011, **70**(2), 363–374 [cit. 2020-11-15]. ISSN 1664-1078. Dostupné z: doi:10.3389/fpsyg.2011.00383
5. KOBEŠOVÁ, A. a P. KOLÁŘ. Developmental kinesiology: Three levels of motor control in the assessment and treatment of the motor system. *Journal of Bodywork and Movement Therapies* [online]. 2014, **18**(1), 23–33 [cit. 2020-08-30]. ISSN 13608592. Dostupné z: doi:10.1016/j.jbmt.2013.04.002
6. MOINI, J. a P. PIRAN. Cerebral cortex. In: *Functional and Clinical Neuroanatomy* [online]. B.m.: Elsevier, 2020, 177–240 [cit. 2020-08-01]. ISBN 978-0-12-817424-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-817424-1.00006-9
7. JAVED, Kinaan, Vamsi REDDY a Forshing LUI. Neuroanatomy, Cerebral Cortex. In: *StatPearls* [online]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, 2021 [cit. 2020-08-01]. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK537247/>
8. GRANT, P. Cerebral Cortex. In: *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* [online]. B.m.: Elsevier, 2015, 332–343 [cit. 2021-09-01]. ISBN 978-0-08-097087-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-097086-8.55009-0
9. AMBLER, Z. *Základy neurologie: [učebnice pro lékařské fakulty]*. Praha: Galén : Karolinum, 2006. ISBN 978-80-7262-433-1.

10. LEMON, R. N. Descending Pathways in Motor Control. *Annual Review of Neuroscience* [online]. 2008, **31**(1), 195–218 [cit. 2020-09-30]. ISSN 0147-006X, 1545-4126. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.neuro.31.060407.125547
11. SWENSON, R.S. a A.T. GULLEDGE. The Cerebral Cortex. In: *Conn's Translational Neuroscience* [online]. B.m.: Elsevier, 2017, 263–288 [cit. 2021-01-01]. ISBN 978-0-12-802381-5. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-802381-5.00021-X
12. ARYA, K. N. Underlying neural mechanisms of mirror therapy: Implications for motor rehabilitation in stroke. *Neurology India* [online]. 2016, **64**(1), 38 [cit. 2021-01-30]. ISSN 0028-3886. Dostupné z: doi:10.4103/0028-3886.173622
13. JUDAŠ, M., M. CEPANEC a G. SEDMAK. Brodmann's map of the human cerebral cortex — or Brodmann's maps? *Translational Neuroscience* [online]. 2012, **3**(1), 67–74 [cit. 2020-11-10]. ISSN 2081-6936, 2081-3856. Dostupné z: doi:10.2478/s13380-012-0009-x
14. KIKALOVÁ K., L. MACHÁLEK a V. HOLIBKA. *Neuroanatomie I. Struktury CNS* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého, 2009. [cit. 2021-04-25] Dostupné z: <http://www.nan.upol.cz/neuro/cd699.html>
15. HANZLOVÁ, J. *Základy anatomie nervový systém a čivy* [online]. Fakulta informatiky Masarykovy univerzity. 2014. [cit. 2021-04-25] Dostupné z: [https://is.muni.cz/do/fsps/e-learning/zaklady\\_anatomie/zakl\\_anatomie\\_IV/pages/centralni\\_nervovy\\_system.html#id14](https://is.muni.cz/do/fsps/e-learning/zaklady_anatomie/zakl_anatomie_IV/pages/centralni_nervovy_system.html#id14)
16. *Brodmann's Interactive Atlas* [online]. fMRI Consulting. 2008. [cit. 2021-04-25] Dostupné z: <http://www.fmriconsulting.com/brodmann/Interact.html>
17. AMUNTS, K. a K. ZILLES. Architectonic Mapping of the Human Brain beyond Brodmann. *Neuron* [online]. 2015, **88**(6), 1086–1107 [cit. 2021-05-01]. ISSN 08966273. Dostupné z: doi:10.1016/j.neuron.2015.12.001



18. GAGE, N. M. a B. J. BAARS. Decisions, Goals, and Actions. In: *Fundamentals of Cognitive Neuroscience* [online]. B.m.: Elsevier, 2018, 279–319 [cit. 2021-08-05]. ISBN 978-0-12-803813-0. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803813-0.00009-X
19. MOLDOVEANU, A. et al. The TRAVEE System for a Multimodal Neuromotor Rehabilitation. *IEEE Access* [online]. 2019, **7**, 8151–8171 [cit. 2021-06-30]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2018.2886271
20. MOGENSEN, J.. Reorganization of the Injured Brain: Implications for Studies of the Neural Substrate of Cognition. *Frontiers in Psychology* [online]. 2011, **2**, 10 [cit. 2021-06-30]. ISSN 1664-1078. Dostupné z: doi:10.3389/fpsyg.2011.00007
21. ABELA, E., et al. Grey matter volumetric changes related to recovery from hand paresis after cortical sensorimotor stroke. *Brain Structure and Function* [online]. 2015, **220**(5), 2533–2550 [cit. 2021-06-30]. ISSN 1863-2653, 1863-2661. Dostupné z: doi:10.1007/s00429-014-0804-y
22. WARD, N. S. a L. G. COHEN. Mechanisms Underlying Recovery of Motor Function After Stroke. *Archives of Neurology* [online]. 2004, **61**(12) [cit. 2021-08-05]. ISSN 0003-9942. Dostupné z: doi:10.1001/archneur.61.12.1844
23. CLARK, A. Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences* [online]. 2013, **36**(3), 181–204 [cit. 2021-06-30]. ISSN 0140-525X, 1469-1825. Dostupné z: doi:10.1017/S0140525X12000477
24. BLOM, T., S. BODE a H. HOGENDOORN. The time-course of prediction formation and revision in human visual motion processing. *Cortex* [online]. 2021, **138**, 191–202 [cit. 2021-06-15]. ISSN 00109452. Dostupné z: doi:10.1016/j.cortex.2021.02.008
25. HICKOK, G. Eight Problems for the Mirror Neuron Theory of Action Understanding in Monkeys and Humans. *Journal of Cognitive Neuroscience* [online]. 2009, **21**(7), 1229–1243 [cit. 2021-06-15]. ISSN 0898-929X, 1530-8898. Dostupné z: doi:10.1162/jocn.2009.21189

26. BUCCINO, G., A. SOLODKIN a S. L. SMALL. Functions of the Mirror Neuron System: Implications for Neurorehabilitation: *Cognitive and Behavioral Neurology* [online]. 2006, **19**(1), 55–63 [cit. 2021-06-15]. ISSN 1543-3633. Dostupné z: doi:10.1097/00146965-200603000-00007
27. OBERMAN, L. M., J. A. PINEDA a V. S. RAMACHANDRAN. The human mirror neuron system: A link between action observation and social skills. *Social Cognitive and Affective Neuroscience* [online]. 2007, **2**(1), 62–66 [cit. 2021-06-15]. ISSN 1749-5016, 1749-5024. Dostupné z: doi:10.1093/scan/nsl022
28. RIZZOLATTI, G. a C. SINIGAGLIA. The mirror mechanism: a basic principle of brain function. *Nature Reviews Neuroscience* [online]. 2016, **17**(12), 757–765 [cit. 2021-06-01]. ISSN 1471-003X, 1471-0048. Dostupné z: doi:10.1038/nrn.2016.135
29. STEFAN, K. Formation of a Motor Memory by Action Observation. *Journal of Neuroscience* [online]. 2005, **25**(41), 9339–9346 [cit. 2021-06-01]. ISSN 0270-6474, 1529-2401. Dostupné z: doi:10.1523/JNEUROSCI.2282-05.2005
30. YAVUZER, G., et al. Mirror Therapy Improves Hand Function in Subacute Stroke: A Randomized Controlled Trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* [online]. 2008, **89**(3), 393–398 [cit. 2021-06-12]. ISSN 00039993. Dostupné z: doi:10.1016/j.apmr.2007.08.162
31. IACOBONI, M., et al. Grasping the Intentions of Others with One’s Own Mirror Neuron System. *PLoS Biology* [online]. 2005, **3**(3), 79 [cit. 2021-06-15]. ISSN 1545-7885. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pbio.0030079
32. GIROUX, M., et al. The respective contributions of visual and proprioceptive afferents to the mirror illusion in virtual reality. *PLOS ONE* [online]. 2018, **13**(8), [cit. 2021-06-30]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0203086
33. GRÈZES, J a J DECETY. Does visual perception of object afford action? Evidence from a neuroimaging study. *Neuropsychologia* [online]. 2002, **40**(2), 212–222 [cit. 2021-06-02]. ISSN 00283932. Dostupné z: doi:10.1016/S0028-3932(01)00089-6
34. GRÈZES, J, J. L. ARMONY, J. ROWE a R. E PASSINGHAM. Activations related to “mirror” and “canonical” neurones in the human brain: an fMRI study.

- NeuroImage* [online]. 2003, **18**(4), 928–937 [cit. 2021-06-02]. ISSN 10538119. Dostupné z: doi:10.1016/S1053-8119(03)00042-9
35. SENO, T. a H. FUKUDA. Stimulus Meanings Alter Illusory Self-motion (Vection) — Experimental Examination of the Train Illusion. *Seeing and Perceiving* [online]. 2012, **25**(6), 631–645 [cit. 2021-06-02]. ISSN 1878-4755, 1878-4763. Dostupné z: doi:10.1163/18784763-00002394
  36. SAYEGH, S. A., et al. Mirror therapy for Complex Regional Pain Syndrome (CRPS)—A literature review and an illustrative case report. *Scandinavian Journal of Pain* [online]. 2013, **4**(4), 200–207 [cit. 2021-06-02]. ISSN 1877-8860, 1877-8879. Dostupné z: doi:10.1016/j.sjpain.2013.06.002
  37. SPISS, S., M. SIESS, Y. KIM a M. HARDERS. Effect of Touch Stimuli on Proprioceptive Recalibration During Upper-Limb Rotation in Virtual Reality Mirror Therapy. In: *2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob): 2018 7th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (Biorob)* [online]. Enschede: IEEE, 2018, s. 279–284 [cit. 2021-08-15]. ISBN 978-1-5386-8183-1. Dostupné z: doi:10.1109/BIOROB.2018.8488133
  38. FURUKAWA, K., H. SUZUKI aj. FUKUDA. Motion of the drawing hand induces a progressive increase in muscle activity of the non-dominant hand in Ramachandrans mirror-box therapy. *Journal of Rehabilitation Medicine* [online]. 2012, **44**(11), 939–943 [cit. 2021-06-30]. ISSN 1650-1977. Dostupné z: doi:10.2340/16501977-1048
  39. MILDE, Ch., et al. Do Mirror Glasses Have the Same Effect on Brain Activity as a Mirror Box? Evidence from a Functional Magnetic Resonance Imaging Study with Healthy Subjects. *PLOS ONE* [online]. 2015, **10**(5), [cit. 2021-06-30]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0127694
  40. RAKIB, N. F., et al. Preliminary Results of Hand Rehabilitation for Post Stroke Patient using Leap Motion-based Virtual Reality. In: *2020 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD): 2020 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)* [online]. Batu Pahat, Malaysia: IEEE, 2020,

- 259–262 [cit. 2021-08-10]. ISBN 978-1-72819-317-5. Dostupné z: doi:10.1109/SCOReD50371.2020.9250985
41. WANG, Z., P. WANG, L. XING, L. MEI, J. ZHAO a T. ZHANG. Leap Motion-based virtual reality training for improving motor functional recovery of upper limbs and neural reorganization in subacute stroke patients. *Neural Regeneration Research* [online]. 2017, **12**(11), 1823 [cit. 2021-07-30]. ISSN 1673-5374. Dostupné z: doi:10.4103/1673-5374.219043
42. WANG, Ch.-Ch., et al. Care for Patients with Stroke During the COVID-19 Pandemic: Physical Therapy and Rehabilitation Suggestions for Preventing Secondary Stroke. *Journal of Stroke and Cerebrovascular Diseases* [online]. 2020, **29**(11), [cit. 2021-07-30]. ISSN 10523057. Dostupné z: doi:10.1016/j.jstrokecerebrovasdis.2020.105182
43. LUPU, R. G., et al. Virtual reality based stroke recovery for upper limbs using leap motion. In: *2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC): 2016 20th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)* [online]. Sinaia, Romania: IEEE, 2016, 295–299 [cit. 2021-08-10]. ISBN 978-1-5090-2720-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICSTCC.2016.7790681
44. LIM, H. K., et al. Test-retest reliability of the virtual reality sickness evaluation using electroencephalography (EEG). *Neuroscience Letters* [online]. 2021, **743**, [cit. 2021-07-30]. ISSN 03043940. Dostupné z: doi:10.1016/j.neulet.2020.135589
45. SONG, M. a J. KIM. A Paradigm to Enhance Motor Imagery Using Rubber Hand Illusion Induced by Visuo-Tactile Stimulus. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* [online]. 2019, **27**(3), 477–486 [cit. 2021-07-30]. ISSN 1534-4320, 1558-0210. Dostupné z: doi:10.1109/TNSRE.2019.2895029
46. ANTOŠ, O. *Software pro podporu rehabilitace ruky* [online]. Kladno, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství. [cit. 2021-06-30] Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/91200>

47. GOLDING, J. F. Predicting individual differences in motion sickness susceptibility by questionnaire. *Personality and Individual Differences* [online]. 2006, **41**(2), 237–248 [cit. 2021-06-30]. ISSN 01918869. Dostupné z: doi:10.1016/j.paid.2006.01.012
48. OZKAN, D. G. a R. PEZZETTA. Predictive monitoring of actions, EEG recordings in virtual reality. *Journal of Neurophysiology* [online]. 2018, **119**(4), 1254–1256 [cit. 2021-06-30]. ISSN 0022-3077, 1522-1598. Dostupné z: doi:10.1152/jn.00825.2017
49. PFURTSCHELLER, G. The cortical activation model (CAM). In: *Progress in Brain Research* [online]. B.m.: Elsevier, 2006, 19–27 [cit. 2021-08-10]. ISBN 978-0-444-52183-5. Dostupné z: doi:10.1016/S0079-6123(06)59002-8
50. BOČKOVÁ, M. Desynchronizace a synchronizace EEG rytmtů. *Neurologie pro praxi*. 2009, **10**(4), 242–245.
51. FABER, J. *Elektroencefalografie a psychofyziologie*. 1. Praha: ISV, 2001. ISBN 978-80-85866-74-2.
52. FABER, J. *EEG: atlas do kapsy*. Praha: Triton, 1997. ISBN 978-80-85875-51-5.
53. PÁNEK, D. *Elektroencefalografické koreláty pohybového chování a výkonnostní zátěže*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2016. ISBN 978-80-246-3459-3.
54. KUMAR, J. S. a P. BHUVANESWARI. Analysis of Electroencephalography (EEG) Signals and Its Categorization—A Study. *Procedia Engineering* [online]. 2012, **38**, 2525–2536 [cit. 2021-06-30]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2012.06.298
55. SANEI, S. a J. CHAMBERS. *EEG signal processing*. Chichester, England ; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-470-02581-9.
56. BRUNSDON, V. E. A., E. E. F. BRADFORD a H. J. FERGUSON. Sensorimotor mu rhythm during action observation changes across the lifespan independently from social cognitive processes. *Developmental Cognitive Neuroscience* [online].

- 2019, **38**, [cit. 2021-06-30]. ISSN 18789293. Dostupné z: doi:10.1016/j.dcn.2019.100659
57. HUMMEL, F., et al. Inhibitory control of acquired motor programmes in the human brain. *Brain* [online]. 2002, **125**(2), 404–420 [cit. 2021-05-30]. ISSN 1460-2156, 0006-8950. Dostupné z: doi:10.1093/brain/awf030
58. CHENG, Y., et al. Gender Differences in the Mu Rhythm of the Human Mirror-Neuron System. *PLOS ONE* [online]. 2008, **3**(5), 18 [cit. 2021-05-30]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0002113
59. DECKER, S. L., A. M. ROBERTS aj. J. GREEN. LORETA Neurofeedback in College Students with ADHD. In: *Z Score Neurofeedback* [online]. B.m.: Elsevier, 2015, 333–352 [cit. 2021-08-01]. ISBN 978-0-12-801291-8. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-801291-8.00014-5
60. JATOI, M. A., N. KAMEL, A. S. MALIK a I. FAYE. EEG based brain source localization comparison of sLORETA and eLORETA. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine* [online]. 2014, **37**(4), 713–721 [cit. 2021-05-30]. ISSN 1879-5447. Dostupné z: doi:10.1007/s13246-014-0308-3
61. SHIN, Ch., et al. Impact of 2D and 3D display watching on EEG power spectra: A standardized low-resolution tomography (sLORETA) study. *Signal Processing: Image Communication* [online]. 2021, **93**, [cit. 2021-05-30]. ISSN 09235965. Dostupné z: doi:10.1016/j.image.2021.116151
62. PASCUAL-MARQUI, R. D., C. M. MICHEL a D. LEHMANN. Low resolution electromagnetic tomography: a new method for localizing electrical activity in the brain. *International Journal of Psychophysiology* [online]. 1994, **18**(1), 49–65 [cit. 2021-06-30]. ISSN 01678760. Dostupné z: doi:10.1016/0167-8760(84)90014-X
63. YAO, D. a B. HE. A Self-Coherence Enhancement Algorithm and its Application to Enhancing Three-Dimensional Source Estimation from EEGs. *Annals of Biomedical Engineering* [online]. 2001, **29**(11), 1019–1027 [cit. 2021-06-30]. ISSN 0090-6964. Dostupné z: doi:10.1114/1.1415526

64. PHILLIPS, Ch., M. D. RUGG a K. J. FRISTON. Anatomically Informed Basis Functions for EEG Source Localization: Combining Functional and Anatomical Constraints. *NeuroImage* [online]. 2002, **16**(3), 678–695 [cit. 2021-06-30]. ISSN 10538119. Dostupné z: doi:10.1006/nimg.2002.1143
65. PHILLIPS, Ch., M. D. RUGG a K. J. FRISTON. Systematic Regularization of Linear Inverse Solutions of the EEG Source Localization Problem. *NeuroImage* [online]. 2002, **17**(1), 287–301 [cit. 2021-06-30]. ISSN 10538119. Dostupné z: doi:10.1006/nimg.2002.1175
66. ABHANG, P. A., et al. Technical Aspects of Brain Rhythms and Speech Parameters. Introduction to EEG- and Speech-Based Emotion Recognition *Academic press* [online]. 2016, 51–79 [cit. 2022-04-13]. ISBN 9780128044902. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-804490-2.00003-8
67. LIANG, M., M. J. STARRETT a A. D. EKSTROM. Dissociation of frontal-midline delta-theta and posterior alpha oscillations: A mobile EEG study. *Psychophysiology* [online]. 2018, **55**(9) [cit. 2022-03-03]. ISSN 00485772. Dostupné z: doi:10.1111/psyp.13090.
68. CHRISTOPOULOS, V. N., K. N. ANDERSEN a R. A. ANDERSEN. Extinction as a deficit of the decision-making circuitry in the posterior parietal cortex. The Parietal Lobe *Elsevier* [online]. 2018, 151, 163-182 [cit. 2022-04-13]. Handbook of Clinical Neurology. ISBN 9780444636225. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63622-5.00008-5
69. FAN, H. a Z. LUO. Functional integration of mirror neuron system and sensorimotor cortex under virtual self-actions visual perception. *Behavioural Brain Research* [online]. 2022, 423 [cit. 2022-04-13]. ISSN 01664328. Dostupné z: doi:10.1016/j.bbr.2022.113784
70. BERNARD, R. A., et al. Cortical activation during rhythmic hand movements performed under three types of control: An fMRI study *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience* [online]. 2002, **2**(3), 271-281 [cit. 2022-04-13]. ISSN 1530-7026. Dostupné z: doi:10.3758/CABN.2.3.271

71. FUENTES-GARCÍA, J. P., et. al. *Psychophysiological stress response of adolescent chess players during problem-solving tasks* [online]. 2019, **209** [cit. 2022-04-13]. ISSN 00319384. Dostupné z: doi:10.1016/j.physbeh.2019.112609
72. VILLAFAINA, S., et. al. Electroencephalographic response of chess players in decision-making processes under time pressure *Physiology & Behavior* [online]. 2019, **198**, 140-143 [cit. 2022-04-13]. ISSN 00319384. Dostupné z: doi:10.1016/j.physbeh.2018.10.017
73. MARTÍNEK, M., et. al. Analysis of Intracerebral Activity during Reflex Locomotion Stimulation According to Vojta's Principle. *Applied Sciences* [online]. 2022, **12**(4) [cit. 2022-04-13]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12042225
74. Derek, W.Y., L. Forshing. *Physiology, Motor Cortical*; *StatPearls Publishing: Treasure Island, FL, USA*, [online]. 2020, [cit. 2022-04-13] Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK542188/>
75. BAARS, B. J. a N. M. GATE, ed. Fundamentals of Cognitive Neuroscience: Chapter 8 - The brain is conscious. *Fundamentals of Cognitive Neuroscience* [online]. Academic Press, 2013, 2013, 211-252 [cit. 2022-04-13]. ISBN 9780124158054. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-415805-4.00008-4
76. RIZZOLATTI, G., M. FABBRI-DESTRO a L. CATTANEO. Mirror neurons and their clinical relevance. *Nature Clinical Practice Neurology* [online]. 2009, **5**(1), 24-34 [cit. 2022-04-13]. ISSN 1745-834X. Dostupné z: doi:10.1038/ncpneuro0990
77. HAMILTON, A. F. a S. T. GRAFTON. Action Outcomes Are Represented in Human Inferior Frontoparietal Cortex. *Cerebral Cortex* [online]. 2008, **18**(5), 1160-1168 [cit. 2022-04-13]. ISSN 1460-2199. Dostupné z: doi:10.1093/cercor/bhm150
78. DA SILVA, K., et al. Male practitioners of physical activity present lower absolute power of beta band in time perception test. *Neuroscience*



- Letters* [online]. 2021, **764** [cit. 2022-04-13]. ISSN 03043940. Dostupné z: doi:10.1016/j.neulet.2021.136210
79. KIM, J.-C. a H.-M. LEE. EEG-Based Evidence of Mirror Neuron Activity from App-Mediated Stroke Patient Observation. *Medicina* [online]. 2021, **57**(9) [cit. 2022-04-13]. ISSN 1648-9144. Dostupné z: doi:10.3390/medicina57090979
80. STRANGE, B. A. a R. J. DOLAN. Anterior medial temporal lobe in human cognition: Memory for fear and the unexpected. *Cognitive Neuropsychiatry* [online]. 2006, **11**(3), 198-218 [cit. 2022-04-13]. ISSN 1354-6805. Dostupné z: doi:10.1080/13546800500305096
81. DUBOVÁ D. Cerebrální projekce haptického kontaktu zobrazená v Sloreta. Praha, 2020. 71 s. Diplomová práce na UK FTVS. Vedoucí diplomové práce David Pánek.
82. SCHIRMER, A. a F. MCGLONE. A touching Sight: EEG/ERP correlates for the vicarious processing of affectionate touch. *Cortex* [online]. 2019, **111**, 1-15 [cit. 2022-04-23]. ISSN 00109452. Dostupné z: doi:10.1016/j.cortex.2018.10.005
83. ECKSTEIN, M., et al. Calming Effects of Touch in Human, Animal, and Robotic Interaction—Scientific State-of-the-Art and Technical Advances. *Frontiers in Psychiatry* [online]. 2020, **11** [cit. 2022-04-23]. ISSN 1664-0640. Dostupné z: doi:10.3389/fpsy.2020.555058
84. STRAUSS, T., et al. Touch aversion in patients with interpersonal traumatization. *Depression and Anxiety* [online]. 2019, **36**(7), 635-646 [cit. 2022-04-23]. ISSN 1091-4269. Dostupné z: doi:10.1002/da.22914
85. SCHMALZL, L., et al. An Alternative to Traditional Mirror Therapy. *The Clinical Journal of Pain* [online]. 2013, **29**(10), e10-e18 [cit. 2022-04-23]. ISSN 0749-8047. Dostupné z: doi:10.1097/AJP.0b013e3182850573
86. MEKBIB, D. B., et al. Virtual reality therapy for upper limb rehabilitation in patients with stroke: a meta-analysis of randomized clinical trials. *Brain*

Injury [online]. 2020, **34**(4), 456-465 [cit. 2022-04-23]. ISSN 0269-9052.  
Dostupné z: doi:10.1080/02699052.2020.1725126

87. PROULX, C. E., et. al. Somesthetic, Visual, and Auditory Feedback and Their Interactions Applied to Upper Limb Neurorehabilitation Technology: A Narrative Review to Facilitate Contextualization of Knowledge. *Frontiers in Rehabilitation Sciences* [online]. 2022, **3** [cit. 2022-04-23]. ISSN 2673-6861. Dostupné z: doi:10.3389/freesc.2022.789479
88. LANILLOS, P., et. al. Active strategies for multisensory conflict suppression in the virtual hand illusion. *Scientific Reports* [online]. 2021, **11**(1) [cit. 2022-04-23]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-021-02200-7
89. DING, L., et. al. Mirror Visual Feedback Combining Vibrotactile Stimulation Promotes Embodiment Perception: An Electroencephalogram (EEG) Pilot Study. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* [online]. 2020, **8** [cit. 2022-04-24]. ISSN 2296-4185. Dostupné z: doi:10.3389/fbioe.2020.553270
90. GRÜNERT-PLÜSS, N., et al. Mirror Therapy in Hand Rehabilitation: A Review of the Literature, the St Gallen Protocol for Mirror Therapy and Evaluation of a Case Series of 52 Patients. *The British Journal of Hand Therapy* [online]. 2008, **13**(1), 4-11 [cit. 2022-04-24]. ISSN 1369-9571. Dostupné z: doi:10.1177/175899830801300101

## **Seznam příloh**

Příloha č. 1 – Vyjádření etické komise

Příloha č. 2 – Informovaný souhlas

Příloha č. 3 – Obrázky k výsledkům