

SELVITYS NEUROFEEDBACK-MENETelmäSTÄ

Tutkimus, teoria ja haasteet

Santeri Lepistö
Markus Ilkka
Pro gradu -tutkielma
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto
Syyskuu 2020

ESIPUHE

Tämä Jyväskylän yliopiston psykologian laitoksen opinnäytetyö toteutettiin poikkeusolosuhteissa COVID-19-pandemian aikana, mistä syystä tutkimusprojektin toiminta keskeytettiin maaliskuussa 2020 Suomen valtioneuvoston asettamien kriisitoimenpiteiden takia. Ennen koronaviruskriisin alkamista aineistonkeruu oli alkujaan viivästynyt koeasetelmassa havaittujen teknisten vikojen vuoksi ja viallista tutkimusvälineistöä oltiin jouduttu aineistonkeruun aikana useamman kerran korjaamaan. Tekniset viat johtivat lukuvuoden aikana mittauskertojen perumisiin ja uusimisiin. Koronapandemian takia aineistonkeruu lopulta keskeytyi, mikä jätti kyseisen opinnäytetyön otoksen merkittävästi suunniteltua suppeammaksi sekä teknisistä vioista johtuen osittain laadultaan epäjohdonmukaiseksi.

Kyseiset tapahtumat muuttivat opinnäytetyön tutkimusotetta. Koska alkuperäisessä tutkimussuunnitelmassa pysyminen olisi tuntunut epätarkoituksenmukaiselta, laajensimme opinnäytetyön näkökulmaa ja aloimme kokeellisen tutkimuksen rinnalla yleisemmin selvittämään, mitä neurofeedback-menetelmä ja -tutkimuskenttä pitävät sisällään. Opinnäytetyötä lähdettiin viemään kohti jonkinasteista triangulaatiota: tutkielma on yhdistelmä sekä kokeellista tutkimusta että tutkimuskentän kirjallisuuteen perustuvaa katsauksellista selvitystä. Tutkielman kokeellinen tutkimus, joka oli jo lähtökohtaisesti eksploratiivinen, toimi hyödyllisenä tukena tutkimuskenttään perehtymisessä. Vastaavasti tavoitteenamme oli tutkimuskirjallisuuteen perehtyessä saada uusia näkökulmia kokeellisen neurofeedback-tutkimuksen arvioimiseen. Neurofeedback-tutkimuskenttää on kutsuttu pitkäksi ja mutkaiseksi tieksi, eikä sattuneista syistä johtuen oma tiemmekään aina suoranaisten kiihdytyskaista ollut. Matka oli kuitenkin opettavainen ja olemme siitä kiitollisia.

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Psykologian laitos

LEPISTÖ, SANTERI & ILKKA, MARKUS: Selvitys neurofeedback-menetelmästä

Pro gradu -tutkielma, 51 s.

Ohjaaja: Jan Wikgren

Psykologia

Syyskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Aivotoiminnan itsesäätelyyn perustuvaa neurofeedback-menetelmää on tutkittu ja sovellettu niin kognitiivisen tehostamisen kuin kliinisen hoitotyön kentillä ristiriitaisin tuloksin. Kognitiivisten tai kliinisten muutosten saavuttamiseksi neurofeedback-tutkimuksissa on pyritty tyypillisesti muuttamaan tietyn aivoaallon esiintymistä. Tässä pro gradu -tutkielmassa tutkittiin neurofeedback-menetelmää tarkastelemalla alfa-rytmin (8–12 Hz) ja sensorimotorisen rytmin (12–15 Hz) modulaation vaikutuksia sekä intervention yhteyttä tutkittavien tunnetiloihin ja kokemuksiin mentaalisten strategioiden käyttämisestä. Koehenkilöt (n = 13) osallistuivat neurofeedback-tutkimuksessa viiden harjoittelukerran mittaiseen interventioon, jossa he pyrkivät tietokonevälitteisen pelin avulla muuttamaan aivoaaltojen esiintymistä. Tunnetiloja kartoitettiin jokaisena harjoittelukertana PANAS-kyselylomakkeella mitaten tutkittavien positiivisia ja negatiivisia tunnetiloja. Tutkittavien kokemuksia pelissä suoriutumisesta ja mentaalisten strategioiden käyttämisestä tarkasteltiin intervention päätteeksi avoimella kysymyksellä. Tässä tutkimuksessa 10 minuuttia kestävät neurofeedback-harjoittelukerrat viiden päivän aikana eivät riittäneet moduloimaan spesifisti koeryhmän neuraalista toimintaa. Tunnetilojen tarkastelun osalta intervention harjoittelukerrat vaikuttivat lievästi vähentävän positiivisten tunnetilojen intensiteettiä. Käytetyistä mielensisäisistä strategioista koehenkilöt kokivat pelaamista eniten edistäviksi strategioiksi tietoisuustaidot, positiivisen ajattelun ja rentoutumisen. Tarkasteltaessa kokonaisuudessaan mielensisäisten strategioiden toimivuutta havaittiin, että tutkittavien käyttäjäkokemukset neurofeedback-menetelmän pelattavuudesta olivat vaihtelevia. Selvityksen perusteella neurofeedbackin keskeiseksi haasteeksi arvioimme tiivistyvän niin sanotun kaksinkertaisen neuropsykologisen haasteen: aivotoiminnan itsesäätelyn moduloivuuden ja oskillaatioiden instrumentaalisuuden. Ehdotamme neurofeedback-intervention suunnittelun ja arvioinnin taustateoreettiseksi tueksi systeemistä viitekehystä, joka painottaa tutkittavan interventioresurssien, neurofeedback-metodologian ja muutoskohteena olevan ilmiön optimaalista yhteensovittamista.

AVAINSANAT: neurofeedback, biopalautehoito, neuropsykologia

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ

Department of Psychology

LEPISTÖ, SANTERI & ILKKA, MARKUS: An investigation into the neurofeedback method

Master's thesis, 51 p.

Supervisor: Jan Wikgren

Psychology

September 2020

ABSTRACT

The neurofeedback method based on self-regulation of brain functions has been studied and applied in the fields of cognitive enhancement and clinical improvement with conflicting results. To achieve cognitive or clinical changes, neurofeedback studies have focused on modulating a particular brain wave. In this thesis, neurofeedback method was used to study properties of alpha rhythm (8–12 Hz) and sensorimotor rhythm (12–15 Hz). The study also examined subjects' affective states and experiences of mental strategies during the neurofeedback intervention. The subjects ($n = 13$) participated in a neurofeedback intervention that consisted of five training sessions in which they aimed to modulate neural activity via a brain-computer interface system. Affective states were examined by using PANAS questionnaire which measured positive and negative states of the subjects. After the intervention, experiences of mental strategies were explored by using an open-ended question. In this study 10 minutes lasting neurofeedback training sessions during a five-day intervention were not sufficient to produce specific neural changes in the test group. Regarding the examination of affective states, the training sessions did slightly decrease the intensity of positive affective states. Subjects considered mindfulness skills, positive thinking and relaxation to be the most useful mental strategies during the training. However, when examining the overall functionality of mental strategies, it was found that the user experiences of the neurofeedback playability were ambiguous. Based on the investigation, we summarise that neurofeedback method encompasses a so-called twofold neuropsychological challenge: the neural modulativity of self-regulation and the instrumental role of oscillations. We suggest a systemic perspective to support the implementation of neurofeedback intervention. The theoretical framework emphasizes optimal coordination of three different systems: learner's intervention resources, neurofeedback methodology, and the targeted behavior of neural modulation.

KEYWORDS: neurofeedback, biofeedback, neuropsychology

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1. Neurofeedback.....	2
1.1.1. EEG-biofeedback.....	3
1.1.2. Operantti ehdollistaminen ja neurofeedback-harjoittelu.....	4
1.1.3. Vaikutukset aivotoimintaan.....	6
1.2. Alfa-rytmi ja neurofeedback-harjoittelu.....	8
1.3. Sensorimotorinen rytmi ja neurofeedback-harjoittelu.....	9
1.4. Tutkimuskysymykset.....	11
2. MENETELMÄT	13
2.1. Tutkittavat.....	13
2.2. Neurofeedback-harjoittelu.....	13
2.2.1. EEG-biofeedback.....	14
2.2.2. Elektro-okulografia.....	15
2.3. PANAS-kyselylomake.....	15
2.4. Mentaaliset strategiat.....	16
2.5. Tilastolliset analyysit.....	16
3. TULOKSET	18
3.1. Aivotoiminnan modulaatio.....	18
3.2. Tunnetilat.....	20
3.3. Mentaaliset strategiat.....	22
4. POHDINTA	23
4.1. Aivotoiminnan modulaatio.....	23
4.2. Tunnetilat ja mentaaliset strategiat.....	26
4.3. Tutkimuksen rajoitukset.....	28
4.4. Tutkimuksen johtopäätökset.....	30
4.5. Neurofeedback-intervention rakentuminen.....	31
4.5.1. Suunnittelu ja arviointi.....	31
4.5.2. Keskeiset haasteet.....	37
4.6. Neurobiologisten hoitomuotojen kehitys.....	41
4.7. Neurofeedback-menetelmän jatkotutkimus.....	43
4.7.1. Teoreettiset lähtökohdat.....	43
4.7.2. Käytännön suositukset.....	44
LÄHTEET	45

1. JOHDANTO

Erilaisia aivotoiminnan itsesäätelyyn pohjautuvia menetelmiä on tutkittu 1960-luvulta alkaen (Kamiya, 1962, 1968). Neurofeedback on aivotoiminnan itsesäätelyyn perustuva modulaatiomenetelmä, jonka tavoitteena on tutkittavan neuraalisen toiminnan muuttaminen eli moduloiminen. Menetelmällä pyritään kohdistetusti vaikuttamaan aivojen tapahtumiin hyödyntäen keskushermoston elektrofysiologisia ominaisuuksia. Koska neurofeedback perustuu aivokuvantamiseksi, ovat viime vuosikymmenien niin neurotieteeseen kuin aivokuvantamisteknologiaan liittyvät edistysaskeleet vaikuttaneet yhä kehittyneempien menetelmien käyttämiseen myös aivotoiminnan itsesäätelyn tutkimuskentällä. Viime vuosina on tehty kasvavissa määrin tutkimusta siitä, onko esimerkiksi neurofeedback-menetelmään perustuva interventio joissakin tapauksissa käyttökelpoinen hoitovaihtoehto farmakologisille hoitomenetelmille, psykoterapialle tai aivostimulaatiolle (Marzbani, Marateb, & Mansourian, 2016; Rabipour & Raz, 2012; Rogala ym., 2016). Neurofeedback-menetelmän eduksi voidaan arvioida sen tavoite pyrkiä vaikuttamaan käyttäytymisen taustalla olevaan neurobiologiaan. Lisäksi neurofeedback edellyttää tutkittavalta aktiivista osallistumista ja sen voi arvioida vaikutustavaltaan sekä non-invasiiviseksi että turvalliseksi menetelmäksi.

Vaikka neurofeedbackin on ennakoitu olevan lupaava hoitomuoto, on sen näyttö tutkimustulosten mukaan ainakin toistaiseksi hajanaista (Arns, Heinrich, & Strehl, 2014; Rogala ym., 2016). Heikosti kontrolloitujen koeasetelmien takia ei ole yksiselitteistä, kuinka tehokkaasti neurofeedback vaikuttaa aivotoimintaan tai käyttäytymiseen, ja ovatko mahdolliset vaikutukset pitkäkestoisia tai pysyviä (Arns ym., 2014; Niv, 2013; Rogala ym., 2016). Rogalan ja kollegoiden (2016) katsauksessa kelvollisiksi tarkastelun kohteiksi arvioitiin ainoastaan 86 neurofeedback-tutkimusraporttia, joista edelleen vain 28 tutkimusta täytti laadukkaalle tutkimukselle asetetut kriteerit. Neurofeedbackin voi lisäksi nähdä suhteellisen kalliina ja aikaavievänä menetelmänä. Tässä pro gradu -tutkielmassa tarkasteltiin neurofeedback-menetelmän vaikutusta aivotoiminnan moduloimisessa sekä neurofeedback-harjoittelun yhteyttä tutkittavien tunnetiloihin ja käytettyihin mentaalisiin strategioihin. Lisäksi tutkielmassa tehtiin selvitystä neurofeedback-menetelmän teoreettisesta taustasta ja keskeisistä haasteista pohjautuen tutkimuskirjallisuuteen.

1.1. Neurofeedback

Neurofeedback eli neuroterapia kuuluu biofeedback-tekniikoihin, joilla viitataan fysiologisten toimintojen tahdonalaiseen itsesääteilyyn ulkoisen laitteen antaman reaaliaikaisen palautteen avulla. Neurofeedback-tekniikassa hyödynnetään BCI-menetelmää (*Brain-Computer Interface*), jossa tietokone antaa tutkittavalle palautetta aivojen neuraalisista tapahtumista perustuen aivokuvantamisesta saatuun neurofysiologiseen informaatioon (Vidal, 1973). Aivokuvantamismenetelminä voidaan käyttää korkean temporaalisen resoluution elektroenkefalografiaa ja magnetoenkefalografiaa tai toisaalta korkean spatiaalisen resoluution toiminnallista magneettikuvausta ja lähi-infrapunaspektroskopiaa (Enriquez-Geppert, Huster, & Herrmann, 2017). Verrattuna transkraniaalisen magneetti- ja tasavirtastimulaation kaltaisiin aivostimulaatiomenetelmiin, jotka perustuvat yksisuuntaiselle neuromodulaatiiviselle vaikuttamiselle, on BCI-menetelmässä informaation kulku yksilön ja tietokoneen välillä kaksisuuntaista. Tietokoneavusteisen palautteen avulla yksilö pyrkii ohjaamaan aivotoimintaansa asetetun tavoitteen mukaiseen suuntaan, mitä kutsutaan neurofeedback-harjoitteluksi.

Neurofeedback-tekniikan hyödyntäminen voidaan jakaa ainakin kolmeen eri osaluokkaan, jotka ovat kliininen käyttö osana hoitotyötä, suorituskyvyn tehostaminen ja kokeellinen tutkimus (Enriquez-Geppert ym., 2017). Kliinisessä tutkimuksessa neurofeedback-harjoittelua on sovellettu terapeuttisena työvälineenä liittyen muun muassa ADHD:n, epilepsian ja autismin kirjon häiriöiden hoitoon (Marzbani ym., 2016). Esimerkiksi ADHD:n hoidossa neurofeedback-harjoittelulla on pyritty vähentämään häiriöön kuuluvaa tarkkaamattomuutta (Arns ym., 2014; Linden, Habib, & Radojevic, 1996; Lubar, Swartwood, Swartwood, & O'Donnell, 1995; Monastra, Monastra, & George, 2002) ja sen on esitetty toimivan psykostimulanttien ei-farmakologisena hoitovaihtoehtona (Flisiak-Antonijczuk, Adamowska, Chładzińska-Kiejna, Kalinowski, & Adamowski, 2015; Fuchs, Birbaumer, Lutzenberger, Gruzelier, & Kaiser, 2003; Rossiter & La Vaque, 1995) sekä lisäävän hoidon tehoa toteutettuna yhtäaikaaisesti lääkehoidon kanssa (Pakdaman, Irani, Tajikzadeh, & Jabalkandi, 2018). Osassa ADHD-tutkimuksista neurofeedback-harjoittelun oireita vähentävät vaikutukset ovat olleet pitkäkestoisia (Gani, Birbaumer, & Strehl, 2008; Monastra ym., 2002; Van Doren ym., 2019). ADHD:ta koskevat neurofeedback-tutkimukset ovat kuitenkin toisinaan olleet metodologialtaan epäselviä ja puutteellisia, eikä toistaiseksi voi yksiselitteisesti todeta neurofeedback-harjoittelun olevan tehokas hoitovaihtoehto ADHD:n oireiden

vähentämiseen (Lofthouse, Arnold, Hersch, Hurt, & DeBeus, 2012).

Terveillä koehenkilöillä neurofeedback-harjoittelulla voidaan pyrkiä optimoimaan tai tehostamaan suorituskyykyä liittyen esimerkiksi kognitiivisiin toimintoihin, kuten toiminnanohjaukseen, spatiaaliseen rotaatioon, visuomotorisiin taitoihin ja työmuistiin (Gruzelier, 2014a, 2014b). Neurofeedback-menetelmän teoreettiselle perustalle esitettiin lupaavaa näyttöä, kun Schaferin ja Mooren (2011) tutkimuksessa havaittiin, että etuotsalohkon hermosolujen tahdonalaisella kontrolloinnilla voidaan vaikuttaa valikoivaan tarkkaavuuteen. Angueran (2013) ja kollegoiden tutkimus antoi niin ikään viitteitä siitä, että videopeliin pohjautuva harjoittelu voi johtaa kognitiivisen kontrollin tehostumiseen ja etuotsalohkon plastisiin muutoksiin. Toisaalta on havaittu, että neurofeedback-menetelmän neuraalisen tason muutokset eivät ole olleet toistuvasti taajuuskaistalle spesifejä, ja harjoittelun vaikutusten siirtäminen behavioraaliseen tasolle on ollut ongelmallista (Rogala ym., 2016; Vernon, 2005). Kokeellisessa tutkimuksessa neurofeedback-harjoittelua voidaan käyttää menetelmänä tutkia aivotoiminnan neuraalisia tapahtumia sekä niiden merkitystä behavioraalisiin toimintoihin. Neurofeedback-harjoittelua hyödyntäen on muun muassa tutkittu oskillaatioiden modulaatiivisia ominaisuuksia (Enriquez-Geppert ym., 2014b), aivojen plastisiteettia (Nierhaus, Vidaurre, Sannelli, Mueller, & Villringer, 2019) sekä aivotoiminnan itsesäätelyn ja herätevasteiden välistä yhteyttä (Egner & Gruzelier, 2001).

1.1.1. EEG-biofeedback

EEG-biofeedback eli EEG-biopalautehoito on neurofeedback-tekniikka, jossa käytetään aivokuvantamismenetelmänä elektroenkefalografiaa (EEG). Elektroenkefalografia mittaa pään ihon pinnalle asetetuilla elektrodeilla aivokuoren elektrofysiologista synaptista aktiivisuutta, jonka nähdään muodostuvan korteksin laajojen pyramidaalisolujoukkojen eksitatorisesta ja inhibitorisesta synkronisoitumisesta (Purves & Platt, 2018a). Tyypillisiä aivoissa esiintyviä neuraalisen synkronisoitumisen tuottamia aivoaaltoja eli oskillaatioita, joita myös EEG-biofeedback-harjoittelussa voidaan pyrkiä moduloimaan, ovat delta-rytmi (0.5–4 Hz), theta-rytmi (4–8 Hz), alfa-rytmi (8–12 Hz), sensorimotorinen rytmi (12–15 Hz), beta-rytmi (12–30 Hz) ja gamma-rytmi (> 30 Hz). Taajuuskaistat voidaan liittää erilaisiin psykologisiin tiloihin, jolloin oskillaatioilla tulkitaan olevan instrumentaalinen arvo neurofeedback-harjoittelussa. Näin ollen neurofeedback-intervention tavoite muuttaa tutkittavan behavioraalisia toimintoja tapahtuu oskillaattoristen muutosten välityksellä. EEG-biofeedback-harjoittelun toimivuutta

voidaan mitata kahdella muuttujalla, jotka ovat muutokset EEG-aktiivisuudessa sekä muutokset behavioraalisissa toiminnoissa (Rogala ym., 2016). Jotta behavioraalisilla muutoksilla olisi terapeutista arvoa, on EEG-biofeedback-harjoittelussa tavoitteena, että intervention muutokset ovat pysyviä (Rogala ym., 2016). Koska modulaatio pyrkii pääsääntöisesti behavioraaliseen sovellettavuuteen, ovat Zoefel, Huster ja Herrmann (2011) suositelleet, että BCI-tutkimuksen suunnittelussa hyödynnetään tietynlaisia parametreja modulaation optimoinniksi. Nämä parametrit ovat taajuuskaistan harjoiteltavuus, taajuuskaistan riippumattomuus muista taajuuskaistoista sekä taajuuskaistan yhdistettävyyys tiettyihin kognitiivisiin toimintoihin. Parametrien tarkoituksena on tutkimuksen kohteesta riippuen pyrkiä joko lisäämään tai vähentämään jonkin oskillatorisen taajuuden (Hz) esiintymistä, voimistamaan aivoaallon amplitudia (μV) tai moduloimaan aivoaaltojen keskinäisiä suhteellisia osuuksia.

Neurofeedback-menetelmän hyödyntämisessä on aivokuvantamisen osalta olennaista se, mitä aivoaaltoa tutkitaan, mitä aivoaluetta pyritään kuvantamaan ja kuinka montaa elektrodiä harjoittelussa käytetään. Rogalan ja kollegoiden (2016) tekemässä katsauksessa neurofeedback-metodologiasta suositellaan, että EEG-biofeedback-harjoittelussa käytetään yhden aivoaallon protokollaa sen sijaan, että pyrkimyksenä olisi moduloida kahta aivoaaltoa, kuten theta- ja beta-rytmin välistä suhdetta. Lisäksi he huomauttavat, että on kiinnitettävä huomiota siihen, korreloivatko tutkitun aivoalueen toiminnallisuus, elektrodien sijainti ja tutkimuksen kohteena oleva behavioraalinen suoriutuminen, kuten kognitiivinen testisuoriutuminen, keskenään. EEG-biofeedback voidaan toteuttaa joko monopolaarisella tai bipolaarisella elektrodiasetelmalla. Monopolaarisessa asetelmassa tietokoneen palaute perustuu aktiivielektrodin ja referenssielektrodin kuvantaman datan erotukseen, kun taas bipolaarisessa asetelmassa käytetään kahta aktiivielektrodiä erottelemaan signaalia aivoaktiivisuudessa (Dempster, 2012). Feedback-signaalin lähdepaikannukseen ja mittaamiseen liittyen Rogala ja kollegat (2016) suosittelevat käyttämään useampaa elektrodiä, jotta voidaan varmistaa, että tutkimus tavoittaa tutkimuskohteena olevan aivoalueen aktiivisuuden.

1.1.2. Operantti ehdollistaminen ja neurofeedback-harjoittelu

Aivotoiminnan itsesäätelyssä pääasiallisena oppimisen muotona voidaan pitää operantti ehdollistumista (Skinner, 1937), joka perustuu välittömän syy-seuraussuhteen oppimiseen

palkkioiden ja rangaistusten avulla. Vahvistaminen ja rankaiseminen toimivat keinoina ohjata yksilön erilaisten käyttäytymisen tapojen todennäköisyyksiä. Operantti ehdollistuminen voidaan liittää Thorndiken (1898) kehittämään vaikutuksen lakiin (*law of effect*). Vaikutuksen lain mukaan tyydyttävän vaikutuksen tuottavat vasteet tietyssä tilanteessa tapahtuvat todennäköisemmin uudestaan samassa tilanteessa ja vastaavasti epämiellyttävän vaikutuksen tuottavat vasteet tapahtuvat epätodennäköisemmin uudestaan samassa tilanteessa. Myös evoluution darwinilaiset luonnonvalinnan periaatteet voidaan rinnastaa operantin oppimisen mekanismeihin: ne yksilön käyttäytymisen tavat, jotka tuottavat suotuisia seurauksia, valikoituvat esiintymään tulevaisuudessa muita käyttäytymisen tapoja useammin (Nevin, 1999). Neurofeedback-harjoittelun operantissa ehdollistamisessa yksilön tavoitteena on pyrkiä lisäämään tietokoneen antamien palkkioiden mukaista toimintaa, mikä edellyttää aivostimulaatiomenetelmistä poiketen tutkittavalta aktiivista osallistumista (Enriquez-Geppert ym., 2017). Operantin ehdollistamisen seuraamus eli neurofeedback-palaute voi olla laadultaan visuaalinen, audittiivinen, taktilinen tai yhdistelmä edellisistä (Enriquez-Geppert ym., 2017). Palautteena toimivaan ärsykkeeseen voidaan liittää erilaisia ominaisuuksia. Se voi olla geometriselta luonteeltaan yksinkertainen tai monimutkainen sekä muuttujana diskreetti tai jatkuva (Enriquez-Geppert ym., 2017). Jotta palkkio olisi mahdollisimman kannustava, on tutkittavan opitun avuttomuuden ja kiinnostuksen loppaamisen eli demoralisaation välttämiseksi palkkion antamisen kynnyksen suhteutettava tutkittavan neuraalisen aktiivisuuden lähtötasoon (Enriquez-Geppert ym., 2017). Mikäli palaute on liian vaikeasti säädeltävissä, tutkittavan motivaatio saattaa heikentyä neurofeedback-harjoittelun aikana.

Tutkimuksissa neurofeedback-harjoittelun toteuttamistavat ovat olleet vaihtelevia. Enriquez-Geppert ja kollegat (2017) erottelevat neurofeedback-harjoittelun toteuttamisessa keskeisiksi tekijöiksi harjoittelukertojen lukumäärän valinnan, yksittäisen harjoittelukerran sisällön määrittämisen sekä harjoittelukertojen hajauttamisen. Lisäksi harjoittelun toteuttamisessa on huomioitava, tarjotaanko koehenkilöille etukäteen strategioita itsesäätelyyn, käytetäänkö koeasetelmassa sokkouttamista ja määritetäänkö koehenkilölle yksilöllisesti harjoiteltava taajuuskaista (Enriquez-Geppert ym., 2017; Zoefel ym., 2011). Neurofeedback-tutkimuksissa harjoittelun intensiivisyyttä voidaan tarkastella harjoitteluintensiteetin indeksillä, jossa harjoittelupäivien lukumäärä jaetaan harjoittelupäivien välisen ajan keskiarvolla (Rogala ym., 2016). Kun verrataan eri oppimistekniikoita toisiinsa, on hajautetun harjoittelun perinteisesti tutkittu olevan keskitettyä harjoittelua tehokkaampaa (Ebbinghaus, 1885, 1913). Siinä missä osan koehenkilöistä on havaittu onnistuvan muuttamaan aivotoimintaansa neurofeedback-harjoittelulla, on tutkimuksissa myös säännöllisesti

raportoitu, että tietyllä joukolla koehenkilöitä ei tapahdu neuraalisia muutoksia harjoittelun seurauksena (Nan, Wan, Vai, & Da Rosa, 2015; Rogala ym., 2016; Weber, Köberl, Frank, & Doppelmayr, 2011). Yksilöllisten erojen osalta harjoittelun onnistumiseen on esitetty vaikuttavan ainakin kohtalaisesti tutkittavien ikä ja kontrolliodotukset (Rogala ym., 2016; Witte, Kober, Ninaus, Neuper, & Wood, 2013) sekä visumotoriset taidot ja motivaatio (Hammer ym., 2012; Kleih, Nijboer, Halder, & Kübler, 2010; Nijboer, Birbaumer, & Kubler, 2010).

Yleisesti ottaen voinee todeta, että neurofeedback-harjoittelun on oltava riittävän pitkäkestoista ja säännönmukaista, jotta neuraaliset muutokset olisivat pitkäaikaisia. Mikäli koehenkilö oppii neurofeedback-harjoittelussa nopeasti säätämään aivotoimintaansa, on toisaalta tuotu myös esille, voiko tässä tapauksessa liian pitkään kestäväällä harjoittelulla (*overtraining*) olla toisinaan jonkinlaisia epäedullisia vaikutuksia (Strehl, 2014). Kaiken kaikkiaan on syytä muistaa, kuten Serman ja Egner (2016) huomauttavat koskien epilepsiapotilaiden neurofeedback-harjoittelua, että ammattitaitoinen neurofeedback-menetelmän soveltaminen kliinisessä hoitotyössä vaatii koulutettua ja omistautunutta intervention toteuttajaa. Vaikka neurofeedbackin tavoitteena on kliininen sovellettavuus kortikaalista aktiivisuutta moduloimalla, on esitetty, että neurofeedback-harjoittelussa tapahtuvan oppimisen pitää noudattaa psykoterapeuttista viitekehystä huomioimalla ihmislajille evolutiivisesti ominainen biososiaalinen ulottuvuus (Strehl, 2014). Siitä huolimatta, että neurofeedback-harjoittelu tapahtuu tutkittavan ja tietokoneen välisenä informaation vaihtona, voidaan interventiossa pyrkiä huomioimaan ihmislajin taipumus sosiaaliseen käyttäytymiseen esimerkiksi korostamalla tutkijan ja tutkittavan välistä vuorovaikutusta.

1.1.3. Vaikutukset aivotoimintaan

Neurofeedback-harjoittelun tarkoituksena on moduloida aivotoimintaa ilman ulkoisia sähköisiä, magneettisia tai farmakologisia tekijöitä (Niv, 2013). Neurofeedback-harjoittelun neurokognitiivinen perusta on liitetty ainakin peruslepotilahermoverkon (*Default Mode Network*), toiminnanohjaushermoverkon (*Central Executive Network*) ja olennaisen tunnistavan hermoverkon (*Saliency Network*) toimintoihin, mutta sen täsmällisistä neuraalisista vaikutusmekanismeista ei toistaiseksi ole selkeää tutkimusnäyttöä (Niv, 2013). BCI-perustaisten tekniikoiden vaikutuksista keskushermostoon on kuitenkin tehty tutkimuksia

niin rakenteellisella kuin toiminnallisella aivokuvantamisella. Nierhaus ja kumppanit (2019) tarkastelivat tutkimuksessaan, kuinka tunnin mittainen EEG-biofeedback-harjoittelu liittyen motorisen toiminnan kuvitteluun ja visuaaliseen havaitsemiseen vaikuttavat aivojen plastisiteettiin eli muovautuvuuteen. Tutkimuksessa havaittiin neuraalisia muutoksia sekä rakenteellisessa että toiminnallisessa magneettikuvauksessa sensorimotorisen rytmin kortikaalisilla alueilla, precuneuksessa eli etukiilassa ja okkipito-parietaalisilla alueilla. Lisääntynyt plastisiteetti oli spatiaalisesti tarkkarajainen vastaten neurofeedback-harjoittelussa moduloituja aivoalueita. Terrasan ja kollegoiden (2019) tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin SMR-neurofeedbackin yhteyttä EEG-aktiivisuusmuutoksiin, sensorimotorisen rytmin modulointi johti lisääntyneeseen sensorimotorisen rytmin esiintymiseen sekä lepotilassa korkeampaan toiminnalliseen konnektiivisuuteen somatosensorisen aivokuoren alueella. Kun tutkittiin neurofeedback-harjoittelun vaikutuksia valikoivan tarkkaavuuden neuraalisiin korrelaateihin lapsilla, joilla oli tarkkaavuushäiriö, havaittiin toiminnallisessa magneettikuvauksessa harjoittelun lisännen aktiivisuutta etummaisen pihtipoimun alueella (Lévesque, Beauregard, & Mensour, 2006). Ros ja kollegat (2013) mittasivat EEG-biofeedback-harjoittelun muutoksia toiminnallisella magneettikuvauksella ja niin ikään havaitsivat, että puoli tuntia harjoittelun jälkeen koeryhmällä oli havaittavissa lisääntynyttä funktionaalista konnektiivisuutta etummaisen pihtipoimun dorsaalaisella alueella. Tutkittaessa tarkemmin plastisia vaikutuksia on esitetty, että kortikostriataaliset radat ja striataaliset NMDA-reseptorit toimivat välttämättömänä neuraalisena vaikutusmekanismina tahdonalaisessa neuroproteesitaitojen oppimisessa (Koralek, Jin, Long II, Costa, & Carmena, 2012). Eräässä tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin EEG-biofeedback-harjoittelun yhteyttä transkraniaalisen magneettistimulaation vasteisiin, raportoitiin, että alfa-rytmin suppression harjoittelu oli yhteydessä lisääntyneeseen kortikomotoriseen eksitaatioon (Ros, Munneke, Ruge, Gruzelier, & Rothwell, 2010).

Neurofeedback-menetelmän pääsääntöinen lähestymistapa aivotoiminnan itsesäätelyyn on ollut elektroenkefalografialla aivojen oskillatorisen toiminnan muuttaminen. Runsaasti käytettyjä protokollia oskillatorisiin muutoksiin pyrkiessä ovat olleet muun muassa theta-rytmin, alfa-rytmin, sensorimotorisen rytmin ja beta-rytmin modulaatiot (Gruzelier, 2014a, 2014b). On esitetty, että tehokkaimpia harjoiteltavia aivoaaltoja ovat matalien taajuuksien theta- ja alfa-rytmit (Rogala ym., 2016). Esimerkiksi tutkimuksissa, joissa moduloitiin theta-rytmin mediaalisen prefrontaalikorteksin aluetta, raportoitiin, että kahdeksan harjoittelukerran jälkeen theta-rytmin amplitudi oli merkitsevästi voimistunut tutkimusten koeryhmillä (Enriquez-Geppert, Huster, Figge, & Herrmann, 2014a; Enriquez-Geppert ym.,

2014b). Zoefelin ja kollegoiden (2011) tutkimuksessa liittyen alfa-rytmin modulaatioon sen sijaan esitettiin, että viiden harjoittelukerran mittainen EEG-biofeedback voimistaa ylemmän alfa-taajuuden amplitudia muista taajuuskaistoista riippumattomasti.

1.2. Alfa-rytmi ja neurofeedback-harjoittelu

Alfa-rytmi on taajuuskaistalla 8–12 Hz esiintyvä aivoaalto. Sen amplitudin vaihteluväli on noin 10–50 mV ja sitä mitataan tyypillisesti aivojen okkipitaalialueelta tutkittavan ollessa valveillaolon tilassa silmät kiinni (Purves & Platt, 2018a). Alfa-rytmin neuraaliseksi perustaksi on arvioitu talamo-kortikaalisia hermoverkostoja, joissa ventraalisen talamuksen retikulaarisella tumakkeella on ehdotettu olevan olennainen merkitys rytmisen EEG-aktiivisuuden säätelijänä (Da Silva, 1991; Klimesch, Sauseng, & Hanslmayr, 2007). Ärsykkeeseen tai tehtävään sidottuja aivojen rytmisiä elektrofysiologisia muutoksia voidaan tarkastella tapahtumasidonnaisen synkronisaation eli ERS:n (*event-related synchronization*) ja desynkronisaation eli ERD:n (*event-related deynchronization*) käsitteillä, joista ensimmäinen viittaa laajojen hermosolujoukkojen lisääntyneeseen synkroniseen aktiivisuuteen ja jälkimmäinen vastaavasti vähentyneeseen synkroniseen aktiivisuuteen (Pfurtscheller, 1992). Alfa-rytmin tulkittiin aikoinaan olevan korteksin tuottama passiivinen tila (Adrian & Matthews, 1934), mutta nykyään sen on esitetty toimivan inhibitorisen kontrollin ja ajoituksen kaltaisena aktiivisena top-down-prosessina liittyen valikoivaan tarkkaavuuteen sekä tarkkaavuuden suppression epäolennaisen informaation osalta (Cooper, Croft, Dominey, Burgess, & Gruzelier, 2003; Klimesch ym., 2007; Klimesch, 2012). Näiden kahden tarkkaavuuden perustavanlaatuisen ominaisuuden on ehdotettu toimivan kognition suodattimena mahdollistaen tietoisien ja hallitun tiedonkäsittelyn ajassa, paikassa ja kontekstissa (Klimesch, 2012).

Alfa-rytmiin liittyvä tutkimustyö on luonut perustaa myös neurofeedback-harjoittelun tutkimusperinteelle (Berger, 1929; Kamiya, 1962; Othmer, 1999). Alfa-rytmin tutkimuksen voidaan nähdä alkaneen vuonna 1929, jolloin Berger julkaisi tutkimusraporttinsa ensimmäisistä ihmiseltä mitatuista EEG-tutkimuksista. Tämän jälkeen, vuonna 1962, Kamiya havaitsi, että informoimalla vihjeillä alfa-rytmin ilmenemisestä elektroenkefalografialla koehenkilöt oppivat itsesäätelyllä vaikuttamaan taajuuden esiintymiseen. Kamiyan tutkimuksista alkanut keskustelu siitä, voiko operantilla ehdollistamisella vaikuttaa alfa-rytmin

esiintymiseen, on jatkunut neurotieteessä nykypäivään saakka. Viimeisten vuosikymmenien aikana alfa-rytmin modulaatiolla on tutkittu niin neurofeedbackin-menetelmän metodologiaa (Dempster, 2012) kuin neurofeedback-harjoittelun vaikutuksia kognitioon (Gruzelier, 2014a, 2014b) ja klinisiin oirekuviin (Marzbani ym., 2016). Alfa-rytmin neurofeedback-harjoittelulla on pyritty esimerkiksi hoitamaan kipua, ahdistusta ja aivovammoja sekä vaikuttamaan työmuistiin, semanttiseen mieleenpalautukseen, ajankulun havaitsemiseen ja tietoisuuden muuttamiseen, syvään rentoutumiseen, meditatiiviseen tilaan, mielialaan ja musikaaliseen suoriutumiseen (Bazanov & Mernaya, 2008; Dempster, 2012; Gruzelier, 2014a, 2014b; Marzbani ym., 2016; Wacker, 1996).

Alfa-rytmi on yksi käytetyimmistä aivoaalloista neurofeedbackin tutkimuskentällä, mutta sen modulaatiivisten ominaisuuksien ymmärtäminen ja käytännön sovellettavuus on vielä suhteellisen epäselvää. Ossadtchi, Shamaeva, Okorokova, Moiseeva ja Lebedev (2017) ovat arvioineet, että tahdonalainen itsesäätely neurofeedback-harjoittelulla vaikuttaa pikemminkin alfa-rytmin aikaansaamiseen kuin oskillaation ylläpitämiseen. Osassa neurofeedback-tutkimuksista alfa-rytmi on sen sijaan jaettu useampaan alaryhmään, kuten alempaan (8–10 Hz) ja ylempään (10–12 Hz) alfa-rytmiin. On esitetty, että alempi alfa-rytmi liittyy mieleenpalautukseen ja ylempi alfa-rytmi optimaaliseen kognitiiviseen suoriutumiseen (Dempster, 2012; Marzbani ym., 2016). Vaikka alfa-rytmin on ehdotettu olevan tehokkaimpia EEG:llä moduloitavia aivoaaltoja, ei neurofeedback-tutkimuksissa ole kaiken kaikkiaan toistaiseksi osoitettu johdonmukaisesti toimivia protokollia behavioraalisten muutosten aikaansaamiseksi (Rogala ym., 2016). Rogalan ja kollegoiden katsauksessa (2016) käy ilmi, että seitsemästä perusteellisesti kontrolloidusta alfa-rytmiä moduloivasta tutkimuksesta ainoastaan kahdessa onnistuttiin tuottamaan neurofeedback-harjoittelulla behavioraalisen tason muutos. Toisessa tutkimuksessa muutos tapahtui liittyen mielialan nousuun (Allen, Harmon-Jones & Cavender, 2001), kun taas toisessa tutkimuksessa harjoittelu tehosti työmuistia (Reis ym., 2016).

1.3. Sensorimotorinen rytmi ja neurofeedback-harjoittelu

Sensorimotorinen rytmi eli SMR on alfa-rytmin ohella käytetyimpiä neurofeedback-harjoittelulla moduloitavia aivoaaltoja. Sensorimotorisella rytmillä viitataan aivokuoren keskijuurteen molemmiin puolin esiintyvään aivoaaltoon, jonka esitetään tyypillisesti ilmenevän

beta-rytmiin kuuluvalla taajuuskaistalla 12–15 Hz (Roth, Serman, & Clemente, 1967; Serman & Friar, 1972; Wyrwicka & Serman, 1968). Sensorimotorisen rytmin on tutkittu esiintyvän sensorimotorisella aivokuorella liikkumattomuuden tilassa, jossa yksilö ei toteuta tai kuvittele kehollisia liikkeitä (Serman & Friar, 1972; Wyrwicka & Serman, 1968). Neuraalisesti sensorimotorinen rytmi on arvioitu syntyvän ventrobasaalisen talamuksen, somatosensorisen korteksin ja talamokortikaalisten hermoverkoston muodostamasta rytmisestä elektrofysiologisen aktivaation vaihtelusta (Andersson & Manson, 1971; Howe & Serman, 1972; Serman & Bowersox, 1981). Inhibitorisen talaamisen toiminnan portittamana sekä afferentit että efferentit sensorimotoriset hermoradat ovat vähentyneitä eksitabiliteetiltaan sensorimotorisen rytmin esiintymisen aikana (Serman & Bowersox, 1981).

Sensorimotorisen rytmin modulaation voidaan nähdä alkaneen 1960-luvun tutkimuksista, kun havaittiin, että jotkin aivojen oskillatoriset toiminnot paikallistuvat spesifeille aivoalueille ja esiintyvät määritellyn valveilla tapahtuvan behavioraalisen toiminnan seurauksena (Donhoffer & Lissak, 1962; Kamiya, 1968; Roth ym., 1967; Wyrwicka & Serman, 1968). Kun tutkimuksissa havaittiin kissojen onnistuvan ehdollistamalla tuottamaan sensorimotorisella aivoalueella SMR-aktiivisuutta, aloitettiin sensorimotorisen rytmin neurofeedback-harjoittelua hyödyntämään ihmisten epileptisten kohtausten ehkäisemiseksi (Serman & Friar, 1972; Wyrwicka, 2000; Wyrwicka & Serman, 1968). Serman ja Egner (2006) ovat ehdottaneet sensorimotorisen rytmin neurofeedback-harjoittelun olevan antikonvulsanteilla toteutetulle farmakoterapialle varteenotettava epilepsian hoitovaihtoehto. Epilepsian lisäksi SMR-modulaatiolla on pyritty vaikuttamaan muun muassa oppimisvaikeuksiin (Tansey, 1984), autismin kirjon häiriöön (Pineda, 2008), urheilusuorituksiin (Cheng, 2015) sekä semanttiseen työmuistiin, tarkkaavuuteen ja mieleenpalautukseen (Vernon ym., 2003). Sensorimotorisen rytmin neurofeedback-harjoittelun on lisäksi ehdotettu olevan mahdollista samanaikaisesti toteutetun transkraniaalisen tasavirtastimulaation kanssa (Soekadar, Witkowski, Garcia Cossio, Birbaumer, & Cohen, 2014). Tutkimus esittää, että aivostimulaatiota voidaan soveltaa neurofeedback-interventiossa esimerkiksi motorisessa mielikuvaharjoittelussa.

Neurofeedback-tutkimuskentällä sensorimotorista rytmiä on usein tarkasteltu aivoaaltojen välisenä suhdelukuna, kuten SMR/theta- tai SMR/beta -suhteena (Gruzelier, 2014a, 2014b; Vernon ym., 2003). Neurofeedback-metodologian toimivuutta arvioitaessa on kuitenkin toisaalta todettu, ettei useamman aivoaallon välinen modulointi ole suositeltava harjoitteluprotokolla (Rogala ym., 2016). On myös arvioitu, että SMR- ja beta-rytmien modulaatio on vaikeampaa kuin matalataajuuksisten theta- tai alfa-rytmien (Rogala ym., 2016).

Kuten aiemmin todettiin, on neurofeedback-harjoittelun yleisenä haasteena lisäksi niin sensorimotorisen rytmien kuin muiden oskillaatioiden kohdalla neuraalisten muutosten aikaansaaminen siten, että muutokset siirtyisivät käyttäytymisen tasolle (Rogala ym., 2016).

1.4. Tutkimuskysymykset

Tämän pro gradu -tutkielman kokeellisen tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella neurofeedback-menetelmän vaikutuksia aivojen oskillaatoriseen toimintaan. Vaikka tutkimuksissa neurofeedback-menetelmän on havaittu vaikuttavan sekä rakenteellisesti että toiminnallisesti aivoihin (Nierhaus ym., 2019; Terrasa ym., 2019), on neurofeedbackin tutkimuskenttä ollut epäyhteneväinen niin metodologialtaan kuin tutkimustuloksiltaan (Arns ym., 2014; Niv, 2013; Rogala ym., 2016). Tämän opinnäytetyön tutkimuksessa tarkastelimme kahdella eri protokollalla viiden harjoittelukerran mittaisen neurofeedback-intervention toteuttamista. Ensimmäisessä koeasetelmassa tutkimme kuivaelektrodeilla sensorimotorisen rytmien modulaatiota ja toisessa koeasetelmassa märkäelektrodeilla alfa-rytmien modulaatiota (silmät auki). Neurofeedback-harjoittelun palaute perustui ensimmäisessä koeasetelmassa kahteen elektrodiin, kun taas jälkimmäisessä koeasetelmassa palaute oli riippuvainen yhden elektrodin signaalista. Koska neurofeedback on yhdistetty erilaisiin psykologisiin tekijöihin, kuten motivaatioon (Kleih, Nijboer, Halder, & Kübler, 2010; Nijboer, Birbaumer, & Kubler, 2010), mielialaan (Allen, Harmon-Jones, & Cavender, 2001) ja positiiviseen ajatteluun (Nan ym., 2012), tutkimme niin ikään affektiivisten tilojen ja mentaalisten strategioiden merkitystä neurofeedback-harjoittelussa. Tutkimuskysymyksemme muotoutuivat seuraavanlaisiksi:

1. Vaikuttaako neurofeedback-harjoittelu sensorimotorisen rytmien esiintymiseen?
2. Vaikuttaako neurofeedback-harjoittelu alfa-rytmien esiintymiseen?
3. Vaikuttaako neurofeedback-harjoittelu positiivisiin tai negatiivisiin tunnetiloihin?
4. Minkälaisia mentaalisia strategioita tutkittavat käyttävät NF-harjoittelussa?

Perustuen aikaisempaan neurofeedback-menetelmän ja oppimisen psykologian tutkimusnäyttöön (Kamiya, 1962, 1968; Serman, & Friar, 1972; Thorndike, 1898) oletimme, että tutkittavat oppivat säätelemään aivotoimintaansa, mikä ilmenee lisääntyneenä

sensorimotorisen rytmin aktiivisuutena sensorimotorisella aivokuorella ja alfa-rytmin aktiivisuutena parietaalilohkossa käytettävästä asetelmasta riippuen. Aikaisempien tutkimustulosten perusteella positiivinen affektiivisuus on ollut yhteydessä parempaan suoriutumiseen neurofeedback-harjoittelussa (Allen ym., 2001), joten oletimme lisäksi, että neurofeedback-harjoittelu vaikuttaa tunnetiloihin joko lisäten positiivisten tunnetilojen intensiteettiä tai vähentäen negatiivisten tunnetilojen intensiteettiä. Edellä mainittujen tutkimuskysymysten ohella tarkastelimme tutkittavien kokemuksia mentaalisten strategioiden käytöstä neurofeedback-harjoittelun aikana. Tutkimme, nouseeko vapaasti raportoitujen strategioiden joukosta esille sellaisia strategioita, jotka useampi koehenkilö kokee hyödylliseksi ja suoriutumista edesauttavaksi. Aiemmin esimerkiksi Nan ja kollegat (2012) ovat raportoineet, että positiivinen ajattelu oli osoittautunut toimivimmaksi mentaaliseksi strategiaksi ylemmän alfa-aallon moduloinnissa. Näin ollen oletimme, että positiivisiin asioihin tai tunteisiin keskittyvät mielikuvat koetaan harjoittelun aikana toimiviksi.

2. MENETELMÄT

2.1. Tutkittavat

Tutkimuksen aineistonkeruu suoritettiin Jyväskylän yliopiston psykologian laitoksen tiloissa marraskuun ja maaliskuun välisenä aikana lukuvuonna 2019–2020. Neurofeedback-harjoittelu toteutettiin kahdessa eri ryhmässä, jotka olivat sensorimotorisen rytmin ryhmä ($n = 8$) ja alfa-rytmin ryhmä ($n = 5$). Tutkimuksen koehenkilöt rekrytoitiin psykologian laitoksen opiskelijoiden joukosta. Sensorimotorisen rytmin ryhmän koehenkilöihin kuului lisäksi kyseisen pro gradu -tutkielman tekijät (2) sekä saman tutkimusprojektin kandidaatintutkijaa tekevät opiskelijat (2). Tutkimukseen osallistuneiden koehenkilöiden iät vaihtelivat vuosien 22–28 välillä. Koehenkilöistä 9 oli sukupuoleltaan naisia ja 4 miehiä. Ennen tutkimukseen osallistumista koehenkilöt allekirjoittivat suostumuslomakkeen. Tutkimuksen poissulkukriteereiksi määriteltiin heikentynyt näkö tai kuulo, psykiatriset ja neurologiset sairaudet sekä ihon sairaudet päänahalla.

2.2. Neurofeedback-harjoittelu

Neurofeedback-harjoittelu piti sisällään viisi peräkkäisen päivän mittauskertaa ja se suoritettiin käyttäen Neuroelectrics-tuotemerkin Starstim 8 -järjestelmää sekä Neurosurfer-tietokoneohjelmaa. Yksittäinen harjoittelukerta piti sisällään viisi trialia. Jokaisen trialin kesto oli 120 sekuntia ja niiden välissä oli 30 sekuntia kestävä tauko. Ennen ensimmäistä trialia sekä viidennen trialin jälkeen otettiin lisäksi perustaso- eli baseline-mittaus. Baseline-mittausten kestot olivat 120 sekuntia. Neurofeedback-harjoittelun trialeissa feedback-ärsykkeenä käytettiin 3D-grafiikan videopeliä, johon liittyen koehenkilön tavoitteena oli saada videopelissä liikkuva avaruusalus nousemaan korkeammalle. Avaruusaluksen liikkuminen korkeammalle pelikentällä toimi neurofeedback-harjoittelun palkitsevana visuaalisena ärsykkeenä, kun taas palkitsevana auditorisena ärsykkeenä toimi avaruusaluksen pitämä matala ääni, joka voimistui avaruusaluksen noustessa pelikentällä korkeammalle. Lisäksi kuvaruudun oikeassa laidassa summautui reaaliajassa koehenkilön saama pistemäärä videopelissä. Koehenkilöille ohjeistettiin, että pelin tavoitteena on nostaa avaruusalusta korkeammalle ja

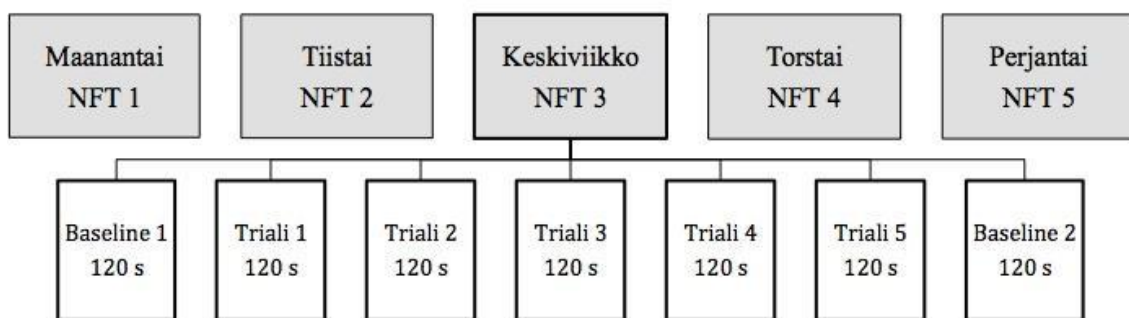
heitä kehoitettiin kokeilemaan yritys-erehdys -oppimistekniikalla erilaisia mentaalaisia strategioita, kuten rentoutumistekniikoita ja mielikuvia. Koehenkilöitä pyydettiin molemmissa ryhmissä olemaan trialien aikana mahdollisimman paikallaan sekä pitämään silmänsä auki. Baseline-mittausten ajaksi koehenkilöitä ohjeistettiin niin ikään olemaan lepotilassa silmät auki. Neurofeedback-harjoittelun rakentuminen on esitetty kuviossa 1.

2.2.1. EEG-biofeedback

Neurofeedback-harjoittelun aivokuvantaminen suoritettiin elektroenkefalografialla (EEG). Tutkimus toteutettiin kahdessa eri ryhmässä, joiden protokollat erosivat toisistaan moduloidun aivoaallon ja käytettyjen elektrodien osalta. Ensimmäisen ryhmän koehenkilöillä neurofeedback perustui sensorimotorisen rytmin (12–15 Hz) harjoitteluun, kun taas toisessa ryhmässä palaute perustui alfa-rytmiin (8–12 Hz). Sensorimotorisen rytmin ryhmässä neurofeedback toteutettiin kuivaelektrodeilla ja alfa-rytmin ryhmässä märkäelektrodeilla. Elektrodit kiinnitettiin kansainvälisen 10–20-järjestelmän mukaisesti (Jasper, 1958). BCI-menetelmän palaute-elektrodeina SMR-ryhmässä käytettiin kahta eri elektrodisijaintia, jotka olivat korteksin keskiuurteen molemmin puolin sijoittuvat C3 (vasen) ja C4 (oikea). Alfa-rytmin ryhmässä palautetta annettiin parietaalilohkon Pz-elektrodisijainnin (keskiuurteen ja parieta-okkipitaaliuurteen välinen alue, *superior parietal lobule*) perusteella. Baseline-mittauksissa käytettiin elektrodien sijainteja Fz, C3, Cz, C4 ja Pz. Tutkimuksen referenssielektrodit CMS ja DRL kiinnitettiin koehenkilön oikean korvan taakse. Videopelin visuaalinen ja auditorinen palaute perustuivat kulloisenkin harjoittelupäivän ensimmäisen baseline-mittauksen arvoihin siten, että baseline-mittauksen ja trialien aikaista dataa verrattiin toisiinsa vastaavilla elektrodisijainneilla ja taajuuskaistoilla. Kun tutkimuskohteena olevan aivoaallon esiintyminen ylitti asetetun raja-arvon, joka oli 50 prosenttia aivoaallon esiintymisestä baseline-mittauksessa, lisääntyi videopelissä palkitsevan ärsykkeen esiintyminen. Vastaavasti alle raja-arvon jäävä taajuuskaistan aktiivisuus laski videopelin avaruusaluksen sijaintia. Aivoaallon signaali- ja dataprosessointi tapahtui reaaliajassa. Aivoaallon esiintymisen signaalin keskiarvoistamisaika oli 200 millisekuntia videopelin palautteen antamiselle.

2.2.2. Elektro-okulografia

Ennen ensimmäistä baseline-mittausta koehenkilöiltä otettiin 30 sekuntia kestävä elektro-okulografia (EOG). Koehenkilöille kiinnitettiin kaksi elektrodiä oikean silmäkulman viereen silmän kehälihaksen (*orbicularis oculi*) alueelle. Elektro-okulografian avulla oli mahdollista tunnistaa neurofeedback-harjoittelun aikana syntyneet sähköiset häiriöt, jotka olivat lähtöisin silmän ja kasvojen alueen liikkeistä.



KUVIO 1. Neurofeedback-harjoittelun rakenne. Koehenkilöt osallistuivat viitenä peräkkäisenä päivänä neurofeedback-harjoitteluun, jossa jokainen yksittäinen päivä piti sisällään perustasomittaukset (Baseline 1 ja 2) ja varsinaisen NF-harjoittelun (Trialit 1–5). NFT = Neurofeedback training.

2.3. PANAS-kyselylomake

Positiivista ja negatiivista affektiivisuutta tutkittiin Watsonin, Clarkin ja Tellegenin (1988) kehittämällä PANAS-kyselylomakkeella (*Positive and Negative Affect Schedule*). Koehenkilöt täyttivät kyselylomakkeen jokaisena harjoittelupäivänä ennen ja jälkeen mittauksen. PANAS-lomake sisältää 20 tunnetilaa kuvaavaa adjektiivia, joiden yhteensopivuutta omaan mielentilaan mittaushetkellä arvioidaan 5-portaisella Likert-asteikolla (1 = hyvin vähän, 5 = erittäin paljon). Tutkittavien positiivista affektiivisuutta arvioitiin seuraavilla adjektiiveilla: kiinnostunut, odottava, vahva, innostunut, ylpeä, valpas, inspiroitunut, päättäväinen, tarkkaavainen ja aktiivinen. Negatiivista affektiivisuutta mittaavat adjektiivit olivat onneton,

järkyttynyt, syyllinen, peloissaan, vihamielinen, ärtynyt, häpeissään, hermostunut, jännittynyt ja huolestunut.

2.4. Mentaaliset strategiat

Viidennen harjoittelupäivän jälkeen tutkittavilta kysyttiin avoimena kysymyksenä subjektiivista arvioita siitä, mitä mielensisäisiä eli mentaalisia strategioita he käyttivät neurofeedback-harjoittelun aikana ja koettiinko jotkin strategiat toisia toimivampina. Kysymys suoritettiin kynä-paperi -tehtävänä.

2.5. Tilastolliset analyysit

EEG-datan power spectrum -taajuusjakauma analysoitiin käyttämällä Matlab-ohjelman pwelch-funktiota. Arvot sensorimotoriselle rytmille ja alfa-rytmille määriteltiin 0.5 Hz resoluutiolla power spectrum -taajuusjakaumasta siten, että jokaisen trialin osalta laskettiin oskillaation esiintyvyyttä kuvaava neliöity power-arvo. Sensorimotorisesta rytmistä mitatut arvot perustuivat elektrodien sijainneista C3 ja C4 saatuun keskiarvoon, kun taas alfa-rytmin esiintyvyyttä kuvaavat arvot laskettiin sijainnin Pz perusteella. Keskimääräiset tehot sensorimotoriselle rytmille taajuuskaistalta 13–16 Hz ja alfa-rytmille taajuuskaistalta 8–13 Hz jaettiin vastaavien trialien keskimääräisillä referenssiarvoilla taajuuskaistalta 5–20 Hz. Näin saatiin sensorimotorisen rytmin ja alfa-rytmin keskimääräistä osuutta kuvaavat suhteelliset arvot. Trialien arvoista muodostettiin tämän jälkeen keskiarvommuuttajat kuvaamaan aivoaaltojen keskimääräisiä esiintymisiä harjoittelupäivinä 1–5, trialeilla 1–5 sekä baselinemittausajankohtina 1 ja 2.

Tarkasteltaessa taajuusjakaumasta analysoituja sensorimotorisen rytmin suhteellisia arvoja havaittiin, että aineistonkeruun data oli jäänyt merkittävän vaillinaiseksi. Koska aineistonkeruussa esiintyi SMR-ryhmän osalta teknisiä vikoja, ei sensorimotorisen rytmin epäjohdonmukaiselle ja puutteelliselle datalle suoritettu tilastollisia analyyskejä. SMR-ryhmää hyödynnettiin tulosten analysoinnissa siten, että SMR-ryhmän ei-moduloitua alfa-rytmin esiintymistä verrattiin alfa-rytmin ryhmään, jossa varsinainen alfa-rytmin modulaatio tapahtui. Näin ollen alfa-rytmi analysoitiin molempien ryhmien osalta. Varsinainen alfa-rytmin ryhmä

toimi tutkimuksessa koerymänä ($n = 5$) ja SMR-ryhmä kontrollirymänä ($n = 8$). Tilastolliset analyysit aivotoiminnan modulaation arvoille tehtiin IBM SPSS Statistics 26 -ohjelman toistettujen mittausten varianssianalyysillä.

PANAS-vastauksista muodostettiin ensin summamuuttujat, jotka pitivät sisällään jokaisen harjoittelupäivän positiivisten ja negatiivisten tunnetilojen yhteenlasketut vastaukset. Tämän jälkeen summamuuttujista tehtiin keskiarvomuttujat koskien positiivisia ja negatiivisia affektiivisiä tiloja ennen neurofeedback-harjoittelua ja sen jälkeen. Tilastolliset analyysit tunnetilojen arvoille suoritettiin IBM SPSS Statistics 26 -ohjelman toistettujen mittausten varianssianalyysillä.

3. TULOKSET

3.1. Aivotoiminnan modulaatio

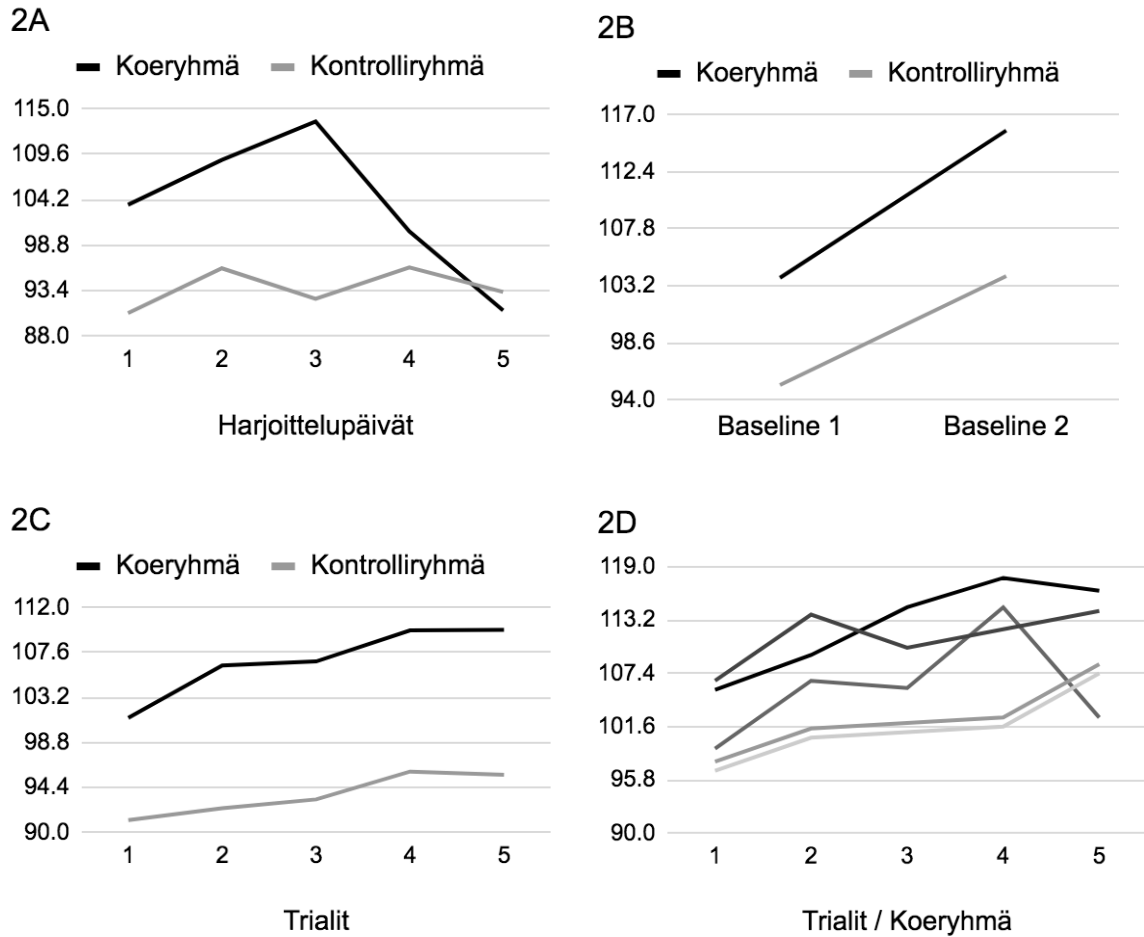
Koeryhmän (alfa-modulaatio) ja kontrolliryhmän (SMR-modulaatio) alfa-rytmien arvoja tarkasteltaessa havaittiin, etteivät kaikkien muuttujien arvot olleet normaalisti jakautuneita ($M_o \neq M_d \neq K_a$). Boxplot-kuviolla tarkasteltiin laatikko-janakuvion ulkopuolelle jääviä poikkeavia havaintoja (*outliers*). Boxplot-kuvio toteutettiin erikseen koe- ja kontrolliryhmälle sekä baseline- ja triali-mittauksille. Kuviota analysoitaessa yksi trialissa esiintynyt poikkeava havainto tulkittiin mittausvirheeksi ja se korvattiin koehenkilön muiden harjoittelupäivien vastaavien trialien keskiarvolla. Kun oltiin muodostettu harjoittelupäivien, trialien ja baseline-mittausten keskiarvomuuttujat, tarkasteltiin edelleen boxplot-kuviolla poikkeavia havaintoja. Harjoittelupäivien osalta poikkeavia havaintoja oli yksi, kun taas sekä trialien että baseline-mittausten osalta poikkeavia havaintoja oli viisi. Poikkeavat havainnot siirrettiin niitä vastaavien muuttujien jakaumissa häntäpäähän seuraavaksi suurimman tai pienimmän arvon jatkeeksi poikkeavasta havainnosta riippuen.

Koska tutkimuksessa oltiin kiinnostuneita yhdysvaikutuksista, suoritettiin tilastolliset analyysit toistettujen mittausten varianssianalyysillä. Tutkimuksessa tarkasteltiin alfa-rytmien esiintymisen kehityskulkuja käyttäen toistomittaustekijänä neurofeedback-intervention harjoittelupäiviä 1–5, trialeja 1–5 ja baseline-mittauksia 1–2. Tarkasteltaessa harjoittelupäivien kuvailevia tietoja olivat koeryhmän keskiarvot (ja keskihajonnat) seuraavat: 103.6 (16.33), 108.92 (16.37), 113.48 (10.22), 100.44 (15.85) ja 91.04 (22.36). Kontrolliryhmän arvot olivat 90.73 (16.87), 96.05 (19.10), 92.43 (21.21), 96.15 (20.37) ja 93.24 (15.37). Tutkittaessa harjoittelupäivien aikana varianssien yhtäsuuruuksia havaittiin, että Mauchlyn sfäärisyysoletukset olivat voimassa. Kun ensin tarkasteltiin erikseen harjoittelupäivien aikana tapahtuvaa muutosta ilman ryhmien vaikutusta, ei harjoittelupäivillä havaittu tilastollisesti merkitsevää omavaikutusta ($F(4, 48) = .853, p = .499, \eta^2 = .066$). Tutkittaessa harjoittelupäivien ja ryhmien yhdysvaikutusta ei tutkimustulos niin ikään ollut tilastollisesti merkitsevä ($F(4, 44) = 1.302, p = .284, \eta^2 = .106$). Koe- ja kontrolliryhmän alfa-rytmien esiintyminen harjoittelupäivien aikana on esitetty kuviossa 2A.

Tämän jälkeen tutkittiin aivotoiminnan modulaatiota trialien aikana. Kun tarkasteltiin trialien 1–5 aikana kuvailevia arvoja alfa-rytmien esiintymisessä, olivat koeryhmän keskiarvot

(ja keskihajonnat) seuraavat: 101.2 (4.57), 106.32 (5.58), 106.72 (5.7), 109.76 (7.27) ja 109.8 (5.53). Kontrolliryhmän vastaavat arvot olivat 91.2 (14.58), 92.37 (13.75), 93.23 (13.74), 95.95 (14.98) ja 95.63 (15.03). Tutkittaessa trialien aikana varianssien yhtäsuuruuksia havaittiin, että Mauchlyn sfäärisyysoletukset olivat voimassa. Tarkasteltaessa ensin alfa-rytmin esiintymistä viiden trialin aikana ilman ryhmien vaikutusta havaittiin, että trialeilla oli tilastollisesti merkitsevä omavaikutus ($F(4, 48) = 8.625, p < .001, \eta^2 = .418$), joka ilmeni oskillaation arvojen kasvamisena. Kun trialien aikana tapahtunutta muutosta tarkasteltiin tarkemmin, havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero ensimmäisen ja toisen trialin välillä ($F(1, 12) = 8.485, p < .05, \eta^2 = .414$). Tutkittaessa koeryhmän ja kontrolliryhmän välisiä eroja alfa-rytmin esiintymisessä ei trialeilla ja ryhmällä havaittu yhdysvaikutusta ($F(4, 44) = .927686, p = .46, \eta^2 = .078$). Kuviossa 2C on esitetty trialien osalta koe- ja kontrolliryhmän alfa-rytmin esiintyminen. Kuviossa 2D on havainnollistettu erilaisia trialien aikaisia alfa-rytmin kehityskulkuja koeryhmän koehenkilöiden välillä.

Aivotoiminnan modulaatiota tarkasteltiin lopuksi alfa-rytmin esiintymisinä baseliine-mittauksissa ennen (Baseline 1) ja jälkeen (Baseline 2) neurofeedback-harjoittelun. Baseline 1 ja 2 -mittauksen keskiarvot (ja keskihajonnat) olivat koeryhmän osalta 103.84 (18.86) ja 115.72 (7.82). Kontrolliryhmässä vastaavat arvot olivat 95.2 (17.2) ja 103.98 (16.46). Tutkimustulokset tulkittiin sfäärisyysoletuksen mukaisesti. Tarkasteltaessa ensin baseliine-mittausten omavaikutusta havaittiin alfa-rytmin esiintymisessä tilastollisesti merkitsevä muutos arvojen kasvamisena ($F(1, 12) = 8.804, p < .05, \eta^2 = .423$). Baseliine-mittauksia ja ryhmää samanaikaisesti tarkastellessa ei kuitenkaan havaittu yhdysvaikutusta ($F(1, 11) = .188, p = .673, \eta^2 = .017$). Ryhmissä tapahtuneet alfa-rytmin esiintymiset on esitetty baseliine-mittausten osalta kuviossa 2B.



KUVIO 2. Koe- ja kontrolliryhmässä alfa-rytmin esiintyminen harjoittelupäivien (2A), baseline-mittausten (2B) ja trialien (2C) aikana. Kuviossa 2D on esitetty koeryhmässä tapahtuneita alfa-rytmin kehityskulkuja koehenkilöiden välillä.

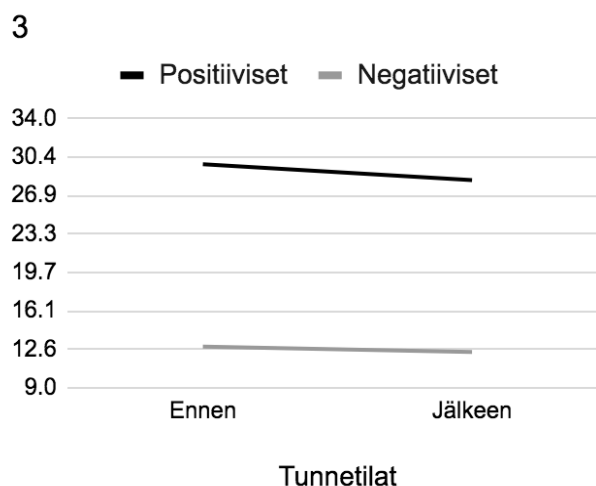
Yhteenvetona aivotoiminnan modulaation tutkimustuloksista voi todeta, että trialien ja baseline-mittausten tasoilla havaittiin alfa-rytmin esiintymisessä itsessään tilastollisesti merkitsevää arvojen kasvamista. Sen sijaan koe- ja kontrolliryhmä eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan harjoittelupäivien, trialien tai baseline-mittausten tasoilla

3.2. Tunnetilat

Neurofeedback-harjoittelun vaikutusta koehenkilöiden (n = 13) positiivisiin ja negatiivisiin tunnetiloihin tarkasteltiin PANAS-kyselylomakkeen vastauksilla. Aineistoa tarkasteltaessa havaittiin, etteivät kaikkien muuttujien arvot olleet normaalisti jakautuneita ($M_o \neq M_d \neq K_a$).

Muuttujien arvoja tarkasteltiin tarkemmin boxplot-kuviolla. Koska muuttujien poikkeavia havaintoja ei tulkittu mittausvirheiksi, pidettiin poikkeavat havainnot mukana aineistossa. Aineisto sisälsi kaksi puuttuvaa arvoa, jotka korvattiin niitä vastaavien koehenkilöiden keskiarvoilla muiden mittauskertojen perusteella. Tämän jälkeen muuttujista muodostettiin keskiarvomuuttujat kuvaamaan tunnetilojen esiintymistä ennen neurofeedback-harjoittelua ja sen jälkeen. Kun boxplot-kuviolla tarkasteltiin keskiarvomuuttujien poikkeavia havaintoja, poikkeavia arvoja havaittiin neljä ja ne siirrettiin niitä vastaavien muuttujien jakaumien häntäpäähän seuraavaksi suurimman tai pienimmän arvon jatkeeksi havainnosta riippuen.

Tämän jälkeen toistettujen mittauksen varianssianalyysillä tutkittiin, eroaako positiivisten ja negatiivisten tunnetilojen intensiteetit toisistaan ennen neurofeedback-harjoittelua ja sen jälkeen. Kun tarkasteltiin kuvailevia arvoja, oli positiivisten tunnetilojen keskiarvot (ja keskihajonnat) ennen-jälkeen seuraavat: 29.75 (5.33) ja 28.28 (5.66). Negatiivisten tunnetilojen keskiarvot (ja keskihajonnat) neurofeedback-harjoittelussa ennen-jälkeen olivat 12.82 (2.74) ja 12.32 (1.83). Tulokset analysoitiin sfäärisyysoletuksen mukaisesti. Kun tutkittiin positiivisia tunnetiloja, havaittiin baseline-mittauksilla omavaikutus ($F(1, 12) = 10.373$, $p < .01$, $\eta^2 = .464$), joka ilmeni positiivisia tunnetiloja koskevien arvojen vähenemisenä. Negatiivisten tunnetilojen analyysissä ei havaittu baseline-mittauksilla omavaikutusta ($F(1, 12) = 1.248$, $p = .286$, $\eta^2 = .094$). Tunnetilojen tulokset on esitetty kuviossa 3.



KUVIO 3. Positiivisten ja negatiivisten tunnetilojen keskiarvot ennen NF-harjoittelua ja sen jälkeen.

3.3. Mentaaliset strategiat

Laadulliset havainnot tutkittavien (n = 13) vastauksista liittyen mentaalisten strategioiden käyttämiseen neurofeedback-harjoittelussa tulkittiin aineistolähtöisesti. Vastauksista luotiin kuusi eri aihealuetta sen perusteella, kuinka temaattisesti samankaltaisia kuvailuja tutkittavat kirjoittivat mentaalisten strategioiden käyttämiskokemuksista. Vastauksissa painottuivat seuraavat teemat: 1. tietoisuustaidot, 2. rentoutuminen, 3. positiivinen ajattelu, 4. jännitys, 5. hermoilu ja kontrolloiva ajattelu sekä 6. kokemukset aivotoiminnan itsesäätelyn toimimattomuudesta strategiasta riippumatta. Tutkittavien vastauksista tietoisuustaidot (12 koehenkilöä), positiivinen ajattelu (7 koehenkilöä) ja rentoutuminen (7 koehenkilöä) olivat strategioita, jotka teemansa osalta koettiin toimiviksi neurofeedback-harjoittelussa. Kun tarkasteltiin kokonaisuudessaan tutkittavien kokemuksia mahdollisuudestaan vaikuttaa pelin avaruusaluksen liikkeeseen, olivat kokemukset toimivuudesta koehenkilöiden välillä vaihtelevia.

4. POHDINTA

4.1. Aivotoiminnan modulaatio

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin neurofeedback-menetelmän vaikutuksia aivojen oskillatoriseen toimintaan. Koska sensorimotorisen rytmin aivokuvantamisdatan havaittiin jääneen tilastollisissa menetelmissä vaillinaiseksi, hyödynnettiin SMR-ryhmää kontrolliryhmänä alfa-rytmin tulosten tulkinnassa. Tutkimustuloksissa verrattiin koeryhmän moduloitua alfa-rytmiä kontrolliryhmän ei-moduloituun alfa-rytmiin. Aikaisempiin tutkimuksiin (Kamiya, 1962, 1968; Serman, & Friar, 1972) perustuen oletimme, että neurofeedback-harjoittelussa tapahtuva aivotoiminnan itsesäätely lisää alfa-rytmin esiintyvyyttä. Alfa-rytmin esiintyvyyttä tarkasteltiin harjoittelupäivien, trialien ja baseline-mittausten tasoilla.

Kun tutkittiin alfa-rytmin esiintymistä harjoittelupäivien aikana, ei aivoaallon esiintymisessä havaittu muutosta koko otoksen osalta tai ryhmien välillä (kuvio 2A). Sen sijaan harjoittelupäivien sisällä ja baseline-mittausten välillä alfa-rytmin esiintyminen kasvoi kokonaisuudessaan. Vaikka aikaisemmissa tutkimuksissa on terveillä henkilöillä saatu lupaavia tutkimustuloksia myös suhteellisen vähäisellä harjoittelupäivien lukumäärällä (Zoefel ym., 2011), on kuitenkin usein onnistuneissa interventioissa harjoittelukertojen määrä vaihdellut 30–40 kerran välillä (Enriquez-Geppert ym., 2013). Tämän tutkimuksen alfa-modulaation harjoittelun kesto (10 minuuttia) ja harjoittelukertojen lukumäärää (5 harjoittelupäivää) voidaan pitää riittämättömänä harjoittelupäivien välillä ilmenevälle muutokselle. Lisäksi tutkimus ei mahdollistanut harjoittelupäivien hajauttamista aivotoiminnan itsesäätelyn oppimisessa (Ebbinghaus, 1885, 1913), vaan NF-harjoittelun rakenne koostui peräkkäisistä harjoittelupäivistä (kuvio 1). Koska harjoittelupäivien välillä tutkittavaan vaikuttaa myös harjoittelukertojen ulkopuoliset tekijät, on kehityksen aikaansaamiseksi intervention oltava todennäköisesti riittävän pitkäkestoista. Tämän tutkimuksen intervention pituuden voi tulkita tutkittavan näkökulmasta suhteellisen vähäiseksi ajaksi opetella alfa-rytmin säätelyyn liittyvää synkronisaatiota ja desynkronisaatiota mentaalisten strategioiden avulla. Aivotoiminnan itsesäätely perustuu operanttiin ehdollistamiseen, mistä johtuen sellaisten käyttäytymisen tapojen, jotka tuottavat suotuisan vasteen, voidaan arvioida lisääntyvän interventiossa neurofeedback-harjoittelukertojen myötä

(Nevin, 1999; Thorndike, 1898). Vastaavasti toimimattomien aivotoiminnan itsesäätelyn strategioiden voidaan arvioida harjoittelukertojen edetessä karsiutuvan. Suppea interventio ei välttämättä sisällä riittävästi aikaa tutkittavalle löytää yritys-erehdys -tekniikalla toimivia työvälineitä aivotoiminnan tehokkaaseen itsesäätelyyn. Mikäli interventio on lyhytkestoinen, saattaisi valmiiksi annetut mentaaliset strategiat lisätä aivotoiminnan itsesäätelyn oppimisnopeutta.

Harjoittelupäivien sisällä eli trialien aikana ilmeni alfa-rytmin esiintymisessä lisääntymistä, mutta koe- ja kontrolliryhmän kehityskulkuja tarkastellessa ei havaittu eroa ryhmien välillä (kuvio 2C). Vaikka koe- ja kontrolliryhmä eivät eronneet merkitsevästi toisistaan, painottui kuvioita tarkastellessa (kuviot 2C ja 2D) alfa-rytmin arvojen kehityssuunta olemaan hypoteesin mukainen trialien aikana. Koska alfa-rytmin muutos koeryhmässä ei kuitenkaan ollut kuitenkaan kontrolliryhmästä merkitsevästi eroavaa, on mahdollista, että alfa-modulaation alhainen vaikutus johtuu ainakin osittain joko harjoittelukertojen riittämättömästä kestosta tai alhaisesta lukumäärästä. Mikäli harjoittelu olisi kestänyt pidempään kuin 10 minuuttia, voi pohtia, olisiko alfa-rytmin esiintymisen kehityslinja jatkunut samansuuntaisesti ja ajan kuluessa erotellut tehokkaammin koe- ja kontrolliryhmää toisistaan. Koska yksilöiden oppimisnopeudessa voi olla erilaisten taustatekijöiden johdosta vaihtelevuutta neurofeedback-harjoittelussa (Witte ym., 2013), voi olla mahdollista, että lyhytkestoisissa interventioissa vain osa ehtii oppia itsesäätelyä aivotoimintaansa.

Neurofeedback ei ollut trialitasolla erottelevaa koe- ja kontrolliryhmän välillä, mitä voinee selittää riittämättömän neurofeedback-harjoittelun lisäksi sillä, että kontrolliryhmässä saattaa tapahtua epätarkoituksenmukaista alfa-rytmin lisääntymistä. Mikäli kontrolliryhmässä alfa-rytmin esiintyminen olisi kasvanut SMR-neurofeedbackin seurauksena, ei sensorimotorisen rytmin modulaatio olisi ollut taajuuskaistasta riippumatonta. Mikäli SMR-modulaatio on lisännyt alfa-rytmin esiintyvyyttä, on tähän voinut vaikuttaa se, että molemmat oskillaatiot, alfa-rytmi ja SMR, ovat yhdistetty psykologis-motorisiin lepotiloihin (Adrian & Matthews, 1934; Serman & Friar, 1972; Wyrwicka & Serman, 1968). Lisäksi alfa- ja SMR-modulaatiot tapahtuivat neuroanatomisesti vierekkäisillä kortikaalisilla alueilla (parietaalilohko, sensorimotorinen korteksi) ja oskillaatiot sijoittuvat taajuusjakauman vierekkäisille kaistoille (8–12 Hz, 12–15 Hz). SMR-modulaatio ei kuitenkaan tutkimuksessa toteutunut suunnitelman mukaisesti, mistä syystä voisi olettaa, ettei modulaatio ole merkittävästi vaikuttanut kontrolliryhmässä alfa-rytmin esiintymiseen. Alfa-rytmin tahattomat muutokset kontrolliryhmässä voidaan myös yhdistää sellaisiin intervention koeasetelmaan mahdollisesti sisältyviin vaikutuksiin, jotka eivät varsinaisesti liity aivotoiminnan

itsesääteilyyn. Esimerkiksi 10 minuuttia kestänyt tutkittavan paikallaan istuminen neurofeedback-harjoittelun aikana on saattanut itsessään lisätä alfa-rytmin esiintymistä.

Taajuuskaistojen riippumattomuutta on korostettu olennaisena parametrina neurofeedback-harjoittelussa (Zoefel ym., 2011). Useampaa taajuuskaistaa koskevat epätarkoituksenmukaiset muutokset neurofeedback-harjoittelussa saattavat heikentää modulaation vaikutuksia tutkimuskohteena olevaan oskillaatioon tai käyttäytymiseen. Kun tehdään arviota siitä, missä määrin tietokoneavusteisella aivotoiminnan itsesääteilyllä voidaan lähtökohtaisesti, esimerkiksi edes väliaikaisesti, muuttaa neuraalisia tapahtumia, voi tutkimuksissa trialitason tarkastelua pitää painotettavana analyysin tasona. Mikäli trialien aikana havaitaan oskillaatio-spesifejä neuraalisia muutoksia aivotoiminnan itsesääteilyn seurauksena, voidaan muutoksista pyrkiä tekemään pitkäkestoisia ja pysyväluontoisia harjoittelupäivien tasolla. Tässä tutkimuksessa trialien tasolla tapahtunut alfa-modulaatio ei ollut riittävän spesifiä erottelemaan koe- ja kontrolliryhmää toisistaan.

Baseline-mittauksia 1 ja 2 tarkastellessa havaittiin alfa-rytmin esiintymisessä kokonaisuudessaan lisääntymistä. Kun tarkasteltiin koe- ja kontrolliryhmän välillä alfa-rytmin esiintymistä, ei tutkimustuloksissa kuitenkaan havaittu ryhmien välillä eroa (kuvio 2B). Baseline-mittausten tutkimustuloksiin voi arvioida liittyvän samankaltaisia selitysmalleja kuin trialeita koskeviin tuloksiin. Vaikka alfa-rytmin on esitetty olevan moduloitavimpia aivoaaltoja (Rogala ym., 2016), voi olla mahdollista, ettei liian lyhytaikainen neurofeedback-harjoittelu riitä erottelemaan koeryhmän moduloitua alfa-rytmiä kontrolliryhmän ei-moduloidun alfa-rytmin tahattomasta vaihtelusta. Lisäksi on huomioitava, että tutkimuksessa baseline-mittausten tehtävänantona oli lepotilassa oleminen, joka voidaan itsessään tulkita alfa-rytmin esiintymistä lisääväksi psykologiseksi tilaksi (Adrian & Matthews, 1934). Tutkittava on saattanut lepotilassa pyrkiä hyödyntämään esimerkiksi valikoivaa tarkkaavuutta epäolennaisten ärsykkeiden poissulkemiseksi, mikä voidaan niin ikään tulkita alfa-rytmin esiintymistä lisääväksi kognitiiviseksi top-down-prosessiksi (Cooper ym., 2003; Klimesch ym., 2007; Klimesch, 2012). Näin ollen alfa-rytmin esiintyminen baseline-mittauksissa ei välttämättä heijastele ainoastaan trialeissa tapahtuneen alfa-modulaation vaikutuksia, vaan baseline-mittauksissa tapahtunutta tehtävänannon mukaista suoriutumista.

4.2. Tunnetilat ja mentaaliset strategiat

Neurofeedback-harjoittelun vaikutuksia tunnetiloihin tarkasteltiin PANAS-kyselylomakkeella, joka mittaa tunnetilojen positiivista ja negatiivista valenssia sekä niiden intensiteettiä. Oletimme aikaisemman tutkimuksen perusteella (Allen ym., 2001), että neurofeedback-harjoittelu joko lisää positiivisten tunnetilojen intensiteettiä tai vähentää negatiivisten tunnetilojen intensiteettiä. Tämän tutkimuksen mukaan neurofeedback-harjoittelulla oli lievä positiivisten tunnetilojen intensiteettiä heikentävä vaikutus, kun taas negatiivisten tunnetilojen osalta ei tapahtunut muutosta (kuvio 3). Koska alfa-modulaatio ei tuottanut intervention aikana koe- ja kontrolliryhmää erottelevia neuraalisia muutoksia, ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu alfa-modulaation vaikutuksia tunnetiloihin. Positiivisten tunnetilojen intensiteetin vähenemistä voinee kuitenkin selittää esimerkiksi siten, että osa tutkittavista on saattanut kokea aivotoiminnan itsesäätelyn haastavana. Neurofeedback-harjoittelu vaatii tutkittavalta aktiivista osallistumista sekä oman toiminnan jatkuvaa arvioimista kuvaruudulla näkyvän palautteen ja pistemäärän avulla. Näin ollen aivotoiminnan itsesäätelyn haastavuus ja oman suoriutumisen arviointi ovat voineet ilmetä positiivisten tunnetilojen heikentymisenä neurofeedback-harjoittelun jälkeisissä vastauksissa.

Tutkimuksen laadullisten havaintojen osalta mentaalisten strategioiden kokemukset päädyttiin luokittelemaan kuuteen kategoriaan sen perusteella, mitä temaattisia yhtäläisyyksiä koehenkilöiden vapaasti kirjoitettujen vastausten joukosta nousi esille. Oletimme aikaisempiin tutkimuksiin perustuen (Nan ym., 2012), että positiivisuuteen liittyvät mentaaliset strategiat koetaan neurofeedback-harjoittelussa toimivana. Tutkittavien vastauksissa painottuivat seuraavat teemat: 1. tietoisuustaidot, 2. rentoutuminen, 3. positiivinen ajattelu, 4. jännitys, 5. hermoilu ja kontrolloiva ajattelu sekä 6. kokemukset aivotoiminnan itsesäätelyn toimimattomuudesta strategiasta riippumatta. Neljä ensimmäistä luokkaa sisälsivät mainintoja strategioista, jotka mainittiin tyypillisesti harjoittelua edistävinä (avaruusalusta nostavina), mutta toisinaan myös harjoittelua haittaavina (avaruusalusta laskevina). Viides luokka, joka käsitti kontrolloivaa ajattelua kuvaavat vastaukset, koostui ainoastaan harjoittelua heikentävistä kokemuksista (avaruusaluksen laskeminen). Kuudes vastausluokka käsitti vastaukset, jotka kuvailivat tutkittavien kokemuksia siitä, että he eivät kokeneet pystyvänsä vaikuttamaan pelissä suoriutumiseen millään tavalla. Toisin sanoen kuudes vastausluokka piti sisällään vastauksia, joiden mukaan tutkittavat eivät pystyneet vaikuttamaan pelissä avaruusaluksen nousemiseen tai laskemiseen. Eniten pelaamista edistäviksi strategioiksi

arvioitiin tietoisuustaidot (12 koehenkilöä), positiivinen ajattelu (7 koehenkilöä) ja rentoutuminen (7 koehenkilöä). Tietoisuustaitojen ryhmään luokitellut vastaukset sisälsivät kuvauksia mielikuva- ja hengitysharjoitusten käytöstä sekä omien ajatusten ja tunteiden havainnoinnista. Tietoisuustaitojen käyttäminen itsesääteilyä vaativissa tehtävissä voidaan mieltää tyypilliseksi strategiaksi myös muissa itsesääteilyyn liittyvissä interventioissa. Tällaisia ovat esimerkiksi MBI-tekniikat (*Mindfulness-Based Interventions*), joita on tutkittu muun muassa kivun ja stressin hoidossa (Kortelainen, Saari, & Väänänen, 2014). Lisäksi tietoisuustaitoihin voidaan liittää tarkkaavuuden säätely, joka on aiemmissa tutkimuksissa yhdistetty alfa-rytmin esiintymiseen (Cooper ym., 2003; Klimesch ym., 2007; Klimesch, 2012). Tietoisuustaitojen kokeminen toimivimmaksi strategiaksi voi liittyä myös siihen, että tutkimuksen otos koostui psykologian laitoksen opiskelijoista. Voisi arvioida, että tällaiset henkilöt saattavat olla harjaantuneita muun muassa itsereflektiossa, metakognitiivisessa ajattelussa tai sellaisissa kielenkäytön semanttisissa ja pragmaattisissa taidoissa, jotka tukevat tietoisuustaitoihin liittyvää mielikuvaharjoittelua tai tietoisuustaitojen sanallistamista. Toiseksi toimivimmaksi strategiaksi mainittiin tämän tutkimuksen hypoteesin mukainen positiivinen ajattelu. Myös aikaisemman tutkimuksen mukaan positiivinen ajattelu mainittiin toimivaksi mentaaliseksi strategiaksi (Nan ym., 2012). Myös rentoutuminen mainittiin toimivaksi mentaaliseksi strategiaksi, ja se on liitetty alfa-rytmin osalta aikaisemmissa tutkimuksissa muun muassa lepotilaan (Adrian & Matthews, 1934). On silti huomioitava, että tässä tutkimuksessa tietoisuustaidot, positiivinen ajattelu ja rentoutuminen koettiin toimiviksi strategioiksi siitä huolimatta, että tulosten perusteella alfa-rytmin esiintyminen ei poikennut ryhmien välillä. Näin ollen vastaukset mentaalisisista strategioista eivät ole liitettävissä alfa-modulaatiosta seuranneeseen alfa-rytmin lisääntymiseen. Positiivisen ajattelun ohella esimerkiksi tietoisuustaitoja voinee kuitenkin pitää jatkotutkimuksessa huomioitavana mentaalisenä strategiana, kun arvioidaan toimivia tekniikoita aivotoinnin itsesääteilyssä.

Laadullisia havaintoja arvioidessa koehenkilöt jaettiin lopuksi viitteellisesti kolmeen ryhmään sen perusteella, miten he kuvailivat kokonaisuudessaan omia vaikutusmahdollisuuksiaan avaruusaluksen ohjaamisen suhteen. Kuvailujen mukaan 5 koehenkilöä koki pystyvänsä vaikuttamaan avaruusaluksen ohjaamiseen, kun taas 7 koehenkilöä kuvasi kokemuksiaan kaksijakoisesti: koehenkilöiden mukaan strategiat avaruusaluksen ohjaamiseksi olivat ajoittain toimivia ja toisinaan toimimattomia. Yksi koehenkilö mainitsi, ettei kokenut millään tavalla pystyvänsä vaikuttamaan avaruusaluksen ohjaamiseen. Laadulliset havainnot antavat osviittaa siitä, että neurofeedback-harjoittelun käyttäjäkokemukset sisältävät vaihtelua sen suhteen, kuinka harjoittelu koetaan. Tämän

tutkimuksen perusteella ei neurofeedback-harjoittelua voi pitää tutkittavien näkökulmasta yksiselitteisen helppona tai vaikeana.

Tutkimustuloksista koskien tunnetiloja ja mentaalisia strategioita voi tehdä suuntaantavia arvioita sen suhteen, kuinka PANAS-vastaukset ja laadulliset havainnot käytetyistä mentaalisista strategioista saattavat olla yhteydessä toisiinsa. Kun arvioidaan tutkittavien kokemuksia mentaalisten strategioiden käyttämisestä, voi kokemusten arvioinnissa hyödyntää lähtökohtana positiivisiin tunnetiloihin painottuneita PANAS-vastauksia. Vertailtaessa neurofeedback-harjoittelussa ennen-jälkeen PANAS-vastausten pistemääriä olivat positiivisten tunnetilojen keskiarvot negatiivisten tunnetilojen keskiarvoja korkeammat (kuvio 3). Koska tutkittavien affektiivisuus painottui positiivisiin tunnetiloihin, voi painottumisen arvioida ilmenevän suhteellisen suotuisina vastauksina koskien kokemuksia mentaalisista strategioista. Tämän tutkimuksen laadullisten havaintojen mukaan tutkittavien kokemukset strategioista olivat vaihtelevia. Mikäli tunnetilojen vastaukset olisivat olleet negatiivisiin tiloihin painottuneita, voisi tutkittavien kokemusten arvioida olleen vähintään yhtä vaihtelevia tai vielä vinoutuneempia kokemuksiin strategioiden toimimattomuudesta. Vaikka mentaalisia strategioita ei koettu tässä tutkimuksessa yksiselitteisen toimiviksi, eivät laadulliset havainnot kuitenkaan painottuneet opitun avuttomuuden tai demoralisaatioon kaltaisiin ilmiöihin (Enriquez-Geppert ym., 2017). Kaiken kaikkiaan voinee todeta, että neurofeedback-tutkimuksissa koehenkilöiden käyttäjäkokemusten arvioinnin voi nähdä olennaisena tarkastelun kohteena, koska käyttäjäkokemukset saattavat vaikuttaa intervention onnistumiseen. Neurofeedback-harjoittelussa tutkittavat muodostavat käytettyjen mentaalisten strategioiden ja pelin palautteen välille syy-seuraussuhteita. Näihin kokemuksiin kausaalisuudesta voidaan arvioida vaikuttavan tunnetilat sekä mahdollisesti muut psykologiset tekijät, kuten tutkittavan minäpystyvyys. Mikäli tutkittava ei koe neurofeedback-harjoittelussa syy-seuraussuhteita, kokemuksia peliin vaikuttamisesta, saattaa tämä johtaa intervention aikana innostuksen loppahtamiseen.

4.3. Tutkimuksen rajoitukset

Tämän tutkimuksen aivotoiminnan modulaation merkittävänä rajoituksena voidaan nähdä suppeat otoskoot niin alfa-rytmin ryhmässä (n = 5) kuin SMR-ryhmässä (n = 8). Koska kyseisen opinnäytetyön kirjoittajat (2) osallistuivat SMR-ryhmään koehenkilöinä, on tämä

saattanut myös vaikuttaa tutkimustuloksiin. Suppean otoskoon lisäksi tutkimuksen koehenkilöt valikoituivat yliopiston psykologian laitoksen opiskelijoista (iän vaihteluväli: 22–28 vuotta) edustamatta laajaa perusjoukkoa, minkä takia tutkimuksen päätelmät eivät ole yleistettävissä. Edustavan otoksen sijasta voidaan kerätty aineisto tulkita näytteeksi. Tämän tutkimuksen NF-harjoittelun rajoitus on lisäksi harjoittelukertojen alhainen lukumäärä sekä mahdollisesti harjoittelukertojen lyhytkestoisuus. Harjoittelut toteutettiin eri päivinä eri aikaan (*time-of-day effect*), eikä harjoittelukertojen välisiä aikoja kontrolloitu tutkittavien toiminnan osalta, mikä saattoi osaltaan vaikuttaa esimerkiksi tutkittavien vireyteen tai palautumiseen. Aineistonkeruusta saatu SMR-ryhmän aivokuvantamisdata oli myös epäjohdonmukaista erinäisistä satunnaismuuttujista johtuen. Epäjohdonmukaisuutta aiheutti muun muassa aivokuvantamislaitteen heikkolaatuinen ja vaihteleva Bluetooth-yhteys sekä mahdollisesti vialliset elektrodit. Mittauskertoja jouduttiin perumaan ja mittausvälineistöä korjaamaan, mikä teki datasta puutteellisen ja epäsuhtaisen. Tilastollisten analyysien osalta kaikkien muuttujien arvot eivät myöskään olleet normaalisti jakautuneita. Opinnäytetyön tutkimuksen suunnittelussa SMR-ryhmä sijoitettiin toimimaan kontrolliryhmänä, mutta on huomioitava, että kontrolliryhmän tarkoituksenmukaisuutta rajoittaa sen muutamat eroavuudet alfa-rytmien koeryhmän kanssa, kuten erilaatuiset mittauselektrodit (SMR: kuivaelektrodit, alfa: märkäelektrodit) ja käytettyjen palaute-elektrodien lukumäärä (SMR: 2, alfa: 1). Koska ryhmät erosivat myös muilla tavoilla kuin manipuloitavan oskillaation suhteen, kärsi tutkimuksessa kontrolli- ja koeryhmän arvojen vertailun luotettavuus. Koska korkea reliabiliteetti on korkean validiteetin tutkimuksen ehto, voi yleisesti ottaen arvioida, että tutkimuksen aivokuvantamisdatan suhteellisen heikko reliabiliteetti heikensi myös kokonaisuudessaan tutkimuksen validiteettia. Näin ollen tulokset eivät monelta osin kuvaa luotettavasti sitä, mitä opinnäytetyön oli tarkoitus tutkia.

PANAS-vastausten ja mentaalisten strategioiden osalta tutkimuksen rajoitteena voidaan pitää muun muassa Hawthorne-efektiä, jolla viitataan tutkittavan käyttäytymisen muuttumiseen sosiaalisten tekijöiden takia. Tutkittavat olivat tietoisia tarkkailun alaisena olemisestaan, mikä on saattanut painottaa vastauksia sosiaalisesti suotaviin ja positiivisiin itsearvioihin. Lisäksi PANAS-lomake ei pitänyt sisällään tunnetilojen monipuolista arviointia, vaan se rajoittui tunnetilojen valenssin ja intensiteetin tarkasteluun positiivisten ja negatiivisten tilojen kautta. Tutkittavat ovat saattaneet ilmaista mentaalisten strategioiden kokemuksia niin ikään sosiaalisesti suotavasti tai mahdollisesti painottaa kokemuksia syy-seuraussuhteiden havaitsemisesta strategioiden ja pelin palautteen välillä. Strategioiden luokittelun heikkoutena voidaan pitää vapaasti muotoiltuja, koehenkilöiden omista kielellisistä valmiuksista ja

kirjoitustyyleistä riippuvaisia vastauksia, joissa mahdollisesti osa koehenkilöistä on painottanut toimivia strategioita jo lähinnä siksi, että avoin kysymys strategioiden toimivuudesta on saattanut tutkittavilla assosioitua lähinnä toimiviin strategioihin. Kokemukset strategioista saattavat lisäksi heijastella rajattua alkioiden joukkoa eli tämän tutkimuksen tapauksessa yliopiston psykologian opiskelijoita, eivätkä maininnat strategioista näin ollen välttämättä ole yleistettävissä laajempaan perusjoukkoon. Mentaalisten strategioiden tulkitseminen perustui tässä tutkimuksessa aineistolähtöiselle analyysille, mistä syystä voidaan painottaa, ettei tutkittavien kokemuksista voi tämän opinnäytetyön pohjalta tehdä perusteellisia laadullisen tutkimuksen johtopäätöksiä.

4.4. Tutkimuksen johtopäätökset

Tämän tutkimuksen neurofeedback-interventio, joka piti sisällään 10 minuuttia kestävästä aivotoiminnan itsesäätelyn harjoituksen viitenä peräkkäisenä päivänä, ei riittänyt tuottamaan koeryhmälle spesifiä neuraalista muutosta, kun alfa-rytmiä tarkasteltiin harjoittelupäivien, trialien ja baseline-mittausten tasoilla. Vaikka trialien ja baseline-mittausten aikana alfa-rytmin esiintyminen lisääntyi hypoteesin suunnan mukaisesti, ei muutos ollut erilaista vertailtaessa koeryhmää ja kontrolliryhmää. Tunnetiloja kuvaavien vastausten osalta tutkimus antoi viitteitä siitä, että neurofeedback-menetelmän toiminnallinen suoriutuminen saattaa lievästi vähentää tutkittavien positiivisten tunnetilojen intensiteettiä. Tarkasteltaessa laadullisia havaintoja tietoisuustaidot, positiivinen ajattelu ja rentoutuminen koettiin mentaalista strategioista toimivimmiksi teemoiksi. Kun tarkasteltiin kokonaisuudessaan kokemuksia mentaalisten strategioiden toimivuudesta aivotoiminnan itsesäätelyssä, ei tutkittavien kokemusten mukaan avaruusaluksen ohjattavuus ollut yksiselitteisen hankalaa tai helppoa, vaan kokemukset strategioiden toimivuudesta vaihtelivat. Tämä tutkimus sisälsi sen tulosten tulkintaa merkittävästi rajoittavia tekijöitä, mistä syystä tulosten perusteella ei voi tehdä yleistettäviä johtopäätöksiä. Koska neurofeedback on toiminnallinen ja monitekijäinen menetelmä, korostuu neurofeedback-tutkimuksen toteuttamisessa erityisesti huolellinen intervention suunnittelu ja arviointi.

4.5. Neurofeedback-intervention rakentuminen

4.5.1. Suunnittelu ja arviointi

Neurofeedback-interventioiden toimivuutta on arvioitu yksityiskohtaisilla kuvauksilla siitä, kuinka neurofeedback-harjoittelussa erilaiset metodologiset valinnat vaikuttavat tutkimustuloksiin ja minkälaisia protokollia olisi suositeltava interventioissa hyödyntää parhaan mahdollisen vasteen saavuttamiseksi (Enriquez-Geppert ym., 2017; Rogala ym., 2016; Zoefel ym., 2011). Keskeisiksi metodologisiksi aihepiireiksi on sisällytetty esimerkiksi neurofeedback-palautteen antamiseen liittyvä signaali- ja dataprosessoinnin optimointi, harjoittelukertojen pituuden ja lukumäärän asettaminen sekä moduloitavan oskillaation ja aivoalueen validointi. Vaikka BCI-perustaiset metodologiset valinnat ovat neurofeedback-menetelmän keskiössä, tarkastellaan seuraavaksi neurofeedback-intervention teoreettisen rakentumisen kokonaiskuvaa pyrkien huomioimaan lisäksi muita tekijöitä, jotka saattavat mahdollisesti vaikuttaa intervention onnistumiseen.

Tutkittavien erilaisten ominaisuuksien vaikutuksesta neurofeedback-harjoitteluun on saatu suuntaa-antavia tutkimustuloksia. Kun tarkastellaan yksilöllisiä eroja neurofeedback-tutkimuksissa, on saatu viitteitä siitä, että muun muassa tutkittavien visumotoriset taidot, motivaatio ja kontrolliodotukset saattavat vaikuttaa modulaatioon (Hammer ym., 2012; Kleih ym., 2010; Nijboer ym., 2010; Witte ym., 2013). Lisäksi on säännönmukaisesti raportoitu niin kutsutusta non-responder -ilmiöstä, joka viittaa siihen, että toistuvasti osalla tutkittavista ei aivotoimintaa olla onnistuttu tavoitteen mukaisesti neurofeedback-harjoittelulla moduloimaan (Rogala ym., 2016). Liittyen tutkittavien aivoperäisiin eroihin on arvioitu, että otsalohkon keskilinjan theta-rytmin neuraalinen itsesäätely olisi ollut riippuvaista pihtipoimun keskialueen (*Midcingulate cortex*) morfologiasta (Enriquez-Geppert ym., 2013). Voisi arvioida, että esimerkiksi vaikeat neurologiset tai psykiatriset häiriöt saattavat vaikuttaa harjoittelun tuloksellisuuteen häiriöiden poikkeavuuksien, kuten aivojen plastisten ominaisuuksien, kognition, tunnesäätelyn tai motivaation, välityksellä. On muun muassa esitetty, että klinisiä tutkimuksia tulisi yksilöllistää siten, että tutkittavien vaihtelevat EEG-perustaiset endofenotyypit, välimuotoiset ilmiöt, huomioidaan tutkimusten suunnittelussa (Arns, 2012). Tähän mennessä tutkimuskirjallisuudessa on arvioitu, että neurofeedback-harjoittelun oppimisnopeus on mahdollisesti riippuvaista aivojen kypsymisestä, iästä ja

stressihaavoittuvuudesta (Witte ym., 2013). Kognitiota koskevissa tutkimuksissa on myös yleisesti esitetty, että esimerkiksi ikääntyminen vaikuttaa heikentävästi joustavaan älykkyyteen ja induktiiviseen päättelyyn (Segal, Qualls, & Smyer, 2018), minkä takia on syytä arvioida, ilmeneekö vastaavankaltaiset ikääntymiseen liittyvät kognitiiviset heikentymiset jonkinasteisesti myös aivotoiminnan itsesäätelyssä. On kuitenkin painotettava, ettei tähän mennessä ole yksiselitteistä tietoa siitä, mikä on spesifien kognitiivisten muuttujien merkitys neurofeedback-harjoittelussa (Strehl, 2014). On toistaiseksi epäselvää, liittyykö onnistunut aivotoiminnan itsesäätely pikemminkin monipuoliseen taidon hankkimiseen, joka pitää sisällään varsinaisen operantin ehdollistumisen lisäksi kehoaistimista (*interoception*), klassista ehdollistumista sekä ulkoista tai sisäistä motivaatiota (Strehl, 2014). Kun arvioidaan erilaisten esivaatimusten merkitystä aivotoiminnan itsesäätelyssä, on myös perusteltua pohtia, missä määrin esimerkiksi vanhan ja uuden maailman apinoiden, kuten reesusmakakien (Schafer & Moore, 2011) ja marmosettien (Philippens & Vanwersch, 2010), onnistunut aivotoiminnan itsesäätely on rinnastettavissa ihmislajiin, jonka neokorteksi on volyymiltaan huomattavasti edellisiä kädellislajeja suurempi ja poimuttuneempi (Purves & Platt, 2018b). Edellisten tekijöiden lisäksi yksilön aikaisemmat elämäkokemukset ja hankitut taidot ovat tekijöitä, jotka voi olla syytä huomioida neurofeedback-harjoittelun toteuttamisessa. Esimerkiksi kokemustausta meditaation harjoittamisesta voi olla tekijä, joka saattaa edesauttaa aivotoiminnan itsesäätelyä.

Edellä kuvattujen tutkimustulosten perusteella voi esittää, että yksilöiden erilaiset neurobiologiset ja psykologiset resurssit, interventioresurssit, muodostavat mahdollisesti vaihtelevia interventiovalmiuksia neurofeedback-harjoittelulle. Vaihtelevien NF-harjoittelijoiden interventioresurssien voidaan arvioida vaikuttavan sekä aivotoiminnan itsesäätelyyn että kokonaisuudessaan tutkittavan interventioon sitoutumiseen. Yksilö- ja kohorttitasolla vaihtelevien oppimispotentiaalien huomioimisen voi nähdä painotettavana osa-alueena NF-harjoittelussa etenkin siitä syystä, että BCI perustuu tutkittavan aktiiviselle osallistumiselle. Neurofeedback-menetelmän metodologiset tekijät on tarpeellista huomioida samanaikaisesti NF-harjoittelijan interventioresurssien yhteydessä. Metodologian ja tutkittavan erilaisten taipumusten yhtäaikaisessa huomioonottamisessa yhdistyy niin intervention tilannesidonnaisten tekijöiden kuin tutkittavan taipumusten vaikutusten arviointi (*states vs. traits*). Kuten yleisesti havaitaan yksilön ja ympäristön reaktiivisessa ja evokatiivisessa vuorovaikutuksessa, myös neurofeedback-interventioissa tutkittavat mahdollisesti reagoivat harjoitteluun yksilöllisesti interventioresursseistaan riippuen ja toisaalta BCI-menetelmä palaute on riippuvaista yksilön aivotoiminnan itsesäätelystä.

Interventioresurssien ja neurofeedback-metodologian vaikutussuhteen voidaan mieltää olevan kaksisuuntainen.

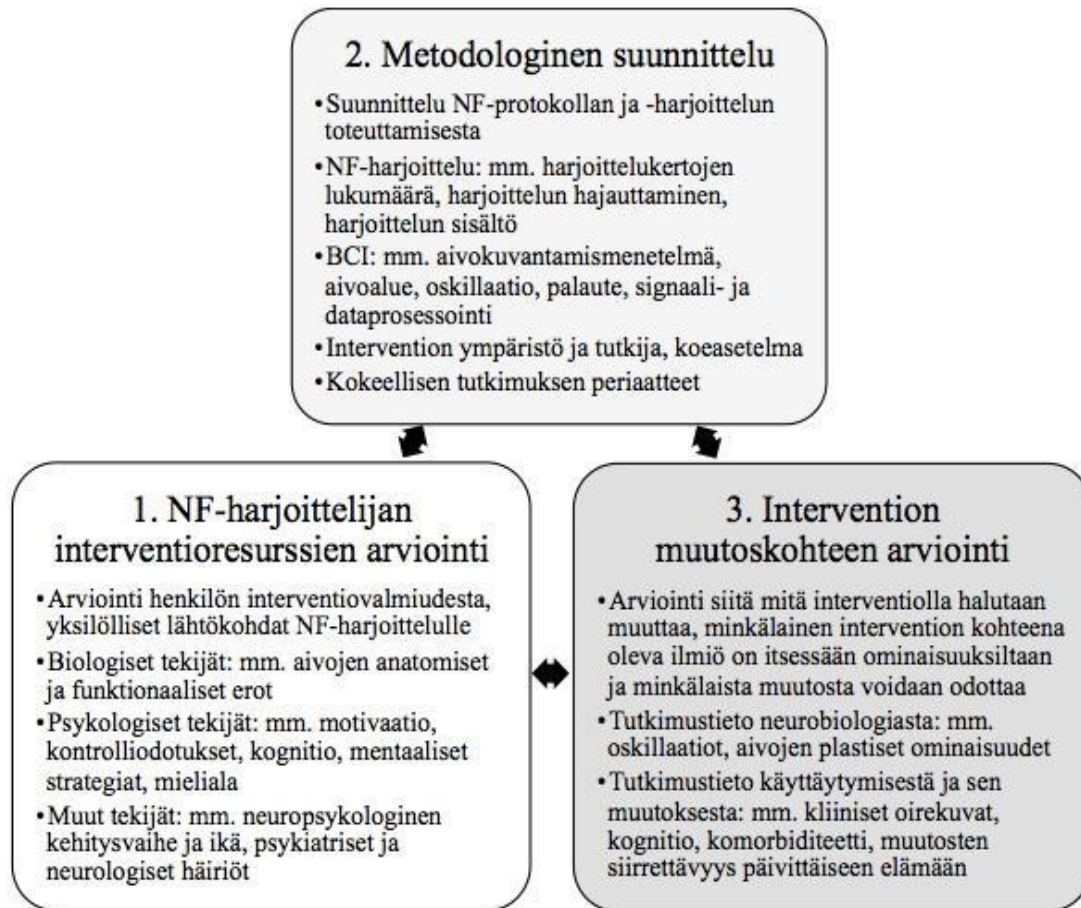
NF-harjoittelijan interventioresurssien huomioimisen lisäksi voidaan pyrkiä arvioimaan, mikä on neurofeedback-harjoittelulla tavoiteltu muutoskohde ja kuinka tutkittavan interventioresurssit ja neurofeedback-metodologia voidaan yhteensovittaa mahdollisimman optimaalisesti interventiossa tavoitellun muutoksen kanssa. NF-intervention modulaatiolla tavoitellaan joko neuraalisen ilmiön, kuten oskillaation tai herätevasteen, tai käyttäytymisen, kuten kliinisen oirekuvan tai kognition, muutosta. Intervention vaikuttavuuden näkökulmasta täytyy tässä tapauksessa huomioida, minkälainen muutoksen kohteena oleva ilmiö on itsessään ominaisuuksiltaan ja onko modulaatiolla instrumentaalista arvoa sen muuttamisessa. On esimerkiksi huomioitava, kuinka yksittäisen aivoaallon modulointi mahdollisesti vaikuttaa neurologisen häiriön spesifiin oireeseen, mikä on oireen merkitys häiriön kokonaiskuvan kannalta ja mitä tutkimustiedon perusteella tiedetään oirekuvan pysyvyydestä sekä sen muuttamisesta. Modulaatiivisten vaikutusten ulottaminen yksilön käyttäytymiseen, toimintakykyyn ja päivittäiseen elämään, on ilmeinen neurofeedback-intervention haaste (Rogala ym., 2016). On mahdollista, että NF-harjoittelussa aikaansaadut muutokset saattavat toisinaan rajoittua ainoastaan intervention ympäristöön. Vastaavanlaiseen ilmiöön Woodworth ja Thorndike (1901) viittaavat kontekstispesifisyyden käsitteellä.

Koska neurofeedback-harjoittelun tavoitteena on neuraalinen modulaatio – ja käyttäytymisen muuttaminen modulaation avulla – on interventiossa olennaista huomioida neurobiologinen tutkimustieto aivojen plastisista ominaisuuksista, kuten synaptisen tason kestoporostumisesta (LTP) ja kestoaiementumisesta (LTD) sekä systeemitason konsolidaatiosta. Metodologinen suunnittelu ja intervention muutoskohteen arviointi on keskenään yhteensovitettava siten, että harjoittelu palvelee niin intensiteetiltään kuin hajauttamiseltaan mahdollisimman optimaalisesti aivojen muovautuvuuden periaatteita ja tuottaa sellaisia neuraalisia muutoksia, jotka vaikuttavat suotuisasti intervention tavoitteeseen eli muutoskohteeseen. On esimerkiksi arvioitava, onko intervention muutoskohde, kuten psykiatrinen häiriö, neurobiologiselta luonteeltaan ensisijaisesti toiminnallinen vai rakenteellinen hermostollinen häiriö, ja kuinka realistista on sen muuttaminen suhteutettuna tutkimustietoon plastisista muutoksista. Esimerkiksi Kandel (2018) on todennut, että masennus ja bipolaarihäiriö ovat ensisijaisesti toiminnallisia neurobiologisia häiriöitä, kun taas skitsofrenia ja autisismikirjon häiriöt ovat neuroanatomisia häiriöitä liittyen vialliseen hermoratojen kehittymiseen. Häiriöiden toisistaan poikkeavat neuraaliset taustasyöt on tarpeellista huomioida, koska ne vaikuttavat siihen, onko aiheellista pyrkiä neuraalisesti

stimuloimaan esimerkiksi uusien okasten kasvua vai tehostamaan synaptista karsitumista. Jos intervention seurauksena tapahtuu tavoitteen mukaista muutosta tutkittavan käyttäytymisessä, on myös syytä arvioida, onko tilastollisesti merkitsevä muutos riittävän suurta ollakseen päivittäisen elämän kannalta merkityksellistä (p-arvo \neq efektikoko). Lisäksi on arvioitava, onko muutos pitkäkestoista tai pysyvää ja vaatiiko se ylläpitoa. Aivotoiminnan modulaatio pyrkii vaikuttamaan yksilön neuropsykologisiin toimintoihin, jolloin modulaation voi mieltää olevan yhteydessä edelleen yksilön interventioresursseihin. Vastaavasti tutkittavan yksilöllisen interventiovalmiuden perusteella voi tehdä lähtökohtaisen arvion siitä, kuinka hän pystyy muuttamaan käyttäytymistään riippumatta siitä, onko hoitomuoto farmakoterapia, psykoterapia tai neurofeedback. Toisin sanoen intervention lähtökohtaisena kysymyksenä on se, asettaako tutkittavan interventiovalmius jonkinlaisia reunaehtoja tavoiteltavalle muutokselle. Näin ollen tutkittavan interventiovalmiuksilla ja intervention muutoskohteella on niin ikään kaksisuuntainen yhteys.

Vaikka metodologisesti neurofeedback-interventio noudattaisi yksityiskohtaisesti suunniteltua protokollaa, arvioimme olevan mahdollista, että harjoittelun tuloksellisuutta voi heikentää ainakin osittain se, ettei metodologinen suunnittelu kytkeydy optimaalisella tavalla NF-harjoittelijan interventioresurssien ja intervention muutoskohteen arviointeihin. Harjoittelijaan liitettävien muuttujien merkityksestä aivotoiminnan itsesäätelyn kannalta ei ole tähän mennessä kattavaa tutkimustietoa (Strehl, 2014), mutta on oletettavaa, että neurofeedback-harjoittelussa on populaatioissa jonkinasteista variaatiota, joka ilmenee vähintään kohtalaisesti vaihtelevina yksilö- tai kohorttitason lähtökohtina neurofeedback-interventiolle. Näin ollen varsinaisen neurofeedback-metodologian (“BCI-systeemin”) lisäksi on intervention suunnittelussa otettava huomioon tutkittavan interventioresurssit (“mentaalinen systeemi”), joka koostuu erilaisista neurobiologisista ja psykologisista tekijöistä. Interventioresurssien systeemin erilaiset tekijät ovat vaikutussuhteessa toisiinsa. Esimerkiksi tarkkaavuus, työmuisti ja toiminnanohjaus ovat kognitiivisia komponentteja, jotka vaikuttavat erottamattomasti toistensa toimintoihin. Erityisesti tarkkaavuuden ja toiminnanohjauksen voi nähdä neurofeedback-harjoittelussa olennaisina kognitiivisina komponentteina, koska onnistuneen aivotoiminnan itsesäätelyn ehtona voidaan arvioida olevan muun muassa tutkittavan riittävän taitava tarkkaavuuden vuorotteleva suuntaaminen tietokoneen palautteeseen ja toisaalta henkilön omiin mielensisäisiin strategioihin. Yksilön vaikeus joustavaan tarkkaavuuden siirtämiseen (*attentional shift*) saattaa hankaloittaa aivotoiminnan itsesäätelyn onnistumista. Myös muut psykologiset tekijät vaikuttavat erilaisilla keskinäisillä vaikutussuhteillaan tutkittavan suoriutumiseen. Esimerkiksi korkea motivaatio

saattaa toimia kompensatorisena tekijänä harjoittelussa, kun taas heikko motivaatio saattaa peittää alleen tärkeiden kognitiivisten resurssien hyödyntämisen. Neurofeedbackin kolmantena teoreettisena osa-alueena on syytä huomioida intervention muutoskohteena oleva ilmiö, jonka voi nähdä niin ikään toiminnallisena systeeminä pitäen sisällään esimerkiksi toisiinsa vaikuttavia erilaisia emotionaalisia ja kognitiivisia komponentteja, klinisiä oireita, spesifejä käyttäytymisen tapoja sekä oirekuvaan mahdollisesti yhdistyviä muita häiriötä (komorbiditeetti). Koska erilaiset ilmiöt, kuten motivaatio ja tunnetilat, voivat luoda toisiinsa keskinäisiä vaikutussuhteita, saattaa toisen ilmiön muuttaminen vaikuttaa myös toiseen ilmiöön. Ilmiösuhteet, eri ilmiöiden väliset keskinäiset vuorovaikutussuhteet, vaikuttavat neurofeedback-interventiossa muutostavoitteen saavuttamiseen ja sen ilmenemiseen. Kuviossa 4 esitämme skemaattisen mallin, jonka avulla neurofeedback-intervention taustateoreettista rakentumista voi kokonaisuudessaan tarkastella edellä kuvattujen kolmen systeemin optimaalisen yhteensovittamisen näkökulmasta. NF-intervention voidaan nähdä rakentuvan kolmelle avoimelle systeemille, joiden toimintaan vaikuttaa sekä systeemien sisäiset tekijät että systeemien väliset ulkoiset tekijät eli viitekehyksen muut systeemit.



KUVIO 4. Neurofeedback-intervention teoreettisen rakentumisen systeeminen viitekehys.

Esimerkkinä neurofeedback-intervention rakenteen suunnittelusta ja arvioinnista voidaan pitää mallin systeemien temporaalista yhteensovittamista. Ajallisen ulottuvuuden huomioimisella voidaan viitata eri ilmiöiden aikaskaalojen optimaaliseen yhteensovittamiseen sekä sen tarkasteluun, mikä on itsessään tietyn ilmiön suhde aikaan. Interventioressurssien systeemi pitää sisällään yksilön kehitysvaiheet ja ikääntymisen, jotka saattavat vaikuttaa intervention tavoitteen saavuttamiseen. On esimerkiksi tarpeellista arvioida, onko neurofeedback-intervention ajoittamisella erilainen merkitys riippuen yksilön kehitysvaiheesta. Sen lisäksi, että ihminen muuttuu ajassa, yhdistyy ihmisen biopsykologiseen ikääntymiseen toisinaan muun muassa neurodegeneratiivisia sairauksia, joilla on omat tunnusomaiset ajassa etenevät patogeneesinsä. Koska erilaiset NF-harjoittelijan häiriöiden tai sairauksien tilat muuttuvat niiden kulun ja etenemisen myötä, saattaa intervention hyöty, aivotoiminnan itsesäätelyn tehokkuus, vaihdella riippuen sen ajoittamisesta. Interventioressurssien systeemin ajalliset ominaisuudet tulee sovittaa BCI-perustaiseen metodologiseen ajalliseen suunnitteluun eli

intervention pituuteen, harjoittelukertojen lukumäärään, harjoittelun hajauttamiseen sekä yksittäisten harjoittelukertojen keston. Koska on mahdollista, että eri henkilöt omaavat toisistaan poikkeavia oppimisnopeuksia (Witte ym., 2013) intervention tavoitteeseen pääsemisessä, on yksilöille ja kohorteille ominaiset lähtökohdat yhteensovitettava metodologisen suunnittelun lisäksi varsinaisen interventio muutoskohteen kanssa. Mikäli tavoitteena on oskillaation esiintymisen muuttaminen, on tutkimustieto synaptisen ja systeemisen konsolidaation ajallisesta kehitymisestä huomioitava sekä mukautettava NF-harjoittelijan interventioresursseihin ja NF-metodologiaan, jotta asteittainen oppiminen ja neuraalinen uudelleenorganisoituminen toteutuvat mahdollisimman optimaalisesti. Intervention tehokkuus saattaa jäädä vajavaiseksi, mikäli neuraalisten tapahtumien (millisekunnit, sekunnit) modulaation sekä oppimisen plastisiteetin ja muistijäljen konsolidaation (minuutit, tunnit) aikaskaalat eivät yhteensovitu NF-harjoittelun trialien (minuutit) ja harjoittelukertojen keston (tyypillisesti noin 10–30 minuuttia) sekä hajauttamisen (tunnit, vuorokaudet) kanssa.

4.5.2. Keskeiset haasteet

Yksinkertaistetusti neurofeedbackin vaikutusmekanismin voisi mieltää olevan psykoterapian neuropsykologinen peilikuva: siinä missä psykoterapian behavioraalislähtöiset muutokset pyritään tarkoituksenmukaisella tavalla ulottamaan myös neuraaliselle tasolle, on neuroterapian eli neurofeedbackin tavoite muuttaa aivotoimintaa siten, että vaikutukset ulottuvat neuraaliselta tasolta käyttäytymisen tasolle. Tähän mennessä neurofeedbackin käytännön sovellusarvo, behavioraalisen muutoksen aikaansaaminen, on jäänyt tutkimuskentällä kuitenkin vaillinaiseksi (Rogala ym., 2016). Neurofeedback-menetelmän on lisäksi arvioitu olevan oletettua monimutkaisempi oppimistapahtuma (Strehl, 2014), joka ei pelkisty suoraviivaiselle behavioraalisten muutosten aikaansaaniselle aivotoiminnan itsesäätelyn operantilla ehdollistamisella. Menetelmä sisältää haasteita, jotka vaikuttavat olennaisesti neurofeedback-intervention tuloksellisuuteen.

Vaikka neurofeedbackin päämääränä on vaikuttaa käyttäytymisen taustalla olevaan neurobiologiaan, saattaa menetelmän välillinen vaikutustapa lisätä sen epätasaisuutta ja vaikeuttaa interventioiden onnistumista. Intervention tavoitteen saavuttaminen, eli pääsääntöisesti käyttäytymisen muuttaminen, perustuu yleensä oletukselle, että mentaalilla strategioilla voidaan riittävän merkittävästi vaikuttaa oskillaatoriseen toimintaan, joka edelleen

vaikuttaa riittävän merkittävästi käyttäytymiseen. BCI-perustaisen neurofeedback-menetelmän osalta on kuitenkin tarpeellista arvioida, onko esimerkiksi oskillaatio lähtökohtaisesti neuraalisena ilmiönä sellainen, että se on ominaisuuksiltaan riittävän harjoiteltava aivotoiminnan itsesäätelyn avulla (Rogala ym., 2016; Zoefel ym., 2011). Lisäksi aivotoiminnan itsesäätelyyn perustuva neuraalinen modulaatio tapahtuu aivokuvantamismenetelmien teknologiset-metodologisten rajoitusten puitteissa. Neurofeedback-menetelmän taustaoletuksena ei ole ainoastaan mentaalisten strategioiden käyttökelpoisuus oskillaatorisen toiminnan muuttamisessa ja aivoaaltojen merkittävyys käyttäytymisen muuttamisessa vaan lisäksi oletus, että tietyillä aivokuvantamismenetelmillä, kuten EEG:llä, on sovellusarvoa aivoaaltojen muuttamisen välineenä (Zuberer, Brandeis, & Drechsler, 2015). Neurofeedbackin täsmällistä neuraalista vaikuttamista vaikeuttaa se, ettei EEG:llä suoraviivaisesti tavoita hermosolujen yksityiskohtaista elektrokemiallista toimintaa, vaan EEG-signaali muodostuu hermosolujen postsynaptisen aktivaation summasta, joka edelleen heijastuu spatiaalisesti epätarkasti aivojen sidekudoskalvojen ja kallon läpi pään ihon pinnan elektrodiin. On arvioitava, missä määrin EEG on aivokuvantamismenetelmänä spatiaaliselta tarkkuudeltaan sopiva väline sellaisten neuraalisten ilmiöiden muuttamiseen ja mittaamiseen, joita tutkittava pystyy riittävän edistyksekkäisesti moduloimaan aivotoiminnan itsesäätelyllä. Neurofeedback-tutkimuksissa ei pidä ainoastaan huomioida aivokuvantamismenetelmän spatiaalisen ja temporaalisen ulottuvuuden mittaustarkkuutta, vaan on tarkasteltava muutettavan ilmiön, kuten matalataajuuksisen oskillaation, modulaatiivista ulottuvuutta. Aivokuvantamismenetelmän korkea avaruudellinen ja ajallinen tarkkuus eivät edesauta operanttia aivotoiminnan itsesäätelyä, mikäli neuraalinen ilmiö, kuten oskillaatio tai heräteväste, on itsessään vaikeasti muutettavissa. Neurofeedbackin menetelmällisenä haasteena voidaankin nähdä olevan se, kuinka aivotoiminnan itsesäätelyn moduloivuus toteutuu mentaalisten strategioiden, BCI-systeemin, aivokuvantamisteknologian ja neurobiologian asettamissa rajoissa.

Sen lisäksi, että neurofeedback-menetelmä pitää sisällään menetelmälle ominaisia haasteita, on neurofeedback-harjoittelun keskiössä myös yleinen neuropsykologian tutkimuskentän haaste, jota käsittelemme tässä skaalauksen ongelmana. Spatiaalinen ja temporaalinen ulottuvuus sisältävät erilaisia mittakaavoja, jotka toimivat toisistaan poikkeavina selitystasoina psykofyysissosiaalisten ilmiöiden tarkastelussa. Kun siirrytään mittakaavalta toiselle ja pyritään tutkimaan eri selitystasojen välisiä yhteyksiä, on mittakaavojen merkitysten toisiinsa liittäminen usein epätarkkaa. Esimerkiksi hermoverkostojen (millimetrit, senttimetrit) tai hermosolujen (mikrometrit, nanometrit) tasojen

yhdistäminen kliinisiin oirekuviin, kognitioon tai ihmisen psykofyysissosiaaliseen kokonaiskuvaan ja toimintakykyyn on tyypillisesti haastavaa. Vastaavasti temporaalisessa tarkastelussa pitkäaikaisiin kehityspsykologisiin ilmiöihin on niin ikään vaikea yhdistää lyhytkestoisten neuraalisten tapahtumien merkityksiä. Kun edetään spatiaalisen tai temporaalisen ulottuvuuden mittakaavoissa kohti vastakkaisia tarkastelun skaaloja, muuttuu eri selitystasojen tekijöiden merkitysten yhteensovittaminen usein yhä työläämmäksi, koska tarkasteltavien ominaisuuksien määrä lisääntyy mittakaavan laajetessa. Esimerkiksi neurofeedback-menetelmän osalta arvioiminen, minkälainen merkitys tietyn aivoalueen oskillaatiolla (endofenotyyppi) on käyttäytymisessä (fenotyyppi), on ongelmallista, koska käyttäytymisen selitystasolle edetessä täytyy huomioida lisäksi muiden aivoalueiden ja oskillaatioiden samanaikainen vaikutus. Kun taas päinvastaisesti arvioidaan, mitkä NF-harjoittelijan psykologiset interventioresurssit ovat olennaisia neurofeedback-harjoittelussa, on laajasta behavioraalisten ominaisuuksien joukosta vaikea erotella yksittäisiä tekijöitä, jotka ovat oskillaatioiden muuttamisen keskiössä aivotoiminnan itsesäätelyssä. Neurofeedback-harjoittelun kaltaisissa neuropsykologisissa ilmiöissä ajan ja tilan ulottuvuudet ovat lisäksi yhteydessä toisiinsa. Esimerkiksi neurofeedback-intervention temporaalinen eteneminen trialista ja harjoituskerrasta toiseen voi vaikuttaa siihen, kuinka neuraalinen uudelleenorganisointi muuttuu spatiaalisessa mittakaavassa reseptorien, okasten, synapsien ja hermoverkostojen tasoilla.

Hermosoluverkostojen voidaan nähdä olevan hierarkkisesti järjestäytyneitä kokonaisuuksia (Park & Friston, 2013), jotka tuottavat neuraalisten yhteyksien lisääntyessä yhä monivivahteisempia neuropsykologisia ilmiöitä. Ihmisen neuropsykologisen kokonaiskuvan hahmottamista vaikeuttaa se, että psykologisia ilmiöitä havaitsemisesta toimintaan on ongelmallista tiivistää yksinkertaiseksi neuraaliseksi aktivaatioksi, koska huomattavan suuri osa ihmisaivojen rakenteesta ei suoranaisesti liity mekanistiseen informaation sisään- ja ulostuloon (*input-output*) vaan monimutkaiseen korkeampaan tiedonkäsittelyyn. Vaikka eri mittakaavojen ilmiöiden yhteensovittaminen on usein epätarkkaa, on huomionarvoista, ettei vastakkaisten selitystasojen yhteensovitus vaikeudu poikkeuksetta lineaarisesti sitä enemmän, mitä kauempana mittakaavat ovat spatiaalisesti tai temporaalisesti toisistaan. Skaalauksen ongelmassa kahden selitystason yhtäaikaista tarkastelua ei lisäksi vaikeuta ainoastaan spatiaalisen ulottuvuuden etäisyyden tai temporaalisen ulottuvuuden aikaeron lisääntyminen, vaan toisinaan haasteena on mittakaavojen laadulliset erot. Ilmiöiden selitystasot voivat olla erilaatuisia. Siinä missä neuraaliset ilmiöt, kuten synaptinen kestokorostuminen, voidaan liittää yksioikoisemmin fyysikaaliseen todellisuuteen, on jotkin

neurofeedbackin muutoskohteena olevat ilmiöt, kuten kokemukselliset tilat, edellistä kielellisempiä käsitteellistyksiä ja usein vaikeasti neuraalisesti paikannettavissa. Koska useisiin psykologisiin ilmiöihin voidaan liittää subjektiivisia ja fenomenalisia ominaisuuksia, ovat ne myös operationalisoinnin kannalta vaikeasti tavoitettavissa.

Neurofeedback-intervention rakentumisessa eri mittakaavojen huomioimisen voi nähdä tärkeänä, koska menetelmä perustuu neuropsykologisesti mittakaavojen välisille riippuvuussuhteille. Näitä eri selitystasojen välisiä riippuvuussuhteita ovat muun muassa mielensisäisillä strategioilla aivojen oskillaatoriseen toimintaan vaikuttaminen sekä toisaalta aivojen oskillaatoristen muutosten vaikutus muutoskohteena olevaan ilmiöön, kuten kliiniseen oirekuvaan tai kognitioon. Kun arvioidaan neurofeedbackin keskeisiä haasteita, kuvaamme menetelmän haasteellisuuden tiivistyvän niin sanottuun kaksinkertaiseen neuropsykologiseen haasteeseen. Kaksinkertainen neuropsykologinen haaste voidaan eritellä seuraavasti:

- Aivotoiminnan itsesäätelyn moduloivuus
- Oskillaatioiden instrumentaalisuus

Neurofeedback-intervention lähtökohtainen haaste on neuraalisen modulaation onnistuminen aivotoiminnan itsesäätelyn avulla. Neuropsykologisena haasteena on oskillaatioiden modulaatio NF-harjoittelijan mentaalisten strategioiden, kognitiivisten kykyjen, motivaation sekä muiden interventioresurssien aikaansaamana. Toinen menetelmän keskeinen neuropsykologinen haaste on neuraalisen tason muutosten siirrettävyys käyttäytymisen tasolle. Mikäli aivotoiminnan moduloiminen onnistuu psykologisen itsesäätelyn avulla, koskee menetelmän seuraava haaste psykologisiin tiloihin vaikuttamista oskillaatoristen muutosten välityksellä. Neurofeedback-intervention neuropsykologisten haasteiden minimoimiseksi voidaan intervention toteuttamisessa pyrkiä painottamaan NF-harjoittelijan interventioresurssien, metodologian ja muutoskohteen yhteensovittamista siten, että intervention taustateoreettinen viitekehys palvelee mahdollisimman optimaalisella tavalla aivotoiminnan moduloitavuutta itsesäätelyllä sekä oskillaatorisen muutosten siirrettävyyttä käyttäytymiseen.

4.6. Neurobiologisten hoitomuotojen kehitys

Ihmisaivojen informaatioprosessoinnin monimutkaisuudesta (kapasiteetti) ja hienorakenteisuudesta (resoluutio) johtuen on täsmällinen neurobiologinen manipulaatio ollut historiassa monesti myös hoitomenetelmästä riippumatta haastavaa. Koska aivot ovat niin sanotusti iso paikka pienessä tilassa, koskee neurofeedback-menetelmän haasteet myös monia muita neurobiologisia hoitomenetelmiä. Käyttäytymisen ja toimintakyvyn tasolla havaittava neuraalinen muutos on ollut hoidollisten menetelmien tavoitteena modernissa psykiatriassa 1900-luvun alusta lähtien. Neurotieteiden ja psykiatrian historiaa tarkasteltaessa voidaan havainnoida kehityskulkuja sen suhteen, miten aivojen toimintoja muokkaamalla on pyritty vaikuttamaan ihmisen käyttäytymiseen. Karkeasti jaotellen neurobiologisten hoitomuotojen kehityksen voidaan nähdä kulkeneen neurokirurgian sekä insuliini- ja sähköshokkihoidon kautta kohti erilaisia farmakologisia hoitomuotoja (Lönnqvist & Lehtonen, 2014). Lääkehoidon lisäksi on edelleen ehdotettu uusia, vaihtoehtoisia ja täydentäviä hoitomuotoja, kuten neurofeedback-menetelmää (Flisiak-Antonijczuk ym., 2015; Pakdaman ym., 2018). Edellä mainituista joitakin menettelytapoja, kuten barbituraatteja, insuliinisokkeja ja lobotomiaa, käytettiin psykiatrisessa työssä valtaosin vain 1900-luvun ensimmäisellä puoliskolla, kun taas osaa menetelmistä käytetään tai kehitetään edelleen. Siinä missä esimerkiksi 1950-luvulta asti käytössä ollut haloperidolia käytetään yhä psykoosien hoitoon ja litiumia bipolaarihäiriön hoitoon (Lönnqvist & Lehtonen, 2014; Patronen, Lönnqvist, & Syvälahti, 2014), on monien muiden lääkeryhmien, esimerkiksi barbituraattien, käyttö vähentynyt merkittävästi. Tarkentunut neurobiologinen tutkimustieto on antanut uusia psykofarmakologisia lähestymistapoja myös antidepressanttien vaikutusmekanismien kehittämiseen. Tätä kuvastaa serotoniinin kaltaisista modulatiivisten välittäjäaineiden takaisinotonestäjistä (monoamiinihypoteesi) huomion laajeneminen medioivien välittäjäaineiden, kuten glutamaatin, toiminnan muuttamiseen esimerkiksi ketamiinin avulla (Kandel, 2018). Näkökulman laajenemisen voinee tulkita neurobiologisesti tärkeäksi, koska moduloivien välittäjäaineiden synaptisesta hienosäädöstä poiketen ketamiini vaikuttaa suoraviivaisemmin kohdesoluun eksitoiden sen toimintaa.

On ennakoitavaa, että lisääntyvän tutkimustiedon ansiosta myös neurofeedback tulee monien muiden neurobiologisten hoitomenetelmien tapaan tulevaisuudessa muuttumaan sekä hakemaan uusiutuvien tavoin paikkaansa niin kokeellisen tutkimuksen kentällä kuin kliinisessä hoitotyössä. Eri tieteenalojen tutkimustiedon yhtenäisyyden, konsilienssin (Wilson, 1999), voi

mieltää neurofeedbackin kaltaisten menetelmien kehittämisessä esivaatimukseksi, koska menetelmä on liitettävissä niin psykologian ja psykiatrian kuin neurotieteiden ja aivokuvantamisteknologian tutkimuskenttiin. Tähän mennessä kasvava kiinnostus BCI-menetelmiä kohtaan on näkynyt neurofeedback-julkaisujen määrässä: kun vuosina 1972–1990, alkaen Stermanin ja kollegoiden (1972) hoidosta kohdistuen epilepsiaan, oli ilmestynyt yhteensä 162 julkaisua, on vuosina 2001–2010 julkaisujen lukumäärä ollut 6100 ja vuodesta 2011 alkaen yli 9000 (Rogala ym., 2016). Vaikka menetelmää on tutkittu 1960-luvulta alkaen lisääntyvissä määrin, on muun muassa Suomen Käypä hoito -suosituksissa (2018) yksiselitteisesti ilmoitettu, ettei EEG-biofeedback ole nykyisen tutkimustiedon perusteella ainakaan toistaiseksi suositeltava vaihtoehto lasten ja nuorten ADHD:n hoitoon (näytönaste: B, kohtalainen). Tutkimustiedon rajoittuneisuudesta huolimatta neuroterapia on kerännyt ympärilleen runsaasti kiinnostusta myös sovelletun neurotieteen tutkimuskentän ulkopuolella ja sen on ennakoitu olevan toimiva ei-lääkkeellinen hoitovaihtoehto. Menetelmän luotettavuutta kuitenkin vääristäneet esimerkiksi tieteellisessä tutkimuksessa esiintyvä julkaisuharha sekä kaupalliset tuotemarkkinat, missä toisinaan into saattaa mennä järjen edelle etenkin aikakautena, jolle voi nähdä olevan leimallista itsensä kehittäminen, yksilöllinen hyvinvoinnin ja aivoterveiden harjoittaminen (*brain training*) sekä kasvava mielenkiinto biologis-teknologisia innovaatioita kohtaan. Vaikka menetelmällä voidaan saada lupaavia tuloksia kokeellisen tutkimuksen optimaalisissa olosuhteissa, ei se suoranaisesti tarkoita, että tutkimustuloksilla on samansuuruinen merkitys päivittäisen elämän olosuhteissa (teho \neq vaikuttavuus). Jotta neurofeedback olisi varteenotettava vaihtoehto muille hoitomuodoille, on sen merkittävien neurobehavioraalisten vaikutusten lisäksi oltava riittävän kustannustehokas (tehokkuus) suhteutettuna neurofeedback-intervention kuluttamiin resursseihin, kuten interventioon käytettyyn aikaan ja investoituun rahaan.

Verrattuna moniin muihin neurobiologisiin hoitomuotoihin sisältää neurofeedback-menetelmä kuitenkin etuja, joita voidaan painottaa menetelmää kehittäessä. Neurofeedback-menetelmän voi mieltää teoreettiselta lähtökohdaltaan lupaavaksi hoitomenetelmäksi, koska siinä pyritään tutkittavan aktiivisella osallistamisella muuttamaan oirekuvan taustalla vallitsevia olennaiseksi miellettyjä neurobiologisia ilmiöitä. Voi pohtia, saako menetelmä tulevaisuudessa enemmän sovellusarvoa, mikäli sen toiminnallisuutta on kannattavaa yhdistää samanaikaisesti toteutettuun farmakoterapiaan (Pakdaman ym., 2018), aivostimulaatioon (Soekadar ym., 2014) tai muuhun hoidolliseen interventioon. Koska mentaaliin strategioihin perustuvaa aivotoiminnan itsesäätelyä ei ole ainakaan toistaiseksi onnistuttu valikoivasti keskittämään farmakoterapian tavoin esimerkiksi synaptisen toiminnan välittäjäaineryhmiin,

kuten aminohappoihin (mm. glutamaatti) tai biogeenisiin amiineihin (mm. serotoniini), ei modulaatio ole neuraaliselta kohdentumiseltaan erityisen spesifiä. Vaikka neurofeedbackin metodologisena etuna voidaan mieltää olevan modulaation kohdistuminen neurobiologisiin ilmiöihin, saattaa menetelmä vaatia tueksi muita biologisia hoitomuotoja tai tekniikoita, jotka edesauttavat aivotoiminnan itsesäätelyn spesifisyyttä. Toisaalta on myös syytä muistaa, että erityisesti kliinisessä hoitotyössä neurofeedbackin etuihin sisältyy menetelmän non-invasiivisuus, joka ei kuitenkaan enää toteudu, mikäli neurofeedback-harjoittelua yhdistetään kajoaviin hoitomuotoihin. Koska neurofeedbackin neuraalisista vaikutusmekanismeista ei ole toistaiseksi tarkkaa tutkimustietoa (Niv, 2013), voi kokeellisessa tutkimuksessa erilaisten neurobiologisten hoitomuotojen yhdistäminen joka tapauksessa antaa lisätietoa neurofeedback-menetelmästä.

4.7. Neurofeedback-menetelmän jatkotutkimus

4.7.1. Teoreettiset lähtökohdat

Neurofeedbackin tulevaisuuden näkymät ovat tarpeellisen jatkotutkimuksen suhteen moninaiset. Tässä opinnäytetyössä esitimme neurofeedback-menetelmän haasteeksi tiivistyvän niin sanotun kaksinkertaisen neuropsykologisen haasteen: aivotoiminnan itsesäätelyn moduloivuuden ja oskillaatioiden instrumentaalisuuden. Keskeiset haasteet on tarpeellista huomioida neurofeedback-tutkimuksen suunnittelussa. Neurofeedback-tutkimuksen teoreettisen rakentumisen osalta ehdotamme, että intervention suunnittelun tukena voidaan hyödyntää viitekehystä neurofeedbackin interaktiivisesta ja systeemisestä luonteesta Neurofeedback-interventioiden toteuttamisen taustateorianäkökulmana voidaan korostaa NF-harjoittelijan interventioresurssien, metodologian ja muutoskohteena olevan ilmiön optimaalista yhteensovittamista (kuvio 4). Koska aivotoiminnan itsesäätelyssä on havaittu olevan vaihtelua tutkittavien välillä, voidaan jatkotutkimusten sekä teoreettisessa suunnittelussa että tutkimustulosten psykometrisessä analysoinnissa pyrkiä huomioimaan keskiarvovetoisen tarkastelun lisäksi neurofeedback-harjoittelussa tapahtuvat yksilölliset ja interventioresursseista riippuvaiset kehityskulut.

4.7.2. Käytännön suositukset

Jotta neurofeedback-menetelmän modulaatiivisia lainalaisuuksia ymmärrettäisiin paremmin, voidaan jatkotutkimuksessa pyrkiä korostamaan muun muassa lasten ja ikääntyneiden sekä terveiden ja sairaiden, joilla on diagnosoidusti psykiatrinen tai neurologinen häiriö, aivojen modulaatiivisten ominaisuuksien vertailua. Myös lisääntyvä kokeellinen tutkimus neurofeedbackin yhdistämisestä farmakoterapiaan ja aivostimulaatioon saattaisi mahdollisesti tuoda esille tutkimusnäyttöä siitä, voivatko muut menetelmät edesauttaa BCI-perustaisen toiminnallisen menetelmän vaikutuksia. Aivotoiminnan itsesäätely perustuu neurofeedback-tutkimuksissa tyypillisesti tutkittavan mielensisäisille strategioille, mutta modulaation tehostamisen näkökulmasta voisi niin ikään pohtia, pystyykö aivotoiminnan itsesäätelyä tukea erilaisille virikkeillä tai apuvälineillä. Esimerkiksi sensorimotorisen rytmin modulaation osalta voisi aivotoiminnan itsesäätelyssä olla tukena motorisen toiminnan toimeenpanemiseen tai suppressioon liittyviä apuvälineitä, joiden avulla oskillaation synkronisoitumista ja desynkronisoitumista olisi mahdollisesti helpompi kontrolloida. Koska neurofeedback-menetelmän tutkimusnäyttö on vielä suhteellisen epäselvää heikosti kontrolloitujen ja epäjohdonmukaisesti suoritettujen tutkimusten johdosta (Rogala ym., 2016), on koko tutkimuskentän olennainen kehityskohde tuottaa ennen kaikkea johdonmukaisesti sellaisia tutkimuksia, jotka ovat koeasetelmaltaan hyvin kontrolloituja, metodologisesti läpinäkyviä ja keskenään vertailukelpoisia.

LÄHTEET

- Adrian, E. D., & Matthews, B. H. (1934). The Berger rhythm: potential changes from the occipital lobes in man. *Brain*, 57(4), 355-385.
- Allen, J. J., Harmon-Jones, E., & Cavender, J. H. (2001). Manipulation of frontal EEG asymmetry through biofeedback alters self-reported emotional responses and facial EMG. *Psychophysiology*, 38(4), 685-693.
- Andersson, S. A., & Manson, J. R. (1971). Rhythmic activity in the thalamus of the unanesthetized decorticate cat. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 31(1), 21-34.
- Anguera, J. A., Boccanfuso, J., Rintoul, J. L., Al-Hashimi, O., Faraji, F., Janowich, J., & Gazzaley, A. (2013). Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature*, 501(7465), 97-101.
- Arns, M. (2012). EEG-based personalized medicine in ADHD: Individual alpha peak frequency as an endophenotype associated with nonresponse. *Journal of Neurotherapy*, 16(2), 123-141.
- Arns, M., Heinrich, H., & Strehl, U. (2014). Evaluation of neurofeedback in ADHD: the long and winding road. *Biological psychology*, 95, 108-115.
- Bazanava, O., & Mernaya, E. (2008). Voluntary modification of musical performance by neurofeedback training. *Annals of General Psychiatry*, 7(S1), S100.
- Berger, H. (1929). Über das elektroencephalogramm des menschen. *Archiv für psychiatrie und nervenkrankheiten*, 87(1), 527-570.
- Cheng, M. Y., Huang, C. J., Chang, Y. K., Koester, D., Schack, T., & Hung, T. M. (2015). Sensorimotor rhythm neurofeedback enhances golf putting performance. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 37(6), 626-636.
- Cooper, N. R., Croft, R. J., Dominey, S. J., Burgess, A. P., & Gruzelier, J. H. (2003). Paradox lost? Exploring the role of alpha oscillations during externally vs. internally directed attention and the implications for idling and inhibition hypotheses. *International Journal of Psychophysiology*, 47(1), 65-74.
- Da Silva, F. L. (1991). Neural mechanisms underlying brain waves: from neural membranes to networks. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 79(2), 81-93.
- Dempster, T. (2012). *An investigation into the optimum training paradigm for alpha electroencephalographic biofeedback*. (Doctoral dissertation, Canterbury Christ Church University).

Donhoffer, H., & Lissak, K. (1962). EEG changes associated with the elaboration of conditioned reflexes. *Acta physiologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 21, 249.

Ebbinghaus, H. (1885/1913). *Memory: A contribution to experimental psychology* (HA Ruger & CE Bussenius, Trans.). New York, NY, US.

Ebbinghaus, H. (1885). *Über das gedächtnis: untersuchungen zur experimentellen psychologie*. Duncker & Humblot.

Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2001). Learned self-regulation of EEG frequency components affects attention and event-related brain potentials in humans. *Neuroreport*, 12(18), 4155-4159.

Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., Figge, C., & Herrmann, C. S. (2014a). Self-regulation of frontal-midline theta facilitates memory updating and mental set shifting. *Frontiers in behavioral neuroscience*, 8, 420.

Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2017). EEG-neurofeedback as a tool to modulate cognition and behavior: a review tutorial. *Frontiers in human neuroscience*, 11, 51.

Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., Scharfenort, R., Mokom, Z. N., Zimmermann, J., & Herrmann, C. S. (2014b). Modulation of frontal-midline theta by neurofeedback. *Biological psychology*, 95, 59-69.

Enriquez-Geppert, S., Huster, R. J., Scharfenort, R., Mokom, Z., Figge, C., Zimmermann, J., & Herrmann, C. S. (2013). The morphology of midcingulate cortex predicts frontal-midline theta neurofeedback success. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 453.

Flisiak-Antonijczuk, H., Adamowska, S., Chłodzińska-Kiejna, S., Kalinowski, R., & Adamowski, T. (2015). Treatment of ADHD: comparison of EEG-biofeedback and methylphenidate. *Archives of Psychiatry & Psychotherapy*, 17(4).

Fuchs, T., Birbaumer, N., Lutzenberger, W., Gruzelier, J. H., & Kaiser, J. (2003). Neurofeedback treatment for attention-deficit/hyperactivity disorder in children: a comparison with methylphenidate. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 28(1), 1-12.

Gani, C., Birbaumer, N., & Strehl, U. (2008). Long term effects after feedback of slow cortical potentials and of theta-beta-amplitudes in children with attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *Int J Bioelectromagn*, 10(4), 209-232.

Gruzelier, J. H. (2014a). EEG-neurofeedback for optimising performance. I: a review of cognitive and affective outcome in healthy participants. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 124-141.

Gruzelier, J. H. (2014b). EEG-neurofeedback for optimising performance. III: a review of methodological and theoretical considerations. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 159-182.

- Hammer, E. M., Halder, S., Blankertz, B., Sannelli, C., Dickhaus, T., Kleih, S., ... & Kübler, A. (2012). Psychological predictors of SMR-BCI performance. *Biological psychology*, 89(1), 80-86.
- Kamiya, J. (1962). Conditioned discrimination of the EEG alpha rhythm in humans. *Western Psychological Association, San Francisco, CA*.
- Kamiya, J. (1968). Conscious control of brain waves. *Psychology today*.
- Kandel, E. R. (2018). *The disordered mind: What unusual brains tell us about ourselves*. Hachette UK.
- Klimesch, W. (2012). Alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in cognitive sciences*, 16(12), 606-617.
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Hanslmayr, S. (2007). EEG alpha oscillations: the inhibition-timing hypothesis. *Brain research reviews*, 53(1), 63-88.
- Kleih, S. C., Nijboer, F., Halder, S., & Kübler, A. (2010). Motivation modulates the P300 amplitude during brain-computer interface use. *Clinical Neurophysiology*, 121(7), 1023-1031.
- Koralek, A. C., Jin, X., Long II, J. D., Costa, R. M., & Carmena, J. M. (2012). Corticostriatal plasticity is necessary for learning intentional neuroprosthetic skills. *Nature*, 483(7389), 331-335.
- Kortelainen, I., Saari, A., & Väänänen, M. (2014). Mindfulness ja tieteeet: tietoisuustaidot ja kehotietoisuus monitieteisen tutkimuksen kohteena. Tampere: Suomen yliopistopaino Oy. [viitattu 9.7.2020]. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/103675/978-951-44-9550-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Käypä hoito -suositus. (2018). Biopalautehoito (neurofeedback) lasten ja nuorten ADHD:n hoidossa. *Suomalainen Lääkäriseura Duodecim*. [viitattu 7.7.2020]. Saatavissa: <https://www.kaypahoito.fi/dnd00038>.
- Lévesque, J., Beauregard, M., & Mensour, B. (2006). Effect of neurofeedback training on the neural substrates of selective attention in children with attention-deficit/hyperactivity disorder: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroscience letters*, 394(3), 216-221.
- Linden, M., Habib, T., & Radojevic, V. (1996). A controlled study of the effects of EEG biofeedback on cognition and behavior of children with attention deficit disorder and learning disabilities. *Biofeedback and Self-regulation*, 21(1), 35-49.
- Lofthouse, N., Arnold, L. E., Hersch, S., Hurt, E., & DeBeus, R. (2012). A review of neurofeedback treatment for pediatric ADHD. *Journal of attention disorders*, 16(5), 351-372.
- Lubar, J. F., Swartwood, M. O., Swartwood, J. N., & O'Donnell, P. H. (1995). Evaluation of the effectiveness of EEG neurofeedback training for ADHD in a clinical setting as measured by changes in TOVA scores, behavioral ratings, and WISC-R performance. *Biofeedback and Self-regulation*, 20(1), 83-99.

- Lönnqvist, J. & Lehtonen, J. (2014). Psykiatria ja mielenterveys. Teoksessa Lönnqvist J., Henriksson M., Marttunen M., Partonen T. (toim.), *Psykiatria*, 11. painos (s. 18–40). Duodecim.
- Marzbani, H., Marateb, H. R., & Mansourian, M. (2016). Neurofeedback: a comprehensive review on system design, methodology and clinical applications. *Basic and clinical neuroscience*, 7(2), 143.
- Monastra, V. J., Monastra, D. M., & George, S. (2002). The effects of stimulant therapy, EEG biofeedback, and parenting style on the primary symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder. *Applied psychophysiology and biofeedback*, 27(4), 231-249.
- Nan, W., Rodrigues, J. P., Ma, J., Qu, X., Wan, F., Mak, P. I., ... & Rosa, A. (2012). Individual alpha neurofeedback training effect on short term memory. *International journal of psychophysiology*, 86(1), 83-87.
- Nan, W., Wan, F., Vai, M. I., & Da Rosa, A. C. (2015). Resting and initial beta amplitudes predict learning ability in beta/theta ratio neurofeedback training in healthy young adults. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 677.
- Nevin, J. A. (1999). Analyzing Thorndike's law of effect: The question of stimulus—response bonds. *Journal of the experimental analysis of behavior*, 72(3), 447-450.
- Nierhaus, T., Vidaurre, C., Sannelli, C., Mueller, K. R., & Villringer, A. (2019). Immediate brain plasticity after one hour of brain–computer interface (BCI). *The Journal of physiology*.
- Nijboer, F., Birbaumer, N., & Kubler, A. (2010). The influence of psychological state and motivation on brain–computer interface performance in patients with amyotrophic lateral sclerosis—a longitudinal study. *Frontiers in neuroscience*, 4, 55.
- Niv, S. (2013). Clinical efficacy and potential mechanisms of neurofeedback. *Personality and Individual Differences*, 54(6), 676-686
- Ossadtchi, A., Shamaeva, T., Okorokova, E., Moiseeva, V., & Lebedev, M. A. (2017). Neurofeedback learning modifies the incidence rate of alpha spindles, but not their duration and amplitude. *Scientific reports*, 7(1), 1-12.
- Othmer, S. (1999). Neuromodulation technologies: An attempt at classification. Teoksessa Evans, J. R., & Abarbanel, A. (Eds.). *Introduction to quantitative EEG and neurofeedback*. (s. 3-27). Elsevier.
- Pakdaman, F., Irani, F., Tajikzadeh, F., & Jabalkandi, S. A. (2018). The efficacy of Ritalin in ADHD children under neurofeedback training. *Neurological Sciences*, 39(12), 2071-2078.
- Park, H. J., & Friston, K. (2013). Structural and functional brain networks: from connections to cognition. *Science*, 342(6158).
- Patronen, T., Lönnqvist, J., & Syvälahti, E. (2014). Biologiset hoidot. Teoksessa Lönnqvist J., Henriksson M., Marttunen M., Partonen T. (toim.), *Psykiatria*, 11. painos (s. 827–862). Duodecim.

- Pfurtscheller, G. (1992). Event-related synchronization (ERS): an electrophysiological correlate of cortical areas at rest. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 83(1), 62-69.
- Philippens, I. H., & Vanwersch, R. A. (2010). Neurofeedback training on sensorimotor rhythm in marmoset monkeys. *Neuroreport*, 21(5), 328-332.
- Pineda, J. A., Brang, D., Hecht, E., Edwards, L., Carey, S., Bacon, M., ... & Rork, A. (2008). Positive behavioral and electrophysiological changes following neurofeedback training in children with autism. *Research in Autism Spectrum Disorders*, 2(3), 557-581.
- Purves, D., & Platt, M. (2018a). Cortical States. Teoksessa Purves, D., Augustine, G., Fitzpatrick, D., Hall, W., LaMantia, A., Mooney, R., Platt, M. and White, L. (toim.), *Neuroscience*, 6. painos (s. 643–666). Sinauer Associates.
- Purves, D., & Platt, M. (2018b). Development and Evolution of Cognitive Functions. Teoksessa Purves, D., Augustine, G., Fitzpatrick, D., Hall, W., LaMantia, A., Mooney, R., Platt, M. and White, L. (toim.), *Neuroscience*, 6. painos (s. 767–790). Sinauer Associates.
- Rabipour, S., & Raz, A. (2012). Training the brain: Fact and fad in cognitive and behavioral remediation. *Brain and cognition*, 79(2), 159-179.
- Reis, J., Portugal, A. M., Fernandes, L., Afonso, N., Pereira, M., Sousa, N., & Dias, N. S. (2016). An alpha and theta intensive and short neurofeedback protocol for healthy aging working-memory training. *Frontiers in aging neuroscience*, 8, 157.
- Rogala, J., Jurewicz, K., Paluch, K., Kublik, E., Cetnarski, R., & Wróbel, A. (2016). The Do's and Don'ts of Neurofeedback Training: A Review of the Controlled Studies Using Healthy Adults. *Frontiers in human neuroscience*, 10, 301. doi:10.3389/fnhum.2016.00301.
- Ros, T., Munneke, M. A., Ruge, D., Gruzelier, J. H., & Rothwell, J. C. (2010). Endogenous control of waking brain rhythms induces neuroplasticity in humans. *European Journal of Neuroscience*, 31(4), 770-778.
- Ros, T., Théberge, J., Frewen, P. A., Kluetsch, R., Densmore, M., Calhoun, V. D., & Lanius, R. A. (2013). Mind over chatter: plastic up-regulation of the fMRI salience network directly after EEG neurofeedback. *Neuroimage*, 65, 324-335.
- Rossiter, D. T. R., & La Vaque, T. J. (1995). A comparison of EEG biofeedback and psychostimulants in treating attention deficit/hyperactivity disorders. *Journal of neurotherapy*, 1(1), 48-59.
- Roth, S. R., Serman, M. B., & Clemente, C. D. (1967). Comparison of EEG correlates of reinforcement, internal inhibition and sleep. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 23(6), 509-520.
- Schafer, R. J., & Moore, T. (2011). Selective attention from voluntary control of neurons in prefrontal cortex. *Science*, 332(6037), 1568-1571.

- Segal, D. L., Qualls, S. H., & Smyer, M. A. (2018). *Aging and mental health*. John Wiley & Sons.
- Skinner, B. F. (1937). Two types of conditioned reflex: A reply to Konorski and Miller. *The Journal of General Psychology*, *16*(1), 272-279.
- Soekadar, S. R., Witkowski, M., Garcia Cossio, E., Birbaumer, N., & Cohen, L. (2014). Learned EEG-based brain self-regulation of motor-related oscillations during application of transcranial electric brain stimulation: feasibility and limitations. *Frontiers in behavioral neuroscience*, *8*, 93.
- Sterman, M. B., & Bowersox, S. S. (1981). Sensorimotor electroencephalogram rhythmic activity: a functional gate mechanism. *Sleep*, *4*(4), 408-422.
- Sterman, M. B., & Egner, T. (2006). Foundation and practice of neurofeedback for the treatment of epilepsy. *Applied psychophysiology and biofeedback*, *31*(1), 21.
- Sterman, M. B., & Friar, L. (1972). Suppression of seizures in an epileptic following sensorimotor EEG feedback training. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, *33*(1), 89-95.
- Strehl, U. (2014). What learning theories can teach us in designing neurofeedback treatments. *Frontiers in human neuroscience*, *8*, 894.
- Tansey, M. A. (1984). EEG sensorimotor rhythm biofeedback training: some effects on the neurologic precursors of learning disabilities. *International Journal of Psychophysiology*, *1*(2), 163-177.
- Terrasa, J. L., Alba, G., Cifre, I., Rey, B., Montoya, P., & Muñoz, M. A. (2019). Power Spectral Density and Functional Connectivity Changes due to a Sensorimotor Neurofeedback Training: A Preliminary Study. *Neural plasticity*, 2019.
- Thorndike, E. L. (1898). Animal intelligence: an experimental study of the associative processes in animals. *The Psychological Review: Monograph Supplements*, *2*(4), i.
- Van Doren, J., Arns, M., Heinrich, H., Vollebregt, M. A., Strehl, U., & Loo, S. K. (2019). Sustained effects of neurofeedback in ADHD: a systematic review and meta-analysis. *European child & adolescent psychiatry*, *28*(3), 293-305.
- Vernon, D. J. (2005). Can neurofeedback training enhance performance? An evaluation of the evidence with implications for future research. *Applied psychophysiology and biofeedback*, *30*(4), 347.
- Vernon, D., Egner, T., Cooper, N., Compton, T., Neilands, C., Sheri, A., & Gruzelier, J. (2003). The effect of training distinct neurofeedback protocols on aspects of cognitive performance. *International journal of psychophysiology*, *47*(1), 75-85.
- Vidal, J. J. (1973). Toward direct brain-computer communication. *Annual review of Biophysics and Bioengineering*, *2*(1), 157-180.

- Wacker, M. S. (1996). Alpha brainwave training and perception of time passing: preliminary findings. *Biofeedback and self-regulation*, 21(4), 303-309.
- Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. *Journal of personality and social psychology*, 54(6), 1063.
- Weber, E., Köberl, A., Frank, S., & Doppelmayr, M. (2011). Predicting successful learning of SMR neurofeedback in healthy participants: methodological considerations. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*, 36(1), 37-45.
- Wilson, E. O. (1999). *Consilience: The unity of knowledge* (Vol. 31). Vintage.
- Witte, M., Kober, S. E., Ninaus, M., Neuper, C., & Wood, G. (2013). Control beliefs can predict the ability to up-regulate sensorimotor rhythm during neurofeedback training. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 478.
- Woodworth, R. S., & Thorndike, E. L. (1901). The influence of improvement in one mental function upon the efficiency of other functions.(I). *Psychological review*, 8(3), 247.
- Wyrwicka, W. (2000). *Conditioning: situation versus intermittent stimulus*. Transaction Publishers.
- Wyrwicka, W., & Serman, M. B. (1968). Instrumental conditioning of sensorimotor cortex EEG spindles in the waking cat. *Physiology & Behavior*, 3(5), 703-707.
- Zoefel, B., Huster, R. J., & Herrmann, C. S. (2011). Neurofeedback training of the upper alpha frequency band in EEG improves cognitive performance. *Neuroimage*, 54(2), 1427-1431.
- Zuberer, A., Brandeis, D., & Drechsler, R. (2015). Are treatment effects of neurofeedback training in children with ADHD related to the successful regulation of brain activity? A review on the learning of regulation of brain activity and a contribution to the discussion on specificity. *Frontiers in human neuroscience*, 9, 135.