

**NÄKÖAIVOKUOREN ROOLI SISÄISEN TARKKAAVUUDEN
KOHDISTAMISESSA VISUAALISEEN MUISTIAINEKSEEN**

Saana Jussila
Pinja Ronkainen
Pro gradu -tutkielma
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto
Heinäkuu 2022

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Psykologian laitos

JUSSILA, SAANA & RONKAINEN, PINJA:

Näköaivokuoren rooli sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisessa visuaaliseen muistiainekseen

Pro gradu -tutkielma, 41 s., 1 liite.

Ohjaaja: Tiina Parviainen

Psykologia

Heinäkuu 2022

TIIVISTELMÄ

Visuaalinen järjestelmä vastaanottaa jatkuvasti suuren määrän informaatiota, jota valikoidaan ja ylläpidetään tarkkaavuuden ja visuaalisen työmuistin avulla. Sisäisen tarkkaavuuden kohdistamista työmuistissa ylläpidettyihin representaatioihin voidaan tutkia takaumavihjekoeasetelman avulla, jossa jälkikäteen annettu visuaalinen takaumavihje kohdistaa tarkkaavuuden muistissa ylläpidettyyn visuaaliseen representaatioon. Sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen on havaittu parantavan työmuistisuoritusta, mikä saattaa johtua esimerkiksi tarkkaavuuden kohdistamisen aikaansaamasta muistirepresentaation vahvistumisesta. Sisäisen tarkkaavuuden ja työmuistin neuraalisen perustan tutkimiseksi takaumavihjekoeasetelma on yhdistetty aivokuvantamismenetelmiin. Yksi keskeisiä työmuistin ja tarkkaavuuden aivoprosesseja on alfa-oskillaatio, mutta on epäselvää, miten sen rooli eroaa näiden prosessien välillä. Tässä tutkimuksessa tarkastelimme näköaivokuoren rytmistä toimintaa sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisessa hyödyntämällä takaumavihjekoeasetelmaa yhdessä MEG-kuvantamisen kanssa eksploraatiivisella tutkimusotteella. Tutkimme näköaivokuoren alfa-oskillaation modulaatiota mieleenpainamisen ja visuaalisen takaumavihjeen esittämisen aikana sekä takaumavihjeen (neutraali tai validi) vaikutusta näköaivokuoren alfa-oskillaatioon. Tuloksemme osoittivat, että mieleenpainaminen ja takaumavihjeen esittäminen aiheuttivat voimistunutta alfa-oskillaatiota näköaivokuorella. Lisäksi havaittiin ennakoivaa alfa-oskillaatiota, joka saattaa kuvata tarkkaavuuden kohdistamiseen liittyviä prosesseja. Mieleenpainamisen (muistiaineksen ylläpidon) aikana alfa-oskillaatio oli voimakkaampaa kuin takaumavihjeen käsittelyn (sisäisen tarkkaavuuden) aikana. Lisäksi alfa-oskillaatio oli voimakkaampaa neutraalin vihjeen kuin validin vihjeen jälkeen. Tämä voimakkaampi alfa-oskillaatio mieleenpainamisen ja neutraalin vihjeen aikaansaamana voisi kertoa muistikuorman aiheuttamasta suuremmasta ponnistelusta. Tutkimuksemme mukaan alfa-oskillaatiolla vaikuttaisi olevan roolinsa sekä tarkkaavuuden että työmuistin prosesseissa. Aivopuoliskojen välisiä eroja tarkasteltaessa havaittiin, että alfa-oskillaatio oli voimakkaampaa oikeassa aivopuoliskossa molemmissa vihjetyypeissä. Tämä saattaa kuvata aivopuoliskojen erilaista roolia sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen prosesseissa verrattuna mieleenpainamiseen, jossa aivopuoliskot vaikuttaisivat työskentelevän samalla tavalla. Alfa-oskillaation modulaatio sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisessa vaikuttaa olevan yksilöllistä. Lisää tutkimusta tarvitaan isommilla aineistoilla sekä erilaisilla aivokuvantamismenetelmillä. Tällaista tietoa muistin ja tarkkaavuuden perustasta voidaan hyödyntää esimerkiksi neurologisten sairauksien kuntoutuksen kehittämisessä. Näköaivokuoren yksilöllinen reagointi muisti- ja tarkkaavuusprosesseissa kannustaa muistin ja oppimisvaikeuksien yksilölliseen kartoittamiseen.

Avainsanat: Sisäinen tarkkaavuus, takaumavihje, visuaalinen työmuisti, MEG, näköaivokuori, alfa-oskillaatio

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ

Department of Psychology

JUSSILA, SAANA & RONKAINEN, PINJA:

The role of the visual cortex in directing internal attention to visual mental representation

Master's thesis, 41 p., 1 appendix.

Supervisor: Tiina Parviainen

Psychology

July 2022

ABSTRACT

The visual system is constantly receiving a large amount of information, which is selected and retained by attention and visual working memory (VWM). The direction of internal attention to representations maintained in working memory can be studied using a retro-cue paradigm, in which a retrospectively presented visual memory cue directs attention to a visual representation maintained in memory. Directing internal attention to relevant information has been found to improve working memory performance, which may be due to the enhancement of the memory representation induced by directing attention to relevant information. To investigate the neural basis of internal attention and working memory, the retro-cue paradigm has been combined with brain imaging. One of the essential brain processes involved in working memory and attention is alpha oscillation, but it is unclear how its role differs between these processes. In the present study, we investigated the rhythmic modulation of visual cortex on internal attention using the retro-cue paradigm with MEG on exploratory approach. We investigated the modulation of alpha oscillation in the visual cortex during the presentation of memory array and a visual memory cue, and the effect of the memory cue (neutral or valid) on alpha oscillation in the visual cortex. Our results showed that encoding and cue induced increased alpha oscillation in the visual cortex. In addition, anticipatory alpha oscillation was observed, which may reflect attention related processes. During encoding (memory maintenance), alpha oscillation was stronger than during processing of the memory cue (internal attention). In addition, alpha oscillation was stronger after a neutral cue than after a valid cue. This stronger alpha oscillation during encoding and due to neutral cue could reflect the greater VWM effort required by the memory load. Our study suggests that alpha oscillation would seem to play a role in both attentional and working memory processes. Examining at hemispheric differences, we found that alpha oscillation was stronger in the right hemisphere in both cue type. This may reflect the different roles of the hemispheres in the internal attention processes on the contrary to encoding, in which the hemispheres seem to work in the same way. The modulation of alpha oscillation caused by directing internal attention to mental representation seems to be individual. More research is needed with larger data sets and with different brain imaging techniques. The knowledge of the basis of memory and attention can be used, for example, to develop rehabilitation process for neurological disorders. Individuality of the occipital cortex responses in memory and attention processes encourages to examine memory and learning difficulties in an individual manner.

Keywords: internal attention, retro-cue, visual working memory, MEG, occipital cortex, alpha oscillation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	4
1.1	Visuaalinen havainnointi ja visuaalinen työmuisti	4
1.2	Tarkkaavuus ja visuaalinen työmuisti.....	4
1.3	Takaumavihjeet (retro-cue).....	6
1.4	Tarkkaavuuden ja työmuistin tutkiminen aivokuvantamismenetelmillä	8
1.5	Tutkimuskysymykset ja hypoteesit.....	9
2	MENETELMÄT	12
2.1	Aineisto	12
2.2	Koeasetelma.....	12
2.3	MEG-protokolla.....	14
2.4	Aineiston analysointi.....	15
2.4.1	<i>MEG-aineiston esikäsittely</i>	15
2.4.2	<i>MEG-aineiston analyysi</i>	15
2.4.3	<i>Tilastollinen analyysi</i>	16
3	TULOKSET.....	17
3.1	Rytmisen toiminnan modulaatio tehtävän aikana: visuaalinen tarkastelu	17
3.2	Rytmisen toiminnan modulaatio tehtävän aikana: tilastollinen tarkastelu.....	22
4	POHDINTA	27
4.1	Näköaivokuoren rytmisen toiminta mieleenpainamisen ja tarkkaavuuden kohdistamisen aikana	28
4.2	Muistiainekseen kohdistuvan vihjeen aiheuttama alfarytmien modulaatio näköaivokuorella ...	29
4.3	Yhteenveto tulosten merkityksestä	30
4.4	Alfarytmien rooli – tarkkaavuus vai työmuisti?	31
4.4.1	<i>Alfa-oskillaation ennakoiva voimistuminen</i>	31
4.4.2	<i>Voimistuvan alfa-oskillaation rooli kognitiivisissa toiminnoissa</i>	32
4.5	Tutkimuksen edut ja rajoitukset.....	33
4.6	Käytännön merkitys ja jatkotutkimusaiheita.....	34
	LÄHTEET	36
	LIITTEET.....	39

1 JOHDANTO

1.1 Visuaalinen havainnointi ja visuaalinen työmuisti

Havaitsemme näönvaraisesti jatkuvasti suuren määrän erilaisia elementtejä. Visuaalinen järjestelmä integroi nämä havaitut elementit yhtenäisiksi kokonaisuuksiksi, jolloin yksittäiset havainnot saavat merkityksen. Visuaalisesta kohteesta havainnoidaan esimerkiksi värejä, muotoja, sijaintia ja tekstuuria, jolloin esimerkiksi punaista, pyöreää esinettä havainnoitaessa saadaan muodostettua merkityksellinen kokonaisuus havainnoinnin kohteena olevasta pallosta (Park, Sy, Hong & Tong, 2017; Treisman, 1996).

Näönvaraisessa havainnoinnissa tärkeänä komponenttina on visuaalinen työmuisti. Visuaalinen työmuisti (engl. *visual working memory*, VWM) on keskeinen näönvaraisen tiedonkäsittelyn järjestelmä, joka mahdollistaa lyhytkestoisen visuaalisen informaation säilytyksen ja prosessoinnin muistissa. Lisäksi sen ansiosta ulkoiset näköärsykkeet voidaan yhdistää dynaamisiksi ja eheiksi kokonaisuuksiksi. (Ye ym., 2021.) Työmuistissa ylläpidetään ja käsitellään tietoa lyhytaikaisesti, ja sen vaiheisiin kuuluvat muistiaineksen mieleenpainaminen, ylläpito ja mieleenpalautus (Roux & Uhlhaas, 2014).

Visuaalisen työmuistin kapasiteetin on todettu olevan noin 3–4 muistettavaa yksikköä (Sperling, 1960; Luck & Vogel, 1997), jotka voidaan vaivattomasti ja tarkasti palauttaa muistista. Muistettavien objektien määrän kasvu sen sijaan lisää virheiden määrää muistista palautettaessa, jolloin suorituksesta tulee epätarkkaa. (Luck & Vogel, 1997.) Lisäksi monimutkaiset objektit kasvattavat muistikuormaa, jolloin työmuistin kapasiteetti pienenee. Tämä tapahtuu erityisesti niissä tilanteissa, kun muistettavan objektin tallennusaika on rajallinen. (Curby & Gauthier, 2007.)

1.2 Tarkkaavuus ja visuaalinen työmuisti

Visuaalinen muisti tallentaa lyhytaikaisesti tietoa enemmän kuin pystymme tietoisesti edes havaitsemaan. Ihminen voi kuitenkin suunnata tarkkaavuutensa haluamaansa kohteeseen muistissa ja näin ollen tuoda sen työmuistiin tietoisuuden kokemuksen piiriin. Visuaalisen työmuistin kapasiteetti on kuitenkin rajallinen ja sen vuoksi on tärkeää, että huomio kohdistuu havainnoinnin ja käsillä olevan

tehtävän kannalta olennaiseen visuaaliseen informaatioon (Hajonides, van Ede, Stokes & Nobre, 2020). Tarkkaavuudella tarkoitetaan kognitiivista järjestelmää, jonka avulla havainnoinnin kannalta olennaista aistitietoa erotellaan epäolennaisen informaation joukosta. Tämä olennainen informaatio painetaan mieleen ja se säilyy työmuistissa niin kauan, kuin sitä aktiivisesti ylläpidetään. Tämän jälkeen tieto siirtyy pitkäkestoiseen muistiin, josta se tarvittaessa palautetaan mieleen. (Koivisto, 2006, s. 195–197.)

Tarkkaavuus voidaan jakaa ulkoiseen ja sisäiseen tarkkaavuuteen (Chun, Golomb & Turk-Browne, 2011). Ulkoinen tarkkaavuus viittaa aisteista tulevan informaation valitsemiseen ja käsittelyyn, kun taas sisäisen tarkkaavuuden (engl. *internal attention*) avulla valikoidaan, käsitellään ja ylläpidetään sisäisesti muodostettua informaatiota, esimerkiksi työmuistin tai pitkäkestoisen muistin sisältöä (Ye, Hu, Ristaniemi, Gendron & Liu, 2016; Chun ym., 2011). Valikoivalla tarkkaavuudella tarkoitetaan kykyä valikoida tietty ärsyke tarkkaavuuden kohteeksi lukuisten ärsykkeiden joukosta. Valikoivaa tarkkaavuutta voidaan suunnata tahdonalaisesti yksilön tavoitteiden ja tehtävien mukaan, mutta myös tahattomasti esimerkiksi voimakkaan ärsykkeen ilmaantuessa, jolloin tarkkaavuus suuntautuu automaattisesti kyseiseen ärsykkeeseen. (Koivisto, 2006, s.197.) Valikoiva tarkkaavuus voidaan siis kohdistaa ulkoisiin ärsykkeisiin, mutta myös sisäisiin sensorisiin representaatioihin, joita ylläpidetään aktiivisina visuaalisessa työmuistissa. Sisäisillä sensorisilla representaatioilla voidaan tarkoittaa esimerkiksi visuaalisia mielikuvia ja muistoja, joihin tarkkaavuus voidaan jälkikäteen (engl. *retrospectively*) kohdistaa ja näin ollen tuoda jälleen työmuistiin. (Hajonides ym., 2020; Poch, Campo & Barnes, 2014.)

Yhteys visuaalisen työmuistin ja tarkkaavuuden välillä ei ole täysin selvä, ja näiden prosessien on tulkittu olevan osittain päällekkäisiä. Yhteyden tulkitsemista voi haastaa se, että visuaalisen työmuistin ja tarkkaavuuden väliset prosessit ovat kaksisuuntaisia. Visuaalinen tarkkaavuus vaikuttaa visuaalisen työmuistin piiriin tulevaan tietoon sekä visuaalisessa työmuistissa olevan sisällön jatkokäsittelyyn. (Hollingworth & Maxey-Richard, 2013). Tarkkaavuuden avulla siis valikoidaan se informaatio, joka päästetään sensorisesta muistista eli näköaistin kohdalla ikonisesta muistista jatkokäsittelyyn työmuistiin (Koivisto, 2006). Jatkokäsittelyyn pääsevä informaatio sisältää tehtävän kannalta oleellista tietoa, jota visuaalinen työmuisti pyrkii ylläpitämään aktiivisena mielessä. Tällöin aistikanavista tuleva uusi tieto ei pääse häiritsemään työmuistissa ylläpidettävää sisältöä. Toisaalta työmuistin sisältämä informaatio vaikuttaa siihen, mihin tarkkaavuutta kohdennetaan. Tämä tarkoittaa sitä, että työmuistin sisältämää informaatiota hallitaan tarkkaavuuden avulla, jolloin tarkkaavuuden kohteen muuttuessa uusi tehtävän kannalta olennainen informaatio pääsee visuaaliseen työmuistiin, ja aikaisemmin tarkkaavuuden kohteena ollut materiaali siirretään uuteen paikkaan viemästä työmuistin kapasiteettia. (Hollingworth & Maxey-Richard, 2013).

Tarkkaavuuden kohdistamista ulkoisiin ärsykkeisiin voidaan tutkia muun muassa hyödyntämällä silmänliikkeitä seuraavaa kameraa. Sen sijaan valikoivan tarkkaavuuden kohdistaminen sisäisiin ärsykkeisiin ja muistiainekseen on monimutkaisempi tutkimuskohde. Sisäisen tarkkaavuuden kohdistamista visuaaliseen muistiainekseen voidaan tutkia jälkikäteen annettavia muistivihjeitä hyödyntävän koeasetelman avulla. Tämän koeasetelman avulla saadut havainnot osoittavat, että objekteja ylläpidetään visuaalisessa työmuistissa valikoivasti visuaalisen tarkkaavuuden avulla. Havainnot tukevat vallitsevaa näkemystä visuaalisen työmuistin ja visuaalisen tarkkaavuuden välisestä yhteistyöstä (Griffin & Nobre, 2003; Hajonides ym., 2020; Hollingworth & Maxey-Richard, 2013). Tämän seurauksena viime aikoina on yhä enenevässä määrin oltu kiinnostuneita sisäisen tarkkaavuuden vaikutuksista visuaaliseen työmuistiin (Ye ym., 2021).

1.3 Takaumavihjeet (retro-cue)

Sisäisen tarkkaavuuden vaikutusta visuaaliseen työmuistiin voidaan tutkia takaumavihjeitä tai takautuvia vihjeitä (engl. *retrospective cues*, *retroactive cues*, "*retro-cues*") hyödyntävän koeasetelman avulla (Hajonides ym. 2020; Ye ym. 2021). Tyypillisessä takaumavihjetehtävässä tutkittavalle näytetään mieleen painettava kuva, jota seuraa takautuva muistivihje, minkä jälkeen alun perin näytetystä kuvasta tulee muistaa jokin osa. Takaumavihje osoittaa, mitä muistettavia aineksia muistitehtävässä tulee muistaa. Näin jälkikäteen annetut visuaaliset vihjeet ohjaavat tarkkaavuuden tiettyihin kohteisiin tai niiden sijainteihin muistissa ylläpidettävässä visuaalisessa representaatiossa. (Ye ym. 2021).

Sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisella on havaittu olevan hyötyä visuaalisen työmuistin suorituksen kannalta. Sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen aikaansaamaa mahdollista työmuistisuorituksen parantumista voidaan tutkia takaumavihjekoeasetelmalla (engl. *retro-cue paradigm*) esittämällä tutkittavalle sekä valideja että neutraaleja takaumavihjeitä, ja vertaamalla näiden aikaansaamaa vaikutusta muistisuoritukseen. Validit takaumavihjeet tarkoittavat sitä, että vihje osoittaa muistitehtävän kannalta olennaiseen kohteeseen, jolloin vihje tukee muistettavan aineksen muistamista (esimerkiksi sana "*väri*" tai "*suunta*"). Neutraalilla takaumavihjeellä puolestaan tarkoitetaan muistitehtävässä suoriutumisen kannalta merkityksetöntä vihjetä (esimerkiksi sana "*random*"). On havaittu, että kun sisäistä tarkkaavuutta kohdistetaan validin takaumavihjeen avulla, visuaaliseen työmuistiin liittyvä suoritus on parempaa kuin sisäistä tarkkaavuutta kohdistettaessa neutraalin takaumavihjeen avulla. Tällaista takaumavihjeen avulla

kohdistetun sisäisen tarkkaavuuden aikaansaamaa työmuistisuorituksen paranemista voidaan kutsua ”takaumavihjehyödyksi” (engl. *retro-cue benefit, RCB*). (Hollingworth & Maxey-Richard, 2013; Ye ym. 2021.)

Tarkkaavuuden ja työmuistin tutkimuskentällä ei täysin tunneta sitä mekanismia, jolla takaumavihjeiden avulla kohdistettu sisäinen tarkkaavuus saa aikaan muistisuorituksen paranemista. Erilaisia hypoteeseja siitä, miksi sisäisen tarkkaavuuden kohdistaminen parantaa muistisuoritusta, on kuitenkin esitetty. Muistisuoritus saattaa parantua esimerkiksi siitä syystä, että tarkkaavuuden kohdistamisen ansiosta työmuistissa pidettävä representaatio vahvistuu, tai koska tarpeetonta muistiaainesta poistetaan tämän prosessin myötä. On myös ehdotettu, että visuaalinen työmuisti kykenisi vastustamaan häiriöitä, kun tarkkaavuus kohdistetaan tiettyyn kohteeseen. Lisäksi on ehdotettu, että muistiainekseen kohdennettu tarkkaavuus suojaisi muistiaainesta ajan myötä tapahtuvalta muistirepresentaatioiden heikkenemiseltä. (Ye ym., 2016.) Hajonides ja kumppanit (2020) puolestaan ehdottavat, että sisäisen tarkkaavuuden kohdistaminen auttaa muuttamaan muistettavan visuaalisen ärsykkeen tehtäväsuuntautuneeseen muotoon, jolloin muistettavaa informaatiota voidaan vihjeen avulla optimoida tulevan tehtävän kannalta.

Visuaaliseen työmuistiin liittyvissä tehtävissä on perinteisesti käytetty kahdentyyppisiä takaumavihjeitä hyödyntäviä tehtäviä. Yksittäiseen kappaleeseen perustuvat takaumavihjeet (engl. *object-based retro-cue*) kohdistavat valikoivan tarkkaavuuden yhteen kappaleeseen muistiaineksessa, kun taas samanaikaisesti useiden eri kappaleiden yhteiseen ulottuvuuteen perustuvat takaumavihjeet (engl. *dimension-based retro-cue*) suuntaavat tarkkaavuuden samanaikaisesti yhteen visuaaliseen ulottuvuuteen kaikkien muistettavien kappaleiden joukosta. (Ye ym. 2021.) Esimerkiksi jos mieleen painettava kuva sisältää eri värisiä ja eri asennoissa olevia palkkeja, kappaleeseen perustuva takaumavihje suuntaa sisäisen tarkkaavuuden yhteen näistä palkeista, jolloin kyseisen palkin asento ja väri tulee muistaa. Ulottuvuuteen perustuva takaumavihje puolestaan kohdistaa sisäisen tarkkaavuuden kaikkien palkkien yhteen yhteiseen ominaisuuteen kuten väriin, jolloin tulee muistaa kaikkien palkkien värit.

Varhaisessa sisäisen tarkkaavuuden ja visuaalisen työmuistin tutkimuksessa on keskitytty tutkimaan tarkkaavuutta kappaleisiin perustuvien takaumavihjeiden avulla. Vasta viime aikoina on alettu hyödyntämään myös ulottuvuuteen perustuvia takaumavihjeitä. (Ye ym., 2021; Ye ym., 2016.) Sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen aikaansaama työmuistisuorituksen paraneminen kappaleisiin perustuvien takaumavihjeiden avulla on osoitettu jo useassa aikaisemmassa tutkimuksessa (Hollingworth & Maxey-Richard, 2013; Ye ym. 2021), ja ulottuvuuteen perustuvaan takaumavihjeeseen liittyvät hyödyt näyttävät noudattavan samaa linjaa (Hajonides ym. 2020; Ye ym. 2021; Ye ym. 2016).

Takaumavihjekoeasetelman avulla voidaan saada tietoa siitä, miten sisäisen tarkkaavuuden kohdistaminen työmuistissa ylläpidettäviin representaatioihin voi vaikuttaa muistin toimintaan. Menetelmällä voidaan tutkia, miten sisäisen tarkkaavuuden kohdistaminen muistiaineeseen parantaa muistisuoritusta. Kuitenkaan takaumavihjekoeasetelma itsessään ei tarjoa tietoa työmuistin ja tarkkaavuuden taustalla toimivista neuraalisista prosesseista, vaan niiden tutkimiseksi tulee hyödyntää erilaisia aivokuvantamismenetelmiä.

1.4 Tarkkaavuuden ja työmuistin tutkiminen aivokuvantamismenetelmillä

Tarkkaavuuden kohdistamisen vaikutusta työmuistiin voidaan tutkia hyödyntämällä takaumavihjekoeasetelmaa, ja neuraalisia mekanismeja näiden prosessien taustalla voidaan puolestaan tutkia erilaisten aivokuvantamismenetelmien avulla. Tarkkaavuuden ja työmuistin neuraalista perustaa onkin tutkittu yhdistämällä takaumavihjekoeasetelma aivojen aktiivisuutta ja sen muutosta eli modulaatiota mittaaviin elektroenkefalografiaan (EEG) ja magnetoenkefalografiaan (MEG).

Hermosolupopulaatiot synnyttävät sähköistä toimintaa, jota voidaan mitata aivosähkökäyrän eli EEG:n avulla päänahkaan kiinnitettyjen elektrodien välityksellä. Sähköisen toiminnan muutoksista aiheutuu pieniä muutoksia magneettikentässä, joita MEG puolestaan havaitsee ympäri päätä sijaitsevien herkkien sensoreiden avulla. (Hansen, Kringelbach, & Salmelin, 2010; Hari & Puce, 2017.) Sekä EEG että MEG ovat ajallisesti tarkkoja aivokuvantamismenetelmiä, jolloin pystytään tarkastelemaan millisekuntien tarkkuudella tapahtuvia muutoksia aivojen aktiivisuudessa. MEG:n etuna on aktivaation lähteen paikallistaminen tarkasti magneettikenttien ansiosta. (Hari & Puce, 2017.)

Tarkkaavuus ja visuaalinen työmuisti ovat olennainen osa visuaalisen informaation prosessointia. Tämänkaltaista informaation prosessointia aivoissa on pitkään pyritty ymmärtämään aivorytmien eli oskillaatioiden kautta (Buzsáki & Freeman, 2015). Aivorytmeistä erityisesti alfa-taajuus (8-13 Hz) on ollut pitkään kiinnostuksen kohteena, koska alfarytmi vaikuttaisi olevan keskeinen visuaalisten ärsykkeiden käsittelyn kannalta. Posteriorisen alfa-oskillaation on perinteisesti ajateltu heijastelevan visuaalisen järjestelmän lepotilaa. Voimakkaan alfa-aallon on ajateltu indikoivan sitä, että kyseiset aivoalueet eivät käsittele ulkoista informaatiota, kun taas alfa-aallon amplitudin pienentyminen heijastelisi aktiivista prosessointia. (Hari & Puce, 2017; Walter, 1938). Tämä on kuitenkin hyvin yksinkertaistettu ajatus, ja erilaisia teorioita alfa-oskillaation funktionaalisesta roolista kognitiivisille prosesseille on esitetty. (Hari & Puce, 2017). Teorioiden mukaan alfa-oskillaatio voisi ilmentää joko

tarkkaavuuden (Jensen & Mazaheri, 2010; Poch ym., 2014) tai työmuistin (Jensen, Gelfand, Kounios & Lisman, 2002) operaatioita. Kuitenkin keskustelu jatkuu, sillä yksimielistä näkemystä ei ole saavutettu.

Takaumavihjekoeasetelmaa on hyödynnetty yhdessä aivokuvantamismenetelmien kanssa sisäisen tarkkaavuuden ja työmuistin neuraalisen perustan tutkimiseksi. Tutkimukset ovat osoittaneet, että alfa-taajuudessa tapahtuu modulaatiota kohdistettaessa sisäistä tarkkaavuutta muistiaineeseen (Hajonides ym., 2020; Myers, Walther, Wallis, Stokes & Nobre, 2015; Poch, Capilla, Hinojosa & Campo, 2017). Lisäksi on havaittu, että sisäisen tarkkaavuuden kohdistaminen muistiaineeseen saa aikaan erilaista alfa-oskillaation modulaatiota eri aivopuoliskoissa (Myers ym., 2015; Poch ym., 2014; Poch ym., 2017) Lisää tutkimusta aiheesta tarvitaan, jotta saadaan tietoa siitä, miten sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen aikaansaamat hyödyt näyttäytyvät hermostollisella tasolla ja mistä ne johtuvat. Lisäksi eri takaumavihjetyyppien vaikutusta sisäisen tarkkaavuuden prosesseihin tulisi tutkia hyödyntäen erilaisia aivokuvantamismenetelmiä.

Sisäisen tarkkaavuuden ja työmuistin neuraalista perustaa kartoittavat takaumavihjetutkimukset on pääsääntöisesti toteutettu hyödyntämällä EEG-kuvantamista. Samankaltaisia tutkimuksia, jossa olisi hyödynnetty MEG:tä, löytyi vain vähän, joten lisää tutkimusta aiheesta tarvitaan. Lisäksi ulottuvuuteen perustuvan takaumavihjeen aikaansaaman sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen hermostollista perustaa ei ole juurikaan tutkittu, minkä vuoksi on tärkeää tutkia aihetta lisää (Poch ym., 2017).

1.5 Tutkimuskysymykset ja hypoteesit

Tutkimuksessamme halusimme laajentaa takaumavihjekoeasetelmaa verrattuna aikaisempiin EEG-tutkimuksiin hyödyntämällä magnetoenkefalografiaa (MEG), jonka etuna on luotettavampi signaalin paikannus. Aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen parantavan muistisuoritusta, mutta neuraaliset prosessit ilmiön taustalla ovat vielä epäselvät. Tämän tutkimuksen toivomme tuovan lisää tietoa siitä, kuinka visuaaliseen muistiaineeseen kohdistuva sisäinen tarkkaavuus vaikuttaa näköaivokuoren toimintaan. Tutkimme tätä aihetta eksploratiivisella tutkimusotteella, sillä tällaista koeasetelmaa ei ole aiemmin tutkittu MEG:llä, ja tutkimuksessa pyrittiin selvittämään koeasetelman toteutettavuutta.

Tässä tutkimuksessa keskityttiin tarkastelemaan ulottuvuuteen perustuvaa takaumavihjettä, sillä se on tehtävätyyppinä vähemmän tutkittu, ja lisäksi aivopuoliskojen erilainen moduloituminen

haluttiin ottaa huomioon. Kappaleeseen perustuva takaumavihje kohdistaa sisäisen tarkkaavuuden toiselle puolelle näkökenttää nuolivihjeiden kautta, mikä voi aiheuttaa erilaista modulaatiota samalla tai vastakkaisella puolella sijaitsevassa aivopuoliskossa suhteessa kuvan sijaintiin näkökentässä. Ulottuvuuteen perustuva takaumavihje puolestaan kohdistaa huomion samanaikaisesti kaikkiin esitettyihin kappaleisiin eli kumpaankin näkökentän puoliskoon, jolloin vihjeen aikaansaama aivopuoliskojen erilainen moduloituminen on huomioitu.

Tutkimuksemme päätarkoituksena oli selvittää aivokuoren rytmisen toiminnan modulaation roolia sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisessa muistiaineeseen. Tutkimme, mitä kuvan näkeminen ja tarkkaavuuden kohdistaminen muistikuvaan aiheuttavat näköaivokuorella. Tätä tarkastelimme havainnoimalla, millaista alfa-oskillaation modulaatiota aiheutuu näytettävän kuvan mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen seurauksena. Lisäksi tutkimme sitä, miten näköaivokuori reagoi takaumavihjeen esittämiseen. Tätä tutkittiin vertaamalla keskenään kahta tilannetta, joista toisessa takaumavihje oli validi eli tarjosi informaatiota muistin tueksi, kun taas toisessa takaumavihje oli neutraali eli se ei tukenut muistamista. Koska tutkimuksessa oli vain viisi tutkittavaa, jokaisen aineistoa tarkasteltiin perusteellisesti ja yksilötasolla.

Tutkimuskysymys 1: Millä tavoin näköaivokuoren rytmisen toiminta moduloituu visuaalisen muistiaineen mieleenpainamisen sekä sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen aikana?

- a) Aiheuttaako mieleenpainaminen alfa-oskillaation modulaatiota suhteessa tehtävää edeltävän alfarytmin tasoon näköaivokuorella?
- b) Aiheuttaako takaumavihjeen esittäminen alfa-oskillaation modulaatiota suhteessa tehtävää edeltävän alfarytmin tasoon näköaivokuorella?
- c) Eroavatko mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen aikaansaamat alfa-oskillaation modulaatiot toisistaan näköaivokuorella?
- d) Eroavatko alfa-oskillaation modulaatiot vasemman ja oikean aivopuoliskon välillä mieleenpainamisen ajanjakson aikana näköaivokuorella?
- e) Eroavatko alfa-oskillaation modulaatiot vasemman ja oikean aivopuoliskon välillä takaumavihjeen esittämisen aikana näköaivokuorella?

Tutkimuskysymys 2: Millä tavalla muistiaineeseen kohdistuva takaumavihje vaikuttaa näköaivokuoren alfa-oskillaatioon?

- a) Vaikuttaako vihjetyyppi alfa-oskillaation modulaatioon näköaivokuorella?
- b) Eroavatko neutraalin ja validin takaumavihjeen aikaansaaman alfa-oskillaation modulaatiot aivopuoliskoittain näköaivokuorella?
- c) Eroavatko alfa-oskillaation modulaatiot vasemman ja oikean aivopuoliskon välillä riippumatta vihjetyypistä näköaivokuorella?

Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu sisäistä tarkkaavuutta suuntaavan takaumavihjeen aiheuttavan alfa-oskillaation modulaatiota näköaivokuorella, mutta siitä, vaimeneeko vai voimistuuko alfa-aalto takaumavihjeen seurauksena, ei ole yhtenäistä näkemystä (Poch ym., 2014; Poch ym., 2017). Näin ollen oletamme, että muistijoukon esittämisen lisäksi myös vihjeen esittäminen saa aikaan näköaivokuoren alfa-oskillaation modulaatiota, mutta emme tee oletuksia modulaation suunnasta. Aiempaa tutkimusta mieleenpainamisen ja takaumavihjeen aikaansaaman alfa-oskillaation modulaatioiden vertailusta ei löytynyt, joten emme tee oletuksia sen suhteen, eroavatko muistijoukon ja takaumavihjeen aikaansaamat alfa-oskillaation modulaatiot toisistaan. Näin ollen emme myöskään aseta oletuksia siitä, eroavatko aivopuoliskojen alfa-oskillaation modulaatiot toisistaan mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen aikana tai eri vihjetyyppien välillä.

Hajonides ja kumppanit (2020) havaitsivat EEG-mittauksissa, että validi takaumavihje sai aikaan näköaivokuoren alfa-oskillaation vaimenemista, mitä ei kuitenkaan havaittu neutraalin takaumavihjeen kohdalla. Näin ollen oletamme, että validi takaumavihje saisi aikaan alfa-oskillaation vaimenemista verrattuna neutraalin takaumavihjeen aikaansaaman alfa-oskillaation modulaatioon.

2 MENETELMÄT

2.1 Aineisto

Aineisto kerättiin Jyväskylän monitieteisessä aivotutkimuskeskuksessa huhtikuussa 2022, ja se koostui viiden tutkittavan MEG-mittauksista. Tutkittavat suorittivat muistitehtävän takaumavihjeillä, jonka tarkoituksena oli kuvata, miten sisäisen tarkkaavuuden kohdistaminen muistiaineeseen moduloi alfa-oskillaatiota näköaivokuorella. Tutkimusasetelmana on laajennettu tapaustutkimus (engl. *extended case study*), jossa jokaisen tutkittavan yksilöllisten aivomittausten perusteella pyritään selvittämään moniosaisen muistitehtävän aikaista rytmisen toiminnan modulaatiota eksploratiivisella tutkimusotteella.

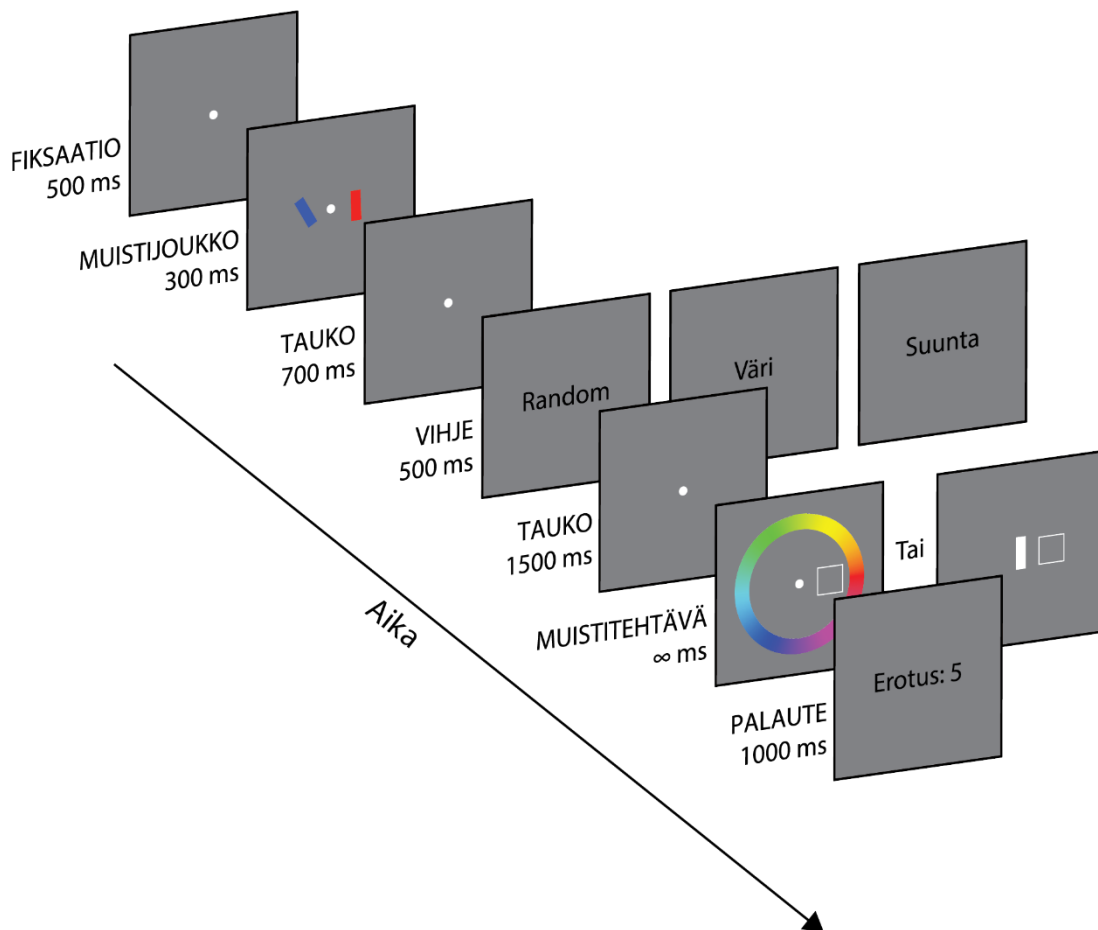
Osallistajat olivat 20–30 -vuotiaita korkeakouluopiskelijoita, jotka olivat kiinnostuneita MEG-tutkimukseen osallistumisesta. Koska kyseessä oli pilottimittaus, tutkittavien osallistumiselle ei asetettu muita rajoituksia kuin kehon metallittomuus. Aineisto koostui neljästä naisesta (80 %) ja yhdestä miehestä (20 %). Tutkittavat suorittivat kaksi takaumavihjetehtävää (kappaleeseen ja ulottuvuuteen perustuvat takaumavihjetehtävät), mutta tässä tutkimuksessa raportoidaan tulokset vain ulottuvuuteen perustuvasta takaumavihjetehtävästä.

2.2 Koeasetelma

Ulottuvuuteen perustuvassa takaumavihjetehtävässä oli tarkoituksena muistaa kaksi eri väristä ja eri suuntaan aseteltua värikästä palkkia (pituus 1.1° , korkeus 0.4°), jotka sijaitsivat eri puolilla näkökenttää (kuva 1). Esitettyjen palkkien värit ja suunnat valikoitiin satunnaisesti 360 värin ja 180 mahdollisen kulman joukosta ($1^\circ - 180^\circ$). Takaumatehtävässä mieleenpainettavat näköärsykkeet vastasivat Yen ja kollegoiden (2021) tutkimuksessa käytettyjä ärsykeitä. Palkkien esittämisen jälkeen tutkittaville esitettiin takaumavihje (*retro-cue*), jonka jälkeen hänen tuli raportoida palkkien oikea suunta tai väri käyttämällä hiiren kursoria. Ennen varsinaista takaumatehtävää tutkittavat saivat harjoitella tehtävää tarpeelliseksi kokemansa ajan sen varmistamiseksi, että he ovat ymmärtäneet tehtävänannon ja käytettävien laitteiden toimintaperiaatteen. Ulottuvuuteen perustuvassa tehtävässä validi takaumavihje oli keskellä näyttöä oleva ”VÄRI”- tai ”SUUNTA”-teksti, joka pyrki

kohdistamaan sisäisen tarkkaavuuden samanaikaisesti molempien palkkien kyseiseen ominaisuuteen. Neutraali takaumavihje oli näytöllä oleva ”RANDOM”-teksti, jolloin takaumavihje ei tarjonnut palkkeihin liittyvää informaatiota muistamisen tueksi, vaan tutkittavan tuli pitää mielessään koko nähty kuva. Tämän jälkeen näytölle ilmestyi joko värikäs ympyrä (sisempi säde 5.8° , paksuus 2.2°), jolloin tutkittava raportoi muistettavan palkin värin, tai valkoinen palkki ($1.1^\circ \times 0.4^\circ$), jolloin tutkittava raportoi muistettavan palkin suunnan. Vasta tässä vaiheessa tutkittava sai tietää valkoisen neliön ($1.2^\circ \times 1.2^\circ$) avulla, kumman palkin ominaisuus hänen täytyi raportoida. Valkoinen neliö sijaitsi näytöllä siinä kohdassa, missä muistista palautettava palkki oli sijainnut. Väriin liittyvä vastaus annettiin valitsemalla oikea sävy väriympyrältä optisen hiiren avulla. Suuntaan liittyvä vastaus ilmoitettiin puolestaan kääntämällä valkoista vastauspalkkia näytöllä haluttuun suuntaan hiiren painalluksilla.

Takaumatehtävässä palkkeja näytettiin 300 ms:n ajan, jota seurasi 700 ms:n tauko. Tämän jälkeen näytölle ilmestyi takaumavihje, jota näytettiin 500 ms. Tätä seurasi jälleen 1500 ms tauko, jonka jälkeen näytölle ilmestyi tehtäväosio, jossa vastaus tuli raportoida. Raportointivaihe kesti niin kauan, kunnes tutkittava vastasi, ja vastaamisen jälkeen tutkittava sai palautetta suorituksestaan. Palauteosiossa tutkittavalle ilmoitettiin erotusluku, joka perustui siihen, kuinka lähellä hän oli ollut oikeaa vastausta. Tehtävä koostui neljästä noin 10 minuuttia kestävästä osiosta koko tehtävän kestäessä yhteensä 45–60 minuuttia riippuen tutkittavan vastausnopeudesta. Osioiden välissä pidettiin pieni tauko, ja taukojen aikana oli mahdollista esimerkiksi jaloitella. Yhteensä koko tehtävässä oli 320 trialia eli muistettavan kuvan, vihjeen ja tehtäväosion kokonaisuutta.



Kuva 1. Ulottuvuuteen perustuva takaumavihjetehtävä. Ensin takaumatehtävässä tuli fiksaatoruutu, jonka jälkeen näytölle ilmestyi kuva palkeista, jotka tutkittavan tuli painaa mieleen. Tätä seurasi tauko, jonka jälkeen tutkittavalle esitettiin takaumavihje (teksti *suunta*, *random* tai *väri*). Takaumavihjettä seurasi jälleen tauko, jonka jälkeen tutkittavan tuli antaa vastaus muistitehtävään. Vastauksen annettuaan tutkittava siirtyi palauteruutuun hiiren painalluksella.

2.3 MEG-protokolla

Ennen tehtävän aloittamista tutkittavien pään muoto digitoitiin Polhemus Fastrak 3D Digitizer and Quad Sensor Motion Tracker -laitteella (Polhemus, Vermont, USA). Tutkittavien päänahalle asetettiin viisi kelaa (engl. *coil*), joiden avulla seurattiin pään liikkeitä mittauksen aikana. Lisäksi silmänliikkeitä mitattiin elektro-okulografian (EOG) ja sydämen sykettä elektrokardiografian (EKG) avulla, jotta näiden signaalien aiheuttamat häiriöt saataisiin minimoitua.

Tutkittavat suorittivat tehtävän magneettisesti suojatussa ja eristetyssä huoneessa (VacuumSchmelze GmbH, Hanau, Saksa), ja heidän aivoaktiivisuuttaan mitattiin 306-kanavaisella Elekta Neuromag -järjestelmällä (Elekta Oy, Helsinki, Suomi). Tutkittava suoritti tehtävän suoja huoneessa kypäränmallisessa MEG-mittalaitteessa, ja hänen edessään noin metrin etäisyydellä

oli näyttö, johon takaumatehtävä heijastettiin käyttäen Presentation-ohjelmistoa. Tutkittava vastasi takaumatehtävään käyttämällä optista hiirtä, joka on yhteensopiva MEG-laitteen kanssa. Aineisto kerättiin 1000 Hz:n keräystaajuudella käyttäen 330 Hz:n alipäästösuodatusta ja 0.03 Hz:n ylipäästösuodatusta.

2.4 Aineiston analysointi

2.4.1 MEG-aineiston esikäsittely

MEG-aineistolle toteutettiin ensin kohinan poisto Maxfilter-ohjelmassa, joka poistaa pään ulkopuolelta tulevat häiriösignaalit MEG-mittausaineistosta. Kohinan poiston jälkeen aineistoon tehtävät jatkokäsittelyt suoritettiin Jyväskylän yliopiston MEGGIE-ohjelmalla.

MEGGIE-ohjelmalla MEG-aineistolle toteutettiin kaistanpäästösuodatus välille 1–40 Hz. Tämän jälkeen silmänliikkeiden ja sydämen sykkeen aiheuttamien häiriösignaalien poistamiseksi aineistosta käytettiin ICA-menetelmää (engl. *independent component analysis*). Näiden jälkeen MEG-signaalista muodostettiin kolme eri aikaikkunaa (engl. *epoch*) erilaisilla kriteereillä analyysiä varten. Aikaikkunat luotiin välille -2200 ms – 2000 ms vihjeen alkamisajankohdan ollessa nollakohtana ja kontrolliajanjakson (engl. *baseline*) ollessa -2000 ms – (-1800 ms). Aikaikkunat muodostettiin yhteisesti kaikille takaumavihjeille (sisältäen neutraalit ja validit vihjeet) sekä erikseen vain valideille ja neutraaleille takaumavihjeille.

2.4.2 MEG-aineiston analyysi

Muodostetuista aikaikkunoista laskettiin aika-taajuuskuvaajat (engl. *time-frequency representation*, *TFR*) jokaiselle tutkittavalle taajuusvälille 5–29.5 Hz. Kuvaajat laskettiin ajanjaksolle -2000 ms – 1800 ms, jossa kontrolliajanjakso (engl. *baseline*) oli -2000 ms – (-1800 ms). TFR-kuvaajia havainnoitiin silmämääräisesti robustin rytmisen toiminnan modulaation havaitsemiseksi takaumatehtävän eri vaiheissa. Tämän jälkeen laskettiin TSE-aikasarjat (engl. *temporal spectral*

evolution). TSE:t laskettiin aivojen takaraivolohkon päällä olevien kanavien keskiarvona. Koska kiinnostuksen kohteena oli alfa-taajuudessa tapahtuvat modulaatiot, rajattiin voimakkuuden vaihtelua kuvaava aikasarja (TSE) kattamaan 7–13 Hz. TSE-aikasarjojen keskiarvoista eroteltiin Microsoft Excel -laskentataulukko-ohjelmistolla mieleenpainamiseen (-1000 ms – (0.05 ms)) ja vihjeeseen (0 ms – 1495 ms) liittyvät ajanjaksot. Näistä ajanjaksoista laskettiin alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvot näköaivokuorella. Alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvojen jatkoanalyysit suoritettiin IBM SPSS Statistics 26 –ohjelmistolla.

2.4.3 Tilastollinen analyysi

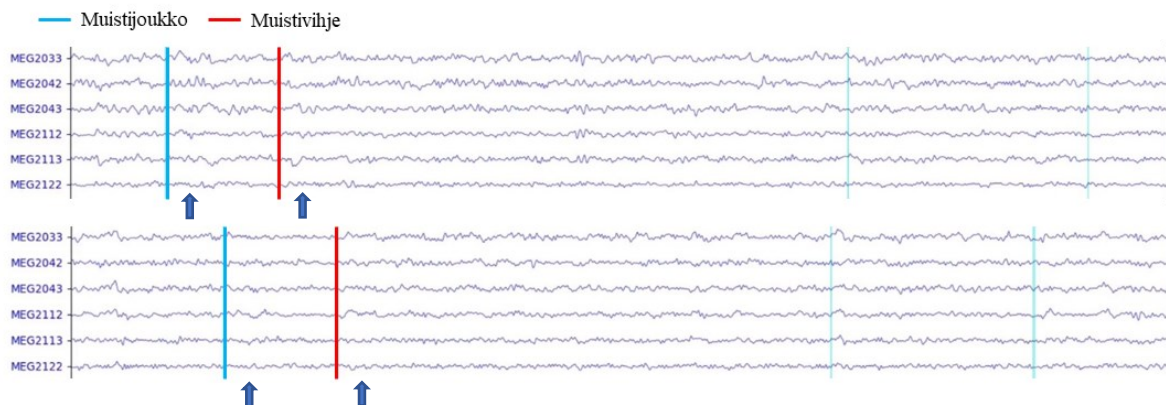
Alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvoille tehtiin muunnos tilastollisten testien tulkinnan helpottamiseksi siten, että jokainen luku kerrottiin arvolla 10^{22} . Tilastollinen testaus molempiin tutkimuskysymyksiin liittyen suoritettiin Wilcoxonin testillä, sillä normaalijakaumaoletus ei täytynyt (LIITE 1). Efektikokoja tutkittiin hyödyntämällä Cohenin d :tä. Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen liittyen tarkasteltiin ensin visuaalisesti jatkuvaa MEG-mittausaineistoa suhteessa esitettyihin ärsykkeisiin. Tämän jälkeen verrattiin tilastollisesti Wilcoxonin testillä mielenpainamisen alfa-oskillaation maksimi-amplitudiarvoa ja takaumavihjeeseen liittyvää alfa-oskillaation maksimi-amplitudiarvoa keskenään vasemmalla ja oikealla aivopuoliskossa. Lisäksi aivopuoliskon merkitystä selvitettiin vertailemalla vasemman ja oikean aivopuoliskon alfa-oskillaation maksimi-amplitudiarvoja mielenpainamisen aikaikkunassa sekä vihjeen esittämisen aikaikkunassa.

Toiseen tutkimuskysymykseen liittyen vertailtiin Wilcoxonin testillä validin ja neutraalin takaumavihjeen aikaansaamia alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvoja. Takaumavihjetyypin ja aivopuoliskon vaikutusta tutkittiin tarkastelemalla niiden interaktiota sekä vertailemalla takaumavihjetyyppejä toisiinsa kussakin aivopuoliskossa. Interaktion laskemiseksi muodostettiin erotusmuuttujat validille ja neutraalille vihjeelle siten, että vasemman aivopuoliskon alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvosta vähennettiin oikean aivopuoliskon alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvo. Interaktiota tutkittiin vertailemalla muodostettuja erotusmuuttujia toisiinsa. Interaktion jälkeen tehtiin parivertailu takaumavihjetyyppien välillä vasemmalla ja oikealla aivopuoliskossa. Viimeiseksi selvitettiin aivopuoliskon merkitystä vihjeen aikaikkunassa vertailemalla validin vihjeen alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvoja oikean ja vasemman aivopuoliskon välillä sekä neutraalin vihjeen alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvoja oikean ja vasemman aivopuoliskon välillä.

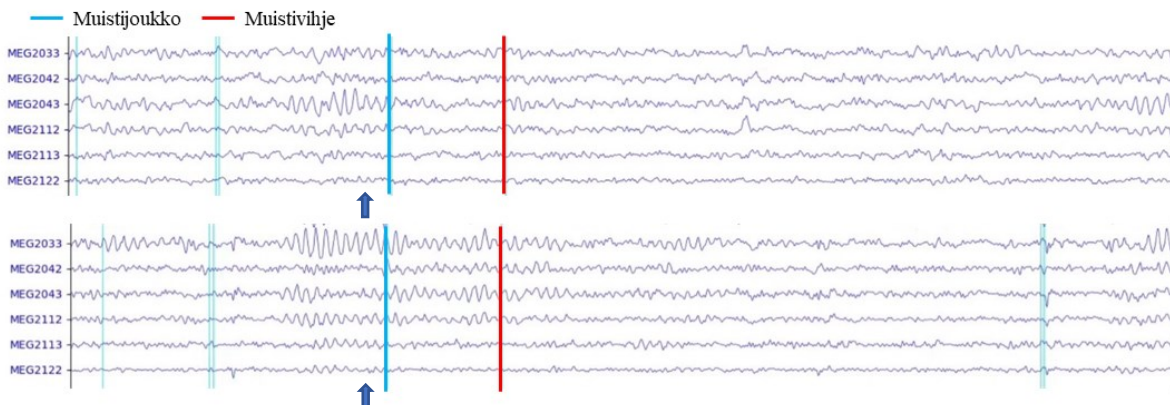
3 TULOKSET

3.1 Rytmisen toiminnan modulaatio tehtävän aikana: visuaalinen tarkastelu

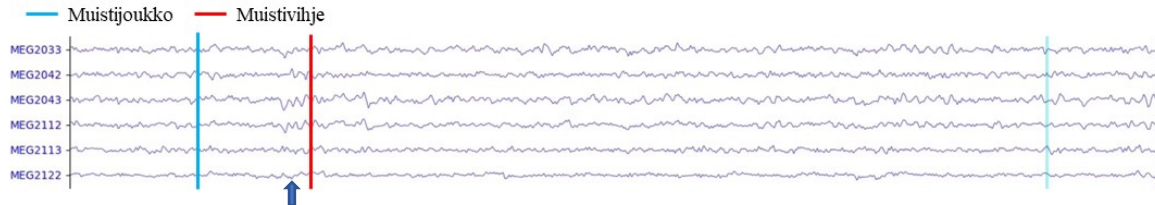
Raakadataa tarkasteltaessa havaittiin, että muistijoukon ja takaumavihjeen esittäminen aiheuttivat erilaista rytmistä modulaatiota tutkittavien välillä. Jokaisella tutkittavalla ilmeni rytmisen toiminnan modulaatiota muistijoukon ja vihjeen esittämisen jälkeen, mikä erottui selkeimmin tutkittavien 1 ja 2 raakadatasta (ks. kuva 2). Kuitenkin kolmella tutkittavalla ilmeni rytmisen toiminnan modulaatiota ennakoivasti joko ennen muistijoukon tai ennen vihjeen esittämistä. Näistä kahdella tutkittavalla ennakoivaa rytmisen toiminnan modulaatiota ilmeni ennen muistettavan kuvan esittämistä (ks. kuva 3), ja yhdellä tutkittavalla puolestaan ennen vihjeen esittämistä (ks. kuva 4).



Kuva 2. Raakadata tutkittavilta 1 (ylhäällä) ja 2 (alhaalla). Rytmisen toiminnan modulaatiota ilmenee muistijoukon esittämisen ja vihjeen esittämisen jälkeen.



Kuva 3. Raakadata tutkittavilta 3 (ylhäällä) ja 4 (alhaalla). Ennakoivaa rytmisen toiminnan modulaatiota ilmenee ennen muistijoukon esittämistä.

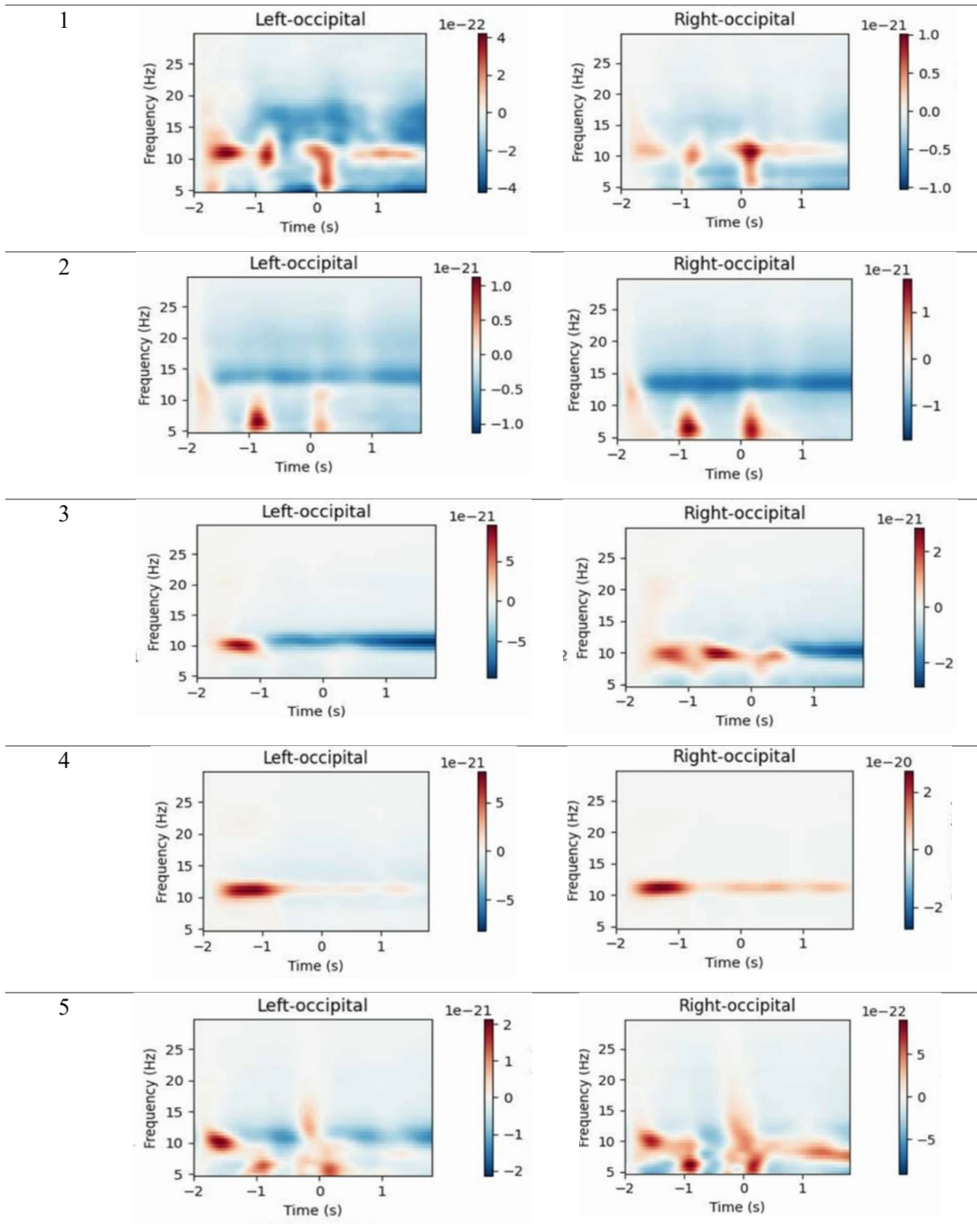


Kuva 4. Raakadata tutkittavalta 5. Ennakoivaa rytmisen toiminnan modulaatiota ilmenee ennen vihjeen esittämistä.

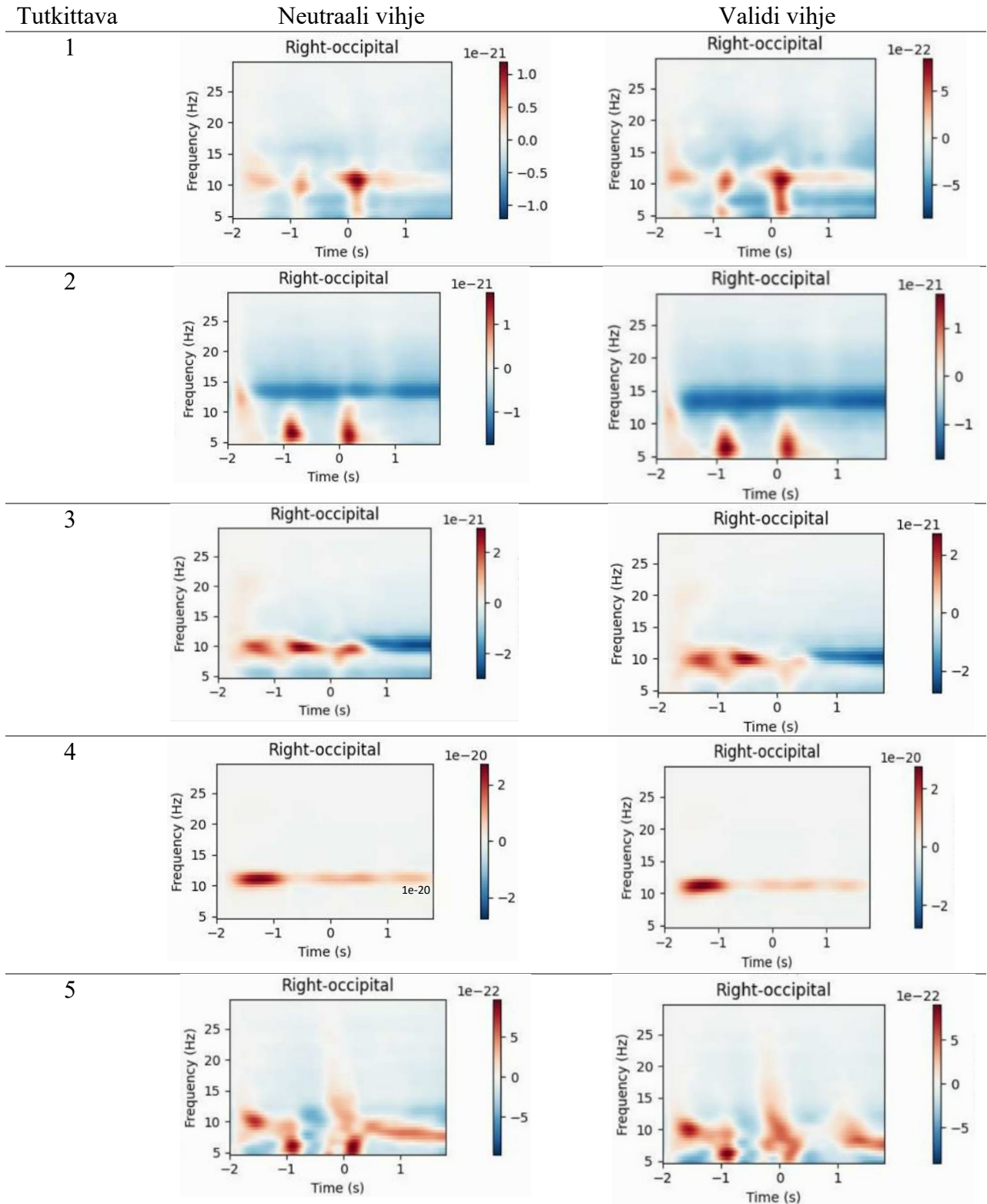
Aineiston tarkemmaksi kuvailemiseksi muodostettiin aika-taajuuskuvaajat (engl. *time-frequency representation, TFR*), joista voidaan nähdä rytmisen toiminnan modulaatio 5–29.5 Hz:n taajuuskaistalla. Kuvista 5, 6 ja 7 havaitaan, että rytmisen toiminnan modulaatiota ilmenee erityisesti alfan taajuuskaistalla (8–13 Hz) tehtävän eri vaiheiden mukaan. TFR-kuvaajien perusteella havaitaan myös, että alfa-oskillaatio moduloituu hieman eri tavalla tutkittavien välillä. Osalla tutkittavista havaitaan matalataajuisia rytmisen toiminnan modulaatiota näköaivokuorella, joka näyttää liittyvän ärsykkeiden esittämiseen siten, että voimakkuus kasvaa välittömästi muistijoukon ja/tai takaumavihjeen esittämisen jälkeen ja sitten häviää. Tämä saattaa vaikuttaa siihen, kuinka alfa-oskillaation modulaatio ilmenee TFR-kuvaajissa.

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen liittyen vertailtiin näköaivokuoren alfa-oskillaation moduloitumista mieleenpainamisen ja takaumavihjeeseen liittyvien ajanjaksojen välillä aivopuoliskoittain. Kuvasta 5 havaitaan, että muistijoukko ja takaumavihje aiheuttavat pääsääntöisesti voimistunutta alfa-oskillaatiota. Tarkempi tarkastelu osoittaa, että TFR-kuvaajat ovat erilaisia tutkittavien välillä. Toisilla koehenkilöillä nähdään lisäksi niin kutsuttua ennakoivaa alfarytmien voimistumista jo ennen muistijoukon tai vihjeen esittämistä aivopuoliskoittain hieman eri tavoin (tutkittavat 3, 4 ja 5). Täten TFR-kuvaajat tukevat raakadatasta tehtyjä havaintoja.

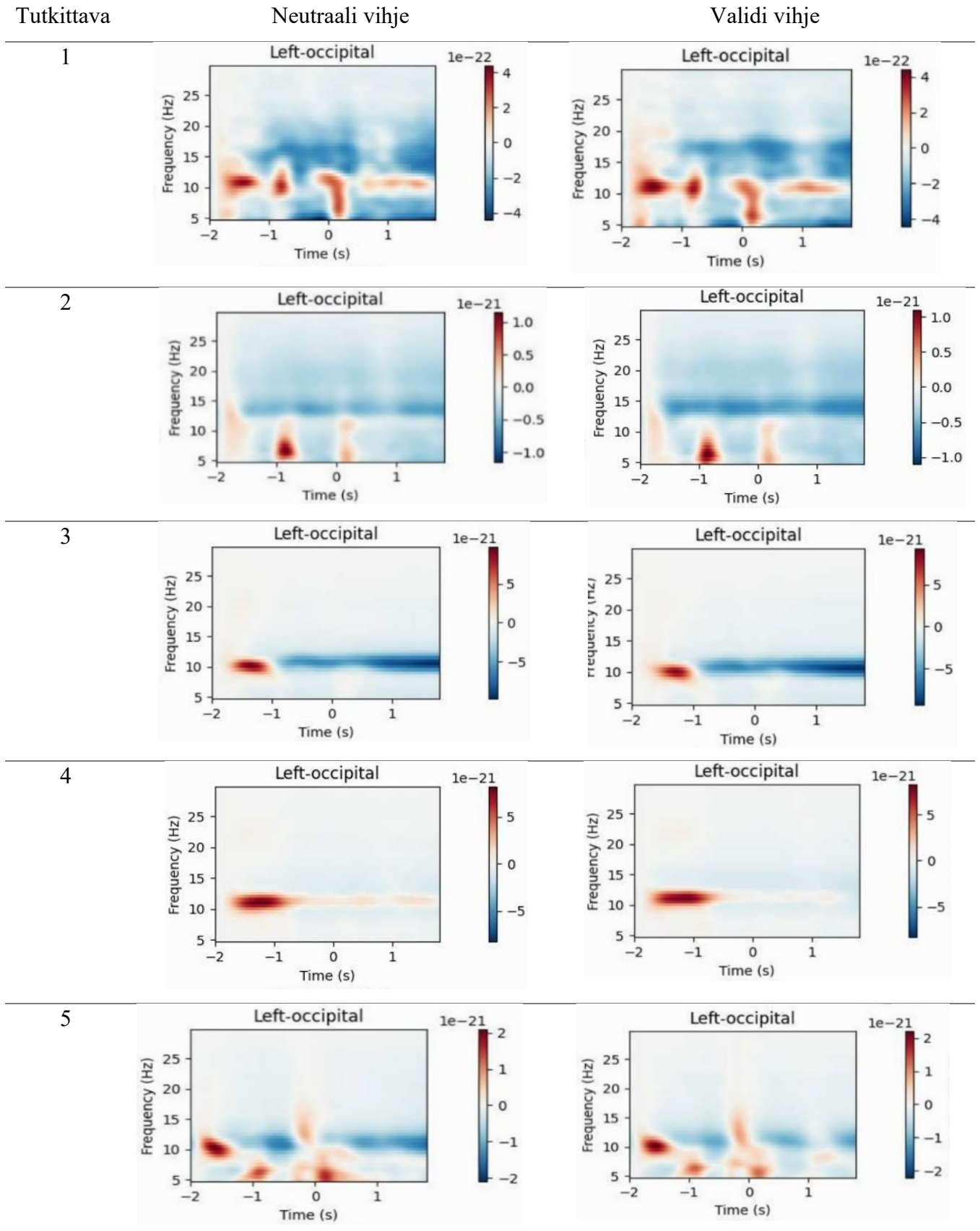
Toiseen tutkimuskysymykseen liittyen vertailtiin validin ja neutraalin vihjeen aikaansaamaa alfa-oskillaation moduloitumista näköaivokuorella. Kuvista 6 ja 7 havaitaan, että validin ja neutraalin vihjeen esittäminen saavat aikaan keskenään samankaltaista alfa-oskillaation modulaatiota kunkin tutkittavan näköaivokuorella. Vihjeen aikaansaama alfa-oskillaation modulaatio on kuitenkin erilaista eri tutkittavien välillä. Lisäksi havaitaan pieniä eroja takaumavihjeen aikaansaamassa alfa-oskillaation modulaatiossa eri aivopuoliskojojen välillä.



Kuva 5. Näköaivokuoren TFR-kuvaajat jokaiselta tutkittavalta aivopuoliskoittain 5–29.5 Hz:n taajuudella gradiometri-sensoreilla mitattuna. TFR-kuvaajat sisältävät sekä neutraalit että validit vihjeet. Muistijoukko esitettiin ajanhetkellä -1 s ja takaumavihje 0 s. Huom. Aktivaation voimakkuus on skaalattu kullekin yksittäiselle sensorille erikseen.



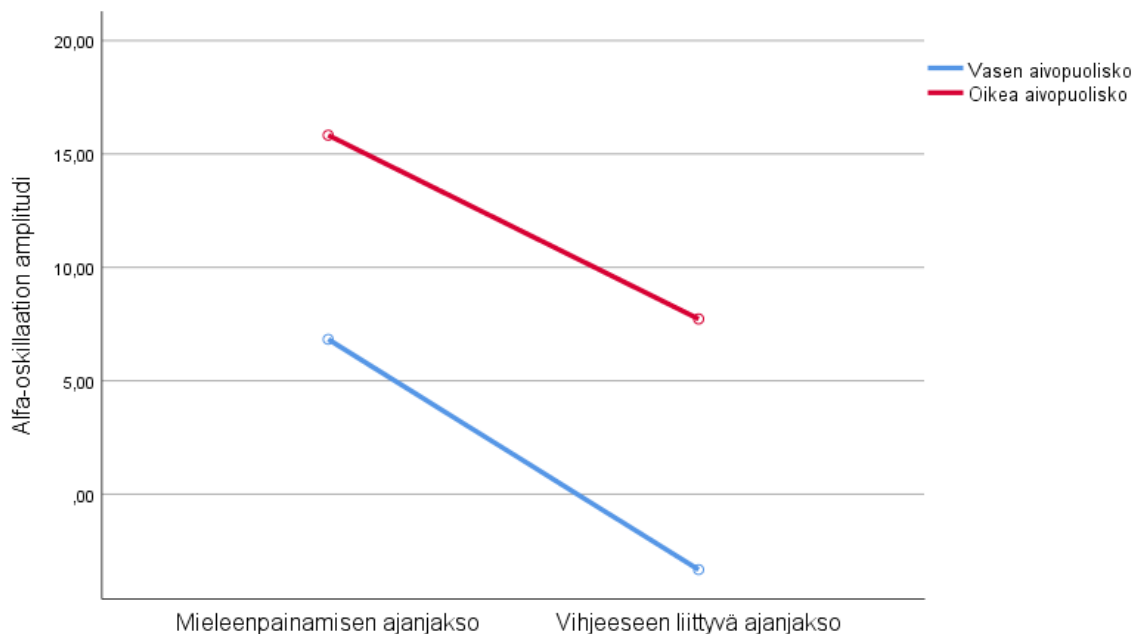
Kuva 6. Oikea aivopuolisko. Näköaivokuoren TFR-kuvaajat jokaiselta tutkittavalta 5–29.5 Hz:n taajuuudella gradiometri-sensoreilla mitattuna. TFR-kuvaajissa on eroteltu neutraalit ja validit vihjeet. Muistijoukko esitettiin ajanhetkellä -1 s ja takaumavihje 0 s. Huom. Aktivaation voimakkuus on skaalattu kullekin yksittäiselle sensorille erikseen.



Kuva 7. Vasen aivopuolisko. Näköaivokuoren TFR-kuvaajat jokaiselta tutkittavalta 5–29.5 Hz:n taajuudella gradiometri-sensoreilla mitattuna. TFR-kuvaajissa on eroteltu neutraalit ja validit vihjeet. Muistijoukko esitettiin ajanhetkellä -1 s ja takaumavihje 0 s. Huom. Aktivaation voimakkuus on skaalattu kullekin yksittäiselle sensorille erikseen.

3.2 Rytmisen toiminnan modulaatio tehtävän aikana: tilastollinen tarkastelu

Mieleepainamisen ja takaumavihjeen ajanjaksot. Mieleepainamisen ja takaumavihjeen esittämisen ajanjaksoissa ilmenevää alfa-oskillaation modulaatiota vertailtiin näköaivokuoren alfa-oskillaation maksimiampplitudien avulla (ks. kuva 8). Vertailun perusteella havaittiin, ettei mieleepainamisen ja vihjeen esittämisen ajanjaksojen amplitudien maksimiarvoissa ollut tilastollisesti merkitsevää eroa (taulukko 1). Kuitenkin vasemmassa aivopuoliskossa oli suuntaa antava ero ($p = 0.08$) mieleepainamisen ja takaumavihjeen ajanjaksojen välillä siten, että mieleepainamisen ajanjakson alfa-oskillaation maksimiarvot olivat suurempia. Myös efektikoko oli suuri ($d = 1.03$).



Kuva 8. Näköaivokuoren alfa-oskillaation maksimiampplitudien keskiarvot mieleepainamisen ja vihjeen ajanjaksoissa aivopuoliskoittain. Vihjeeseen liittyvä ajanjakso sisältää sekä neutraalit että validit vihjeet.

TAULUKKO 1. Mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen ajanjakson näköaivokuoren alfa-oskillaation maksimiampplitudien vertailu Wilcoxonin testillä aivopuoliskoittain (n = 5). Vihjeen esittämisen ajanjaksossa huomioitiin sekä neutraalit että validit vihjeet. Efektikokoja tutkittiin Cohenin *d*:llä.

Mieleenpainamisen ja vihjeen aiheuttaman tarkkaavuuden kohdistamisen ajanjaksojen vertailu		
	Vasen aivopuolisko mieleenpainaminen × vihje	Oikea aivopuolisko mieleenpainaminen × vihje
<i>T</i>	17	6
<i>z</i>	-1.070	-.405
<i>p</i>	.080 ⁺	.686
<i>Efektikoko (d)</i>	1.030	.396

Huom. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, + $p < .10$

Huom. $d = 0.2$ (pieni), $d = 0.5$ (keskisuuri), $d > 0.8$ (suuri) (Cohen, 1988)

Kun verrattiin vasemman ja oikean aivopuoliskon alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvoja mieleenpainamisen ajanjaksossa, ei havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa aivopuoliskojen välillä (taulukko 2). Takaumavihjeen ajanjaksossa havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero ($p = 0.04$) aivopuoliskojen välillä siten, että oikeassa aivopuoliskossa alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvot olivat suurempia kuin vasemmassa. Tämä aivopuoliskojen välinen ero takaumavihjeen ajanjaksossa voidaan havaita myös kuvasta 8.

TAULUKKO 2. Näköaivokuoren alfa-oskillaation maksimiampplitudien vertailu Wilcoxonin testillä mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen ajanjaksoissa aivopuoliskoittain (n = 5). Vihjeen esittämisen ajanjaksossa huomioitiin sekä neutraalit että validit vihjeet. Efektikokoja tutkittiin Cohenin *d*:llä.

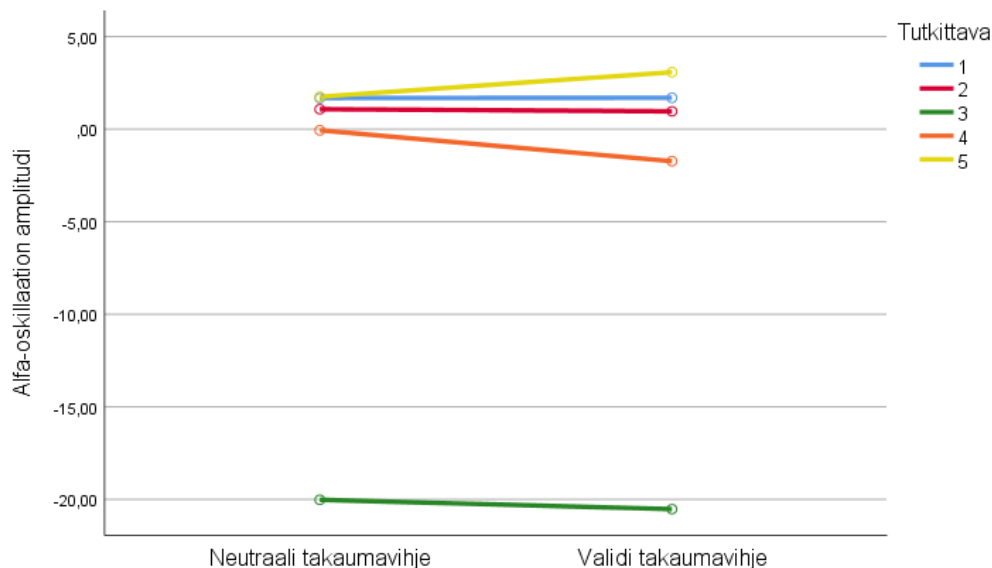
Aivopuoliskojen vertailu mieleenpainamisen ja takaumavihjeen ajanjaksoissa		
	Mieleenpainamisen ajanjakso oikea × vasen	Takaumavihjeen ajanjakso oikea × vasen
<i>T</i>	11	15
<i>z</i>	.944	2.023
<i>p</i>	.345	.043*
<i>Efektikoko (d)</i>	-0.438	-1.138

Huom. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, + $p < .10$

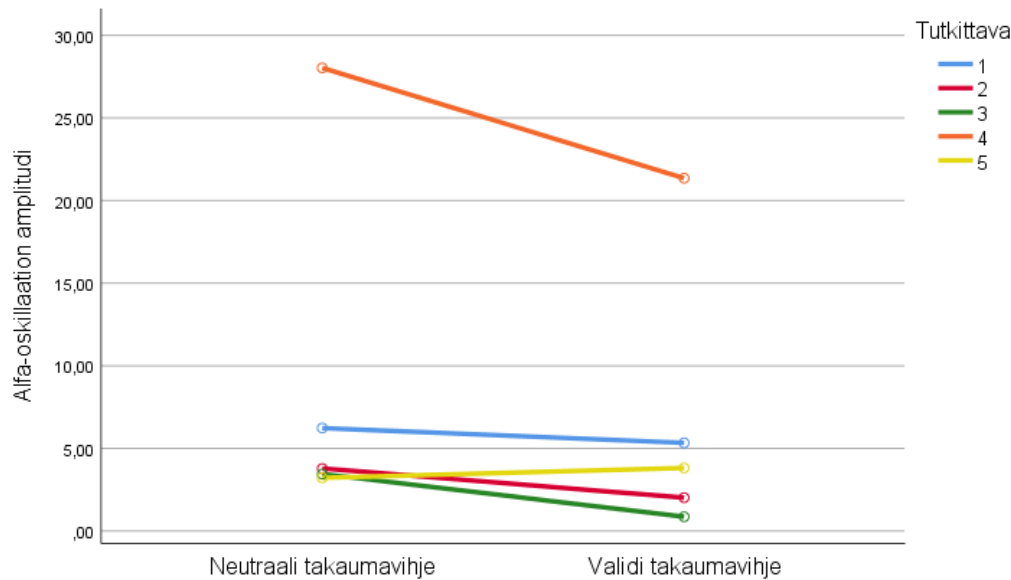
Huom. $d = 0.2$ (pieni), $d = 0.5$ (keskisuuri), $d > 0.8$ (suuri) (Cohen, 1988)

Validin ja neutraalin takaumavihjeen vertailu. Eri takaumavihjetyyppien vaikutusta näköaivokuoren alfa-oskillaation modulaatioon tarkasteltiin tutkimalla vihjetyypin ja aivopuoliskon välistä interaktiota. Interaktiota tarkasteltiin erotusmuuttujien avulla, joissa kummankin takaumavihjeen suhteen vasemman aivopuoliskon alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvosta vähennettiin oikean aivopuoliskon alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvo. Kun näitä erotusmuuttujia verrattiin toisiinsa, havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero ($p = 0.04$) aivopuoliskojen eroissa takaumavihjetyyppien välillä.

Tämän jälkeen suoritettiin parivertailu validin ja neutraalin takaumavihjeen suhteen alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvoilla aivopuoliskoittain. Kuvista 9 ja 10 voidaan havaita, kuinka alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvot vaihtelevat tutkittavien kesken neutraalin ja validin takaumavihjeen välillä. Kun verrattiin alfa-oskillaation maksimiampitudiarvoja vasemmassa aivopuoliskossa, ei vihjetyyppien välillä havaittu tilastollisesti merkitsevää eroa ($p = 0.50$). Sen sijaan oikeaa aivopuoliskoa tarkasteltaessa validin ja neutraalin vihjeen aikaansaamien modulaatioiden välillä havaittiin suuntaa antava ero ($p = 0.08$) neutraalin vihjeen amplitudin maksimiarvojen ollessa suurempia (taulukko 3). Efektikoot olivat pieniä (0.02–0.24) sekä vihjetyyppien ja aivopuoliskojen interaktion kohdalla että aivopuoliskoittain.



Kuva 9. Vasen aivopuolisko. Näköaivokuoren alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvot jokaisella tutkittavalla eri takaumavihjetyyppien (engl. *retro-cue*) välillä.



Kuva 10. Oikea aivopuolisko. Näköaivokuoren alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvot jokaisella tutkittavalla eri takaumavihjetyyppien (engl. *retro-cue*) välillä.

TAULUKKO 3. Vihjeen esittämisen vaiheeseen liittyvän näköaivokuoren alfa-oskillaation maksimi-amplitudien vertailu takaumavihjetyyppien välillä Wilcoxonin testillä ($n = 5$). Vertailu tehtiin aivopuoliskoittain vihjetyyppien välillä sekä tarkastelemalla vihjetyyppien ja aivopuoliskojen välistä interaktiota. Efektikokoja tutkittiin Cohenin d :llä.

Validin ja neutraalin takaumavihjeen aikaansaamien alfa-oskillaation maksimi-amplitudien vertailu

	Vasen aivopuolisko neutraali × validi	Oikea aivopuolisko neutraali × validi	Vihjetyyppien ja aivopuoliskojen interaktio
T	5	1	15
z	-.674	-1.753	2.023
p	.500	.080 ⁺	.043*
Efektikoko (d)	.020	.235	.173

Huom. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, + $p < .10$

Huom. $d = 0.2$ (pieni), $d = 0.5$ (keskisuuri), $d > 0.8$ (suuri) (Cohen, 1988)

Kun verrattiin vasemman ja oikean aivopuoliskon alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvoja validin vihjeen aikaansaamana, havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero ($p = 0.04$) aivopuoliskojen välillä siten, että oikeassa aivopuoliskossa alfa-oskillaation amplitudin maksimi-arvot olivat suurempia (taulukko 4). Neutraalin vihjeen kohdalla havaittiin myös tilastollisesti merkitsevä ero ($p = 0.04$) aivopuoliskojen välillä siten, että oikeassa aivopuoliskossa alfa-oskillaation amplitudin

maksimiarvot olivat suurempia. Oikean aivopuoliskon korkeammat maksimiarvot nähdään myös kuvista 9 ja 10.

TAULUKKO 4. Näköaivokuoren alfa-oskillaation maksimiampitudien vertailu validin ja neutraalin takaumavihjeen kohdalla Wilcoxonin testillä ($n = 5$). Efektikokoja tutkittiin Cohenin d :llä.

Aivopuoliskojen vertailu validin ja neutraalin takaumavihjeen kohdalla		
	Validi vihje oikea × vasen	Neutraali vihje oikea × vasen
T	15	15
z	2.023	2.023
p	.043*	.043*
<i>Efektikoko (d)</i>	-1.096	-1.190

Huom. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, + $p < .10$

Huom. $d = 0.2$ (pieni), $d = 0.5$ (keskisuuri), $d > 0.8$ (suuri) (Cohen, 1988)

4 POHDINTA

Tutkimuksemme tavoitteena oli selvittää, millainen rooli näköaivokuoren rytmisellä toiminnalla on visuaaliseen muistiaineeseen kohdistuvassa sisäisessä tarkkaavuudessa. Aihetta tutkittiin tarkastelemalla näköaivokuorella ilmenevää alfa-oskillaation modulaatiota kuvan mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen yhteydessä. Lisäksi takaumavihjeen sisällöllistä merkitystä aivojen muistinvaraisessa tarkkaavuudessa tarkasteltiin vertaamalla erilaisten vihjeiden aiheuttamaa alfa-oskillaation modulaatiota.

Näköaivokuoren roolia sisäisessä tarkkaavuudessa tarkasteltiin erityisesti okkipitaalisen alfarytmin osalta, jota voidaan MEG:llä luotettavasti mitata yksilötasolla. Sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen vaikutusta näköaivokuoren alfa-oskillaation modulaatioon tutkittiin hyödyntämällä takaumavihjekoeasetelmaa ja ulottuvuuteen perustuvia takaumavihjeitä yhdistettynä MEG-mittauksiin. Tulostemme perusteella vaikuttaa siltä, että näköaivokuoren alfa-oskillaatio moduloituu eri tavalla tutkittavien kesken tehtävän aikana. Mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen aikaansaamassa alfa-oskillaation modulaatiossa havaittiin suuntaa antava ero vasemmassa aivopuoliskossa, joten oli syytä tarkastella aivopuoliskojen välisiä eroja mieleenpainamisen ja takaumavihjeen aikana. Mieleenpainamisen ajanjaksossa ei havaittu eroa oikean ja vasemman aivopuoliskon välillä, mutta takaumavihjeen ajanjaksossa sen sijaan oikean aivopuoliskon alfa-oskillaation havaittiin olevan voimakkaampaa verrattuna vasempaan aivopuoliskoon. Aivopuoliskon ja vihjetyypin interaktiossa havaittiin ero, joka näkyi oikeassa aivopuoliskossa siten, että neutraali takaumavihje sai aikaan voimakkaampaa alfa-oskillaatiota verrattuna validiin takaumavihjeeseen. Lisäksi kun verrattiin alfa-oskillaation modulaatiota vasemman ja oikean aivopuoliskon välillä, havaittiin ero riippumatta vihjetyypistä. Tämä näkyi siten, että alfa-oskillaatio on voimakkaampaa oikeassa aivopuoliskossa sekä neutraalin että validin vihjeen aikaansaamana.

4.1 Näköaivokuoren rytmisen toiminta mieleenpainamisen ja tarkkaavuuden kohdistamisen aikana

Ensimmäisenä tutkimuskysymyksenämme pyrimme selvittämään, miten näköaivokuoren rytmisen toiminta moduloituu mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen seurauksena. Tätä tarkasteltiin vertailemalla kahteen eri aikaikkunaan (mieleenpainaminen ja takaumavihje) rajattujen näköaivokuoren alfa-oskillaation modulaatioita. Koska Poch ja kollegat (2017) havaitsivat takaumavihjeen aikaansaamaa alfa-oskillaation modulaatiota, oletimme, että sekä mieleenpainaminen että takaumavihjeen esittäminen saavat aikaan alfa-oskillaation modulaatiota. TFR-kuvaajia tarkastelemalla havaitsimme voimistunutta alfa-oskillaatiota sekä mieleenpainamisen että takaumavihjeen esittämisen seurauksena. Tulos takaumavihjeen aikaansaamasta voimistuneesta alfa-oskillaatiosta eroaa useasta aiemmasta tutkimuksesta, joissa on havaittu takaumavihjeen aiheuttavan alfa-oskillaation vaimenemista (Hajonides ym., 2020; Poch ym., 2017; Myers ym., 2015). Kuitenkin Poch ja kumppanit (2014) havaitsivat takaumavihjeen aikaansaamaa alfa-oskillaation voimistumista, mikä on linjassa tulostemme kanssa.

Koska aiempia tutkimuksia mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen aikaansaaman alfa-oskillaation modulaation eroista näköaivokuorella ei löytynyt, emme tehneet oletuksia siitä, aiheuttavatko ne samanlaista tai erilaista modulaatiota näköaivokuoren alfarytmissä. Tutkimuksessamme havaittiin suuntaa antava ero vasemmassa aivopuoliskossa mieleenpainamisen ja takaumavihjeen aiheuttaman alfa-oskillaation modulaation välillä siten, että mieleenpainaminen saa aikaan voimakkaampaa alfa-oskillaatiota kuin takaumavihjeen esittäminen. Se, että ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä, saattaa johtua aineiston pienestä koosta. Aivopuoliskojen välisestä erosta alfa-oskillaation modulaatiossa ei myöskään löytynyt aikaisempaa takaumavihjekoeasetelmaa hyödyntävää tutkimusta, joten emme tehneet oletuksia siihen liittyen. Havaitsimme, että mieleenpainamisen ajanjaksossa vasemman ja oikean aivopuoliskon välillä ei ollut eroa. Sen sijaan takaumavihjeen ajanjaksossa ilmenevä aivopuoliskojen välinen ero saattaa kertoa aivopuoliskojen erilaisesta roolista sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen prosesseissa.

Se, että oikeassa aivopuoliskossa tarkkaavuuden kohdistaminen muistiaineeseen aiheuttaa samankaltaista modulaatiota näköaivokuorella kuin varsinaisen kuvan mieleenpainaminen, kertoo mahdollisesti siitä, että näköhavaintoon ja sisäisen tarkkaavuuden kohdistamiseen liittyvät prosessit olisivat ainakin osittain samankaltaiset. Kuitenkin vasemmassa aivopuoliskossa mieleenpainamisen ja takaumavihjeen välillä havaittu suuntaa antava ero antaa viitteitä siitä, että mieleenpainamisen ja sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen prosessien välillä olisi jonkinlainen ero. Havaitun eron lähteen

selvittämiseksi tarkastelimme aivopuoliskojen välisiä eroja mieleenpainamisen ja takaumavihjeen aikaansaamassa alfa-oskillaation modulaatiossa. Mieleenpainamisen aikana ei havaittu eroa aivopuoliskojen välillä, mikä voisi tarkoittaa, että siinä aivopuoliskojen rooli ja työnjako olisi samanlainen. Kuitenkin merkitsevä ero takaumavihjeen esittämisen aikana – se, että vihjeen vaikutuksesta oikean aivopuoliskon alfa-oskillaatio on voimakkaampaa kuin vasemman – saattaa viitata siihen, että aivopuoliskojen työnjako olisi erilainen sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen prosesseissa. Yhteenvedon voidaan todeta, että aivopuoliskojen rooli saattaa olla erilainen visuaaliseen muistiaineeseen liittyvissä mieleenpainamisen ja tarkkaavuuden prosesseissa.

4.2 Muistiaineeseen kohdistuvan vihjeen aiheuttama alfarytmin modulaatio näköaivokuorella

Toisena tutkimuskysymyksenä pyrittiin selvittämään, millaista alfa-oskillaation modulaatiota näköaivokuorella havaitaan validin ja neutraalin takaumavihjeen aikaansaamana. Tätä tutkittiin tarkastelemalla takaumavihjetyyppien ja aivopuoliskojen interaktiota sekä vertailemalla validin ja neutraalin vihjeen aikaansaamaa alfa-oskillaatiota molemmissa aivopuoliskoissa. Oletimme, että validi takaumavihje aiheuttaisi näköaivokuoren alfa-oskillaation vaimenemista verrattuna neutraaliin takaumavihjeeseen, sillä tämä on havaittu aikaisemmissa tutkimuksissa (Hajonides ym., 2020). TFR-kuvaajia tarkastelemalla kuitenkin havaittiin, että jokaisella tutkittavalla validin ja neutraalin takaumavihjeen esittäminen sai aikaan samankaltaista alfa-oskillaation voimistumista näköaivokuorella.

Tilastollisesti tarkasteltuna aivopuoliskon ja vihjetyypin interaktiossa havaittiin merkitsevä ero. Tämä kertoo takaumavihjetyyppien aiheuttavan erilaista eroa aivopuoliskojen modulaatiossa. Tämän jälkeen tehdyssä parivertailussa havaittiin suuntaa antava ero oikeassa aivopuoliskossa validin ja neutraalin takaumavihjeen aikaansaamien alfa-oskillaatioiden modulaatioiden välillä. Vasemmassa aivopuoliskossa ei havaittu eroa, mutta on kuitenkin mahdollista, että oletettu ero ei yltänyt tilastollisesti merkitseväksi aineiston pienen koon vuoksi. Havaittu ero oikeassa aivopuoliskossa tukisi oletusta siitä, että validi ja neutraali vihje aiheuttavat erilaista alfa-oskillaation moduloitumista. Kuitenkin vastoin oletuksia, validi vihje ei aiheuttanut alfa-oskillaation vaimenemista vaan alfa-oskillaatio voimistui. Havaitun suuntaa antavan eron vuoksi tarkasteltiin myös vasemman ja oikean aivopuoliskon alfa-oskillaation modulaatiota kummassakin vihjetyypissä.

Kummankin vihjetypin kohdalla alfa-oskillaatio oli voimakkaampaa oikeassa aivopuoliskossa vasempaan verrattuna. Tämä voisi kertoa siitä, että takaumavihjettä käsitellään eri tavoin eri aivopuoliskoissa. Toisin sanoen aivopuoliskot mahdollisesti osallistuvat sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen prosessiin eri tavoin, silloinkin kun vihjetypin vaikutus aivopuoliskojen toimintaan on kontrolloitu.

Aiemmin on havaittu, että tarkkaavuuden kohdistaminen saattaa aiheuttaa erilaista modulaatiota aivopuoliskoissa riippuen siitä, kummalle puolelle näkökenttää ärsyke on esitetty (Poch ym., 2014; Poch ym., 2017). Tässä tutkimuksessa tämä niin kutsuttu lateralisaatio oli kontrolloitu käyttämällä ulottuvuuteen perustuvaa takaumavihjetyppeä, ja silti aivopuoliskojen välillä havaittiin ero takaumavihjeen esittämisen seurauksena. Näin ollen aivopuoliskoilla on mahdollisesti lähtökohtaisesti erilainen rooli sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen prosessissa.

4.3 Yhteenveto tulosten merkityksestä

Tavoitteenamme oli selvittää, millainen rooli näköaivokuoren rytmisellä toiminnalla on visuaaliseen muistiaineeseen kohdistuvassa sisäisessä tarkkaavuudessa. Havaitsimme jokaisella tutkittavalla voimistunutta alfa-oskillaatiota mieleenpainamisen ja takaumavihjeen esittämisen aikana, mutta alfa-oskillaatio voimistui eri tavalla tutkittavien välillä. Tämän lisäksi havaitsimme aivopuoliskojen välillä eroja alfarytmin modulaatiossa.

Aiemmin on havaittu, että sisäisen tarkkaavuuden kohdistaminen saa aikaan erilaista alfa-oskillaation modulaatiota eri aivopuoliskoissa näköaivokuorella (Hajonides ym., 2020; Myers ym., 2015; Poch ym., 2017). Myös tässä tutkimuksessa havaittiin eroja näköaivokuoren alfa-oskillaation modulaatiossa aivopuoliskojen välillä. Aivopuoliskot näyttäisivät toimivan hyvin samankaltaisesti mieleenpainamisen eli todellisen näköhavainnon aikana, mutta kohdistettaessa sisäistä tarkkaavuutta mielensisäiseen visuaaliseen ainekseen aivopuoliskojen työnjako vaikuttaisikin olevan erilaista. Aivopuoliskoilla vaikuttaisi siis olevan erilainen rooli juuri sisäisen tarkkaavuuden prosesseissa. Lisäksi oikean aivopuoliskon suuntaa antava ero validin ja neutraalin vihjeen välillä antaa viitteitä siitä, että takaumavihjeen tyyppi aiheuttaa erilaista alfa-oskillaation modulaatiota näköaivokuorella. Huomionarvoista on, että myös vihjetypistä riippumatta aivopuoliskojen työnjako on erilainen takaumavihjeen käsittelyssä. Aiemmissa tutkimuksissa aivopuoliskojen välinen ero alfa-oskillaation modulaatiossa on aiheutunut siitä, että niissä tarkasteltiin näköhavainnon spatiaalista sijaintia näkökentässä sekä sen aikaansaamaa alfa-oskillaation modulaatiota. Tässä tutkimuksessa sen sijaan

näköhavainnon sijainnista aiheutuva ero oli kontrolloitu, joten päästiin tarkastelemaan puhtaasti eri aivopuoliskojen roolia alfa-oskillaation modulaatiossa.

4.4 Alfarytmin rooli – tarkkaavuus vai työmuisti?

Alfarytmin roolista kognitiivisissa toiminnoissa on kiistelty, ja keskustelu tutkimuskentällä jatkuu edelleen. On esitetty vastakkaisia näkemyksiä siitä, että alfarytmi voisi liittyä joko työmuistin (Jensen, Gelfand, Kounios & Lisman, 2002) tai tarkkaavuuden (Jensen & Mazaheri, 2010; Poch ym., 2014) prosesseihin. Alfarytmillä on esimerkiksi esitetty olevan keskeinen rooli työmuistin sisällön suojelemisessa epäolennaiselta tiedolta (Roux & Uhlhaas, 2014). Toisaalta on ehdotettu, että alfarytmi liittyisi tarkkaavuuden kohteen valintaan sekä häiriötekijöiden poistoon (Haegens, Luther & Jensen, 2012).

4.4.1 Alfa-oskillaation ennakoiva voimistuminen

Tässä tutkimuksessa havaittiin alfa-oskillaation voimistumista ennen mieleenpainettavan kuvan ja takaumavihjeen esittämistä, mikä voisi kuvata jollakin tapaa enemmän tarkkaavuuden kohdistamiseen ja tehtävän kannalta relevantin informaation ennakointiin liittyvää prosessointia. Ennakoiva alfa-oskillaatio saattaisi kuvata sitä, että alfarytmin rooli ei liittyisikään puhtaasti työmuistiprosesseihin. Tätä ajatusta tukevat Haegensin ja kollegoiden (2012) sekä Pochin ja kumppaneiden (2014) tutkimusten havainnot. Haegens ja kollegat (2012) havaitsivat somatosensoriseen ärsykkeeseen liittyvää ennakoivaa alfa-oskillaatiota, jonka he ehdottavat liittyvän tarkkaavuuden kohdistamiseen ja häiriötekijöiden poistamiseen. Poch ja kumppanit (2014) havaitsivat MEG-tutkimuksessaan alfarytmin liittyvän epäolennaisen tiedon prosessointiin, mikä puolestaan kertoisi alfarytmin merkityksestä tarkkaavuuden prosessien näkökulmasta.

Tässä tutkimuksessa havaittu ennakoiva alfa-oskillaatio voisikin liittyä erilaisten häiriötekijöiden poistamiseen. Alfa-oskillaation voimistuminen ennen muistijoukon esittämistä voisi selittyä sillä, että tutkittava pyrkii poistamaan tehtävään liittyvät muut mahdolliset visuaaliset häiriötekijät (esimerkiksi merkityksettömän tiedon siitä, missä kohtaa näytöllä palkki on). Alfa-oskillaation voimistuminen

ennen takaumavihjeen esittämistä saattaa liittyä juuri nähdyn tehtävän kannalta merkityksettömän informaation käsittelyyn ja inhibointiin. Aihe vaatii kuitenkin lisää tutkimusta.

4.4.2 Voimistuvan alfa-oskillaation rooli kognitiivisissa toiminnoissa

Yleisen käsityksen mukaan alfa-oskillaation voimistumisen näköaivokuorella on ajateltu heijastelevan sitä, ettei aivokuori aktiivisesti käsittele ulkoista informaatiota (Bazanov & Vernon, 2013), mutta jo Jensen ja kollegat (2002) havaitsivat alfa-oskillaation voimistuvan työmuistikuorman kasvaessa. Hajonides ja kollegat (2020) havaitsivat, että neutraalin takaumavihjeen aikaansaama alfa-oskillaatio oli voimakkaampaa kuin validin vihjeen aikaansaamaa alfa-oskillaatio. Tämä on linjassa tutkimuksemme tulosten kanssa, sillä neutraalin takaumavihjeen havaittiin aiheuttavan voimakkaampaa alfa-oskillaatiota verrattuna validin vihjeen aiheuttamaan alfa-oskillaatioon. Lisäksi mieleenpainamisen ajanjaksossa havaittiin myös voimakkaampaa alfa-oskillaatiota verrattuna takaumavihjeen ajanjaksoon. Toisin sanoen voimakkaampaa alfa-oskillaatiota havaittiin tilanteissa, joissa muistiin liittyvää prosessointia vaadittiin enemmän. Voimakas alfarytmi voisikin siis kertoa aivojen aktiivisesta työskentelystä suuremman työtaakan alla. Validi takaumavihje sen sijaan tarjoaa lisätietoa työmuistin tueksi ja keventää työkuormaa, kun kaikkea havaittua ei tarvitse ylläpitää aktiivisesti mielessä. Näin ollen alfa-oskillaatiokin on pienempää, mikä puolestaan kertoisi työmuistin pienemmästä ponnistelusta. Tämän perusteella alfarytmi vaikuttaisikin liittyvän myös työmuistin toimintaan.

Tämän tutkimuksen perusteella ei voida sanoa, että alfarytmi liittyisi puhtaasti joko tarkkaavuuden tai muistamisen prosesseihin, vaan sillä saattaa olla oma roolinsa molemmissa prosesseissa. Havaitsemamme ennakoiva alfarytmi vaikuttaisi olevan enemmän osa tarkkaavuuden kohdistamisen prosesseja, kun taas alfa-oskillaation voimistuminen aktiivista muistamista vaativissa tilanteissa kuvaisi enemmän alfarytmin roolia osana työmuistiprosesseja. Alfarytmillä vaikuttaisi siis olevan roolinsa sekä tarkkaavuuden että työmuistin prosesseissa.

4.5 Tutkimuksen edut ja rajoitukset

Tarkkaavuuden ja työmuistin neuraalinen perusta on monimutkainen tutkimuskohde. Niiden tutkimista vaikeuttaa esimerkiksi prosessien päällekkäisyys ja kaksisuuntainen luonne. Tarkkaavuuden kohdistaminen vaikuttaa työmuistin sisältöön ja työmuistin sisältö puolestaan siihen, mihin tarkkaavuutta kohdistetaan. (Hollingworth & Maxey-Richard, 2013.) Lisäksi on havaittu, että tarkkaavuuden kohdistamisella voi olla vaikutusta muistisuoritukseen (Hollingworth & Maxey-Richard, 2013; Ye ym. 2021), mikä korostaa tarkkaavuuden ja työmuistin prosessien päällekkäisyyttä. Erityisesti aivojen alfarytmi on perinteisesti liitetty joko tarkkaavuuden (Jensen & Mazaheri, 2010; Poch ym., 2014) tai työmuistin (Jensen ym., 2002) prosesseihin, mutta aiheesta edelleen kiistellään. Tässä tutkimuksessa havaittiin ennakoivaa alfarytmiä jo ennen muistijoukon esittämistä, mikä voisi kuvata alfarytmin tarkkaavuuteen liittyvää roolia. Kuitenkin voimakas alfa-oskillaatio vaikuttaisi tämän tutkimuksen perusteella liittyvän suuremman muistikuorman aikaansaamaan ponnisteluun joten alfarytmi voisi kuvata myös työmuistin prosesseja.

Tutkimuksen toteuttaminen MEG-kuvantamista hyödyntämällä tuo uutta näkökulmaa sisäisen tarkkaavuuden tutkimukseen verrattuna aikaisempiin tutkimuksiin, joissa on pääasiallisesti hyödynnetty EEG:tä. Lisäksi MEG-kuvantamisella voidaan saavuttaa luotettavampi paikallinen tarkkuus, jolloin signaalien lähde voidaan paikallistaa tarkasti. Näin ollen tässä tutkimuksessa havaitun alfarytmin voidaan olettaa sijaitsevan näköaivokuorella siellä, mihin signaali paikantui.

Tutkimuksessa käytetty takaumavihjekoeasetelma soveltuu hyvin sisäisen tarkkaavuuden ja työmuistin tutkimiseksi. Aiheen tutkimista vaikeuttaa kuitenkin aivovasteiden erilaisuus eri ihmisten välillä, mutta myös lateralisaatio eli aivovasteiden erilaisuus eri aivopuoliskojen välillä. Takaumavihjekoeasetelmaa käytettäessä tuleekin huomioida, että muistista haettaviin ärsykkeisiin liittyviä takaumavihjeitä esitetään yhtä paljon kummallekin puolelle näkökenttää. Tässä tutkimuksessa lateralisaatio huomioitiin kuitenkin siten, että tarkasteltiin ainoastaan ulottuvuuteen perustuvia takaumavihjeitä, jotka eivät kohdenna huomiota kummallekaan puolelle näkökenttää vaan kaikkien havaittujen kappaleiden yhteiseen ominaisuuteen. Keskittyminen pelkästään ulottuvuuteen perustuvien takaumavihjeiden aiheuttamaan sisäisen tarkkaavuuden kohdistamiseen rajasi kuitenkin kappaleeseen perustuvan takaumavihjetyypin tutkimisen pois tutkimuksesta.

Tutkimuksen rajoituksena on aineiston pieni koko. Lisäksi aineisto oli heterogeeninen, ja tutkittavilla havaittiin muutamia poikkeavia alfa-oskillaation amplitudin maksimiarvoja, joten poikkeavien arvojen vaikutukset keskiarvoon ja sitä kautta efektikokoihin tulee huomioida. Aineiston pienen koon ja heterogeenisyyden vuoksi on vaikea tehdä koko perusjoukkoa koskevia

johtopäätöksiä. Näin ollen tulokset ovat enemmän kuvailevia, mutta antavat kuitenkin hyödyllisiä viitteitä siitä, mihin tutkimusta tulisi jatkossa kohdentaa isommilla otoksilla. Lisäksi on huomioitava, että kun käytettiin visuaalisia ärsykejä, ainakin osa havaitusta modulaatiosta on voinut johtua puhtaasti visuaalisen informaation prosessoinnista.

4.6 Käytännön merkitys ja jatkotutkimusaiheita

Aivojen rytmisen toiminnan modulaatio vaikuttaisi tulosten perusteella olevan melko yksilöllistä. Yksilöllinen rytmisen toiminnan modulaatio toistui kullakin tutkittavalla samanlaisena takaumavihjetyypistä riippumatta. Tämä saattaa kertoa siitä, että tutkittavat käyttivät mahdollisesti erilaisia strategioita suorittaessaan takaumavihjetehtävää. Jatkossa tulisikin tutkia, millaisia strategioita takaumavihjetehtävässä hyödynnetään, ja miten erilaisten strategioiden käyttö vaikuttaa alfa-oskillaation moduloitumiseen.

Jatkossa sisäistä tarkkaavuutta ja työmuistia olisi syytä tutkia hyödyntämällä sekä ulottuvuuteen että kappaleeseen perustuvia takaumavihjeitä aivopuoliskojen erilainen moduloituminen huomioon ottaen. Jatkossa tulisi myös huomioida esitettyjen ärsykkeiden sijainnin vaikutus aivovasteisiin. Kappaleeseen perustuvaa takaumavihjettä hyödynnettäessä tulee varmistaa, että tutkittaville esitetään saman verran muistettavia ärsykejä näkökentän oikealle ja vasemmalle puolelle, sillä ärsykeen sijainti näkökentässä saattaa vaikuttaa eri aivopuoliskojen vasteisiin eri tavalla.

Lisäksi jatkossa tulisi selvittää, millainen rooli eri aivopuoliskoilla on sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisessa, kun lateralisaatio on kontrolloitu. On mahdollista, että aivopuoliskoilla on erilainen työnjako mielensisäisessä tarkkaavuuden kohdistamisessa verrattuna todellisen näköhavainnon prosessointiin. Tämän tutkimuksen perusteella näyttäisi siltä, että erityisesti oikealla aivopuoliskolla voisi olla keskeinen rooli sisäisen tarkkaavuuden kohdistamisen prosesseissa.

Yhteenvedon voidaan todeta, että sisäisen tarkkaavuuden ja työmuistin välisistä yhteyksistä sekä näiden prosessien neuraalisesta perustasta tarvitaan lisää tutkimusta isommilla aineistoilla. Takaumavihjekoeasetelma tulee yhdistää useampiin erilaisiin aivokuvantamismenetelmiin, jotta saadaan tutkittua tarkasti alfarytmin lähdettä niin ajallisesti kuin paikallisestikin. Alfarytmin lisäksi olisi hyvä tarkastella muitakin taajuuksia, erityisesti matalampia taajuuksia, sillä koeasetelman ärsykkeiden esittämisen seurauksena havaittiin myös matalataajuisia aktiivaatiota. Jatkotutkimuksissa tulisi myös tarkastella, millaista rytmisen toiminnan modulaatiota erilaiset takaumavihjetyypit aiheuttavat sekä rytmisen toiminnan modulaatioissa nähtäviä aivopuoliskojen välisiä eroja.

Tällaisella tutkimuksella voidaan selvittää työmuistin ja tarkkaavuuden toimintaa ja yhteistyötä. Tämän tyyppinen tutkimus tarjoaa lisää neuraalisen tason tietoa tarkkaavuudesta ja muistista, jota voidaan hyödyntää oppimisen ja tarkkaavuuden tieteellisessä tutkimuksessa. Käytännön kannalta tutkimus tarjoaa myös lisää ymmärrystä muistin ja tarkkaavuuden toiminnasta, jota puolestaan voidaan hyödyntää esimerkiksi muistisairauksien kuntoutuksen suunnittelun ja toteutuksen tueksi. Koska alfa-oskillaation moduloitumisen havaittiin olevan yksilöllistä, tällainen tutkimus kannustaa oppimisen ja tarkkaavuuden haasteiden yksilölliseen kartoittamiseen aivokuvantamismenetelmillä perinteisten menetelmien lisäksi. Aivopuoliskoissa havaitut erot suuntaavat kiinnostusta aivopuoliskojen välisen kommunikaation ja yhteistyön tutkimiseen, sillä ymmärrys aivopuoliskojen mahdollisesta työnjaosta tarkkaavuuden ja muistin prosesseissa toisi arvokasta lisätietoa esimerkiksi aivovammojen ja neurologisten sairauksien kuntoutuksen suunnitteluun.

LÄHTEET

- Bazanava, O. M., & Vernon, D. (2013). Interpreting EEG alpha activity. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 44, 94-110. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.05.007>
- Buzsáki, G. & Freeman, W. (2015). Editorial overview: Brain rhythms and dynamic coordination. *Current Opinion in Neurobiology*, 31:v-ix. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2015.01.016>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Chun, M. M., Golomb, J. D. & Turk-Browne, N. B. (2011). A Taxonomy of External and Internal Attention. *Annu. Rev. Psychol*, 62:73-101. doi: 10.1146/annurev.psych.093008.100427
- Curby, K.M. & Gauthier, I. (2007). A visual short-term memory advantage for faces. *Psychonomic Bulletin & Review* 14, 620–628. <https://doi.org/10.3758/BF03196811>
- Griffin, I. C. & Nobre, A. C. (2003). Orienting Attention to Locations in Internal Representations. *Journal of cognitive neuroscience*, 15(8), 1176-1194. <https://doi.org/10.1162/089892903322598139>
- Haegens, S., Luther, L. & Jensen, O. (2012). Somatosensory Anticipatory Alpha Activity Increases to Suppress Distracting Input. *Journal of cognitive neuroscience*, 24(3), 677-685. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00164
- Hajonides, J. E., van Ede, F., Stokes, M. G. & Nobre, A. C. (2020). Comparing the prioritization of items and feature-dimensions in visual working memory. *Journal of vision (Charlottesville, Va.)*, 20(8), 25. <https://doi.org/10.1167/jov.20.8.25>
- Hansen, P. C., Kringelbach, M. L. & Salmelin, R. (2010). *MEG: An introduction to methods*. Oxford University Press.
- Hari, R. & Puce, A. (2017). *MEG-EEG primer*. Oxford University Press.
- Hollingworth, A., & Maxcey-Richard, A. M. (2013). Selective maintenance in visual working memory does not require sustained visual attention. *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, 39(4), 1047–1058. <https://doi.org/10.1037/a0030238>
- Jensen, O., Gelfand, J., Kounios, J., & Lisman, J. E. (2002). Oscillations in the alpha band (9-12 Hz) increase with memory load during retention in a short-term memory task. *Cerebral cortex (New York, N.Y. : 1991)*, 12(8), 877–882. <https://doi.org/10.1093/cercor/12.8.877>
- Jensen, O. & Mazaheri, A. (2010). Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: gating by inhibition. *Frontiers of Human Neuroscience*.

- Koivisto, M. (2006). Johdatus muistin ja tarkkaavaisuuden käsitteisiin. Teoksessa Hämäläinen, H., Laine, M., Aaltonen, O. & Revonsuo, A. (2006). *Mieli ja aivot: Kognitiivisen neurotieteen oppikirja*. Turun yliopisto, kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskus.
- Luck, S. J. & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature (London)*, 390(6657), 279-281. <https://doi.org/10.1038/36846>
- Myers, N. E., Walther, L., Wallis, G., Stokes, M. G. & Nobre, A. C. (2015). Temporal Dynamics of Attention during Encoding versus Maintenance of Working Memory: Complementary Views from Event-related Potentials and Alpha-band Oscillations. *Journal of cognitive neuroscience*, 27 (3), 492-508. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00727
- Nunez, P. L. & Srinivasan, R. (2006). *Electric fields of the brain: The neurophysics of EEG* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Park, Y. E., Sy, J. L., Hong, S. W. & Tong, F. (2017). Reprioritization of Features of Multidimensional Objects Stored in Visual Working Memory. *Psychological science*, 28(12), 1773-1785. <https://doi.org/10.1177/0956797617719949>
- Poch, C., Campo, P. & Barnes, G. R. (2014). Modulation of alpha and gamma oscillations related to retrospectively orienting attention within working memory. *The European journal of neuroscience*, 40(2), 2399-2405. <https://doi.org/10.1111/ejn.12589>
- Poch, C., Capilla, A., Hinojosa, J. A. & Campo, P. (2017). Selection within working memory based on a color retro-cue modulates alpha oscillations. *Neuropsychologia*, 106, 133-137. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.09.027>
- Roux, F., & Uhlhaas, P. J. (2014). Working memory and neural oscillations: alpha–gamma versus theta–gamma codes for distinct WM information?. *Trends in cognitive sciences*, 18(1), 16-25. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.10.010>
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, 74(11), 1–29. <https://doi.org/10.1037/h0093759>
- Treisman, A. (1996). The binding problem. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 171–178. doi:10.1016/S0959-4388(96)80070-5
- Ye, C., Hu, Z., Ristaniemi, T., Gendron, M. & Liu, Q. (2016). Retro-dimension-cue benefit in visual working memory. *Scientific reports*, 6, 35573. <https://doi.org/10.1038/srep35573>
- Ye, C., Xu, Q., Liu, X., Astikainen, P., Zhu, Y., Hu, Z. & Liu, Q. (2021). Individual differences in working memory capacity are unrelated to the magnitudes of retrocue benefits. *Scientific reports*, 11(1), 7258. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86515-5>
- Walter, W. G. (1938). Critical review: The technique and application of electro-

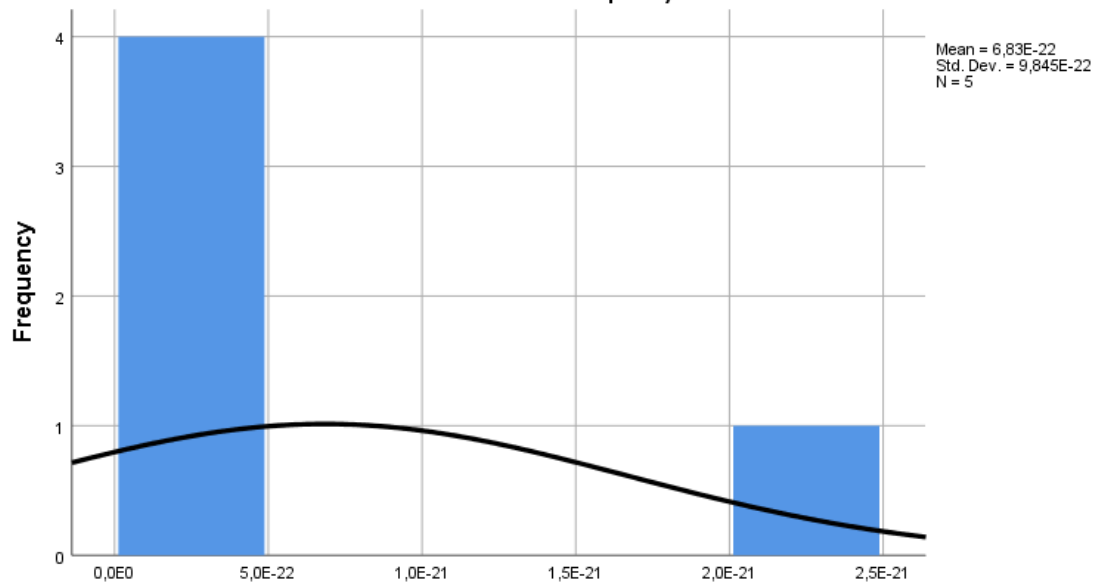
encephalography. *Journal of neurology and psychiatry*, 1(4), 359-385.
<https://doi.org/10.1136/jnnp.1.4.359>

Woodman, G. F., Wang, S., Sutterer, D. W., Reinhart, R. M. G. & Fukuda, K. (2021). Alpha suppression indexes a spotlight of visual-spatial attention that can shine on both perceptual and memory representations. *Psychon Bull Rev.* <https://doi.org/10.3758/s13423-021-02034-4>

LIITTEET

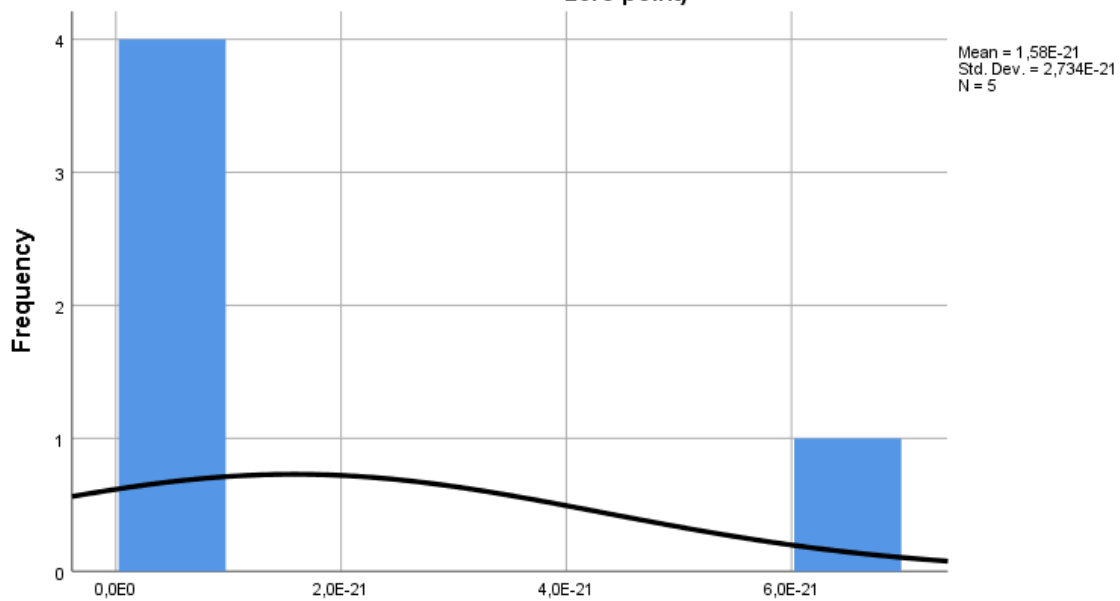
LIITE 1. Käytettyjen muuttujien jakaumatarkastelut.

Left hemisphere: Maxvalue for encoding amplitude from all cues; time from -1000ms to -0.05ms (cue was the zero point)



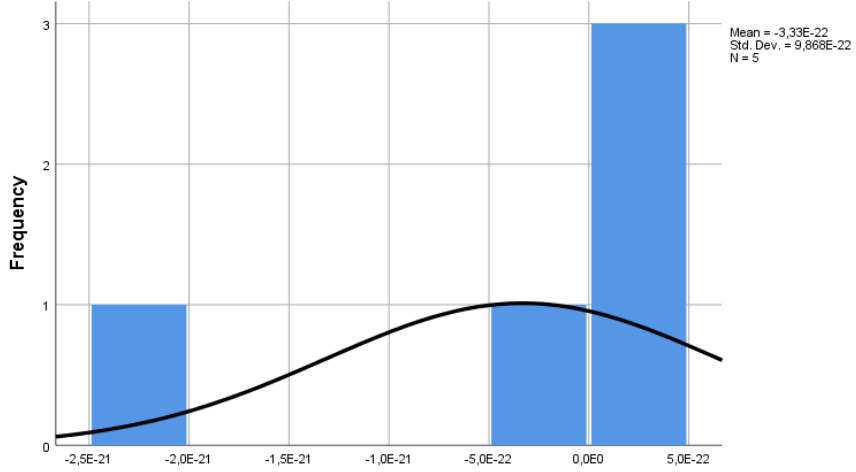
Left hemisphere: Maxvalue for encoding amplitude from all cues; time from -1000ms to -0.05ms (cue was the zero point)

Right hemisphere: Maxvalue for encoding amplitude from all cues; time from -1000ms to -0.05ms (cue was the zero point)



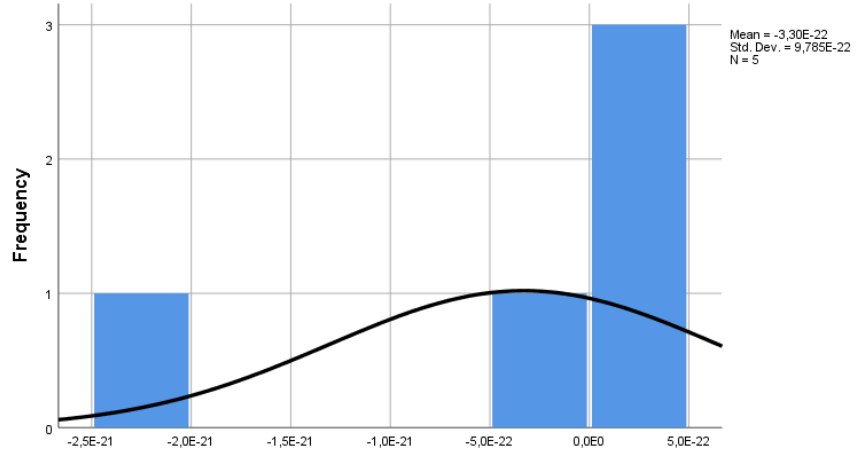
Right hemisphere: Maxvalue for encoding amplitude from all cues; time from -1000ms to -0.05ms (cue was the zero point)

Left hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from all cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)



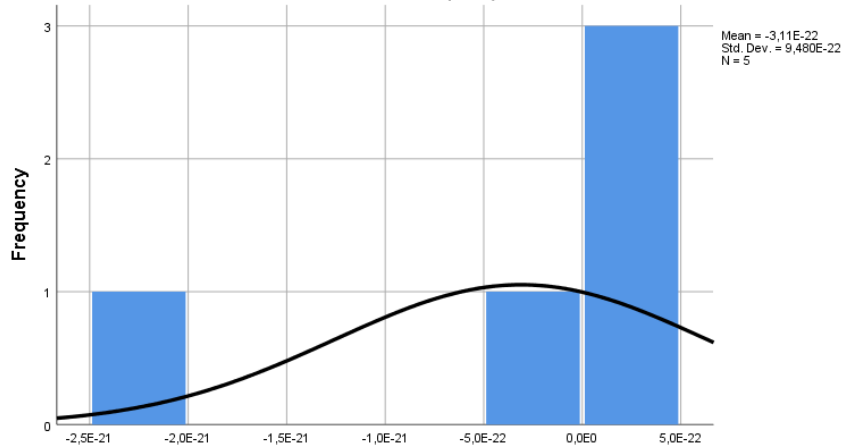
Left hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from all cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)

Left hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from valid cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)



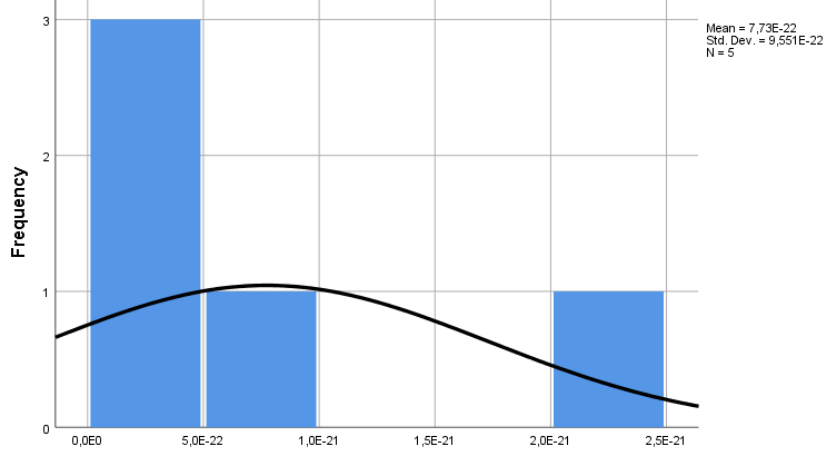
Left hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from valid cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)

Left hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from neutral cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)



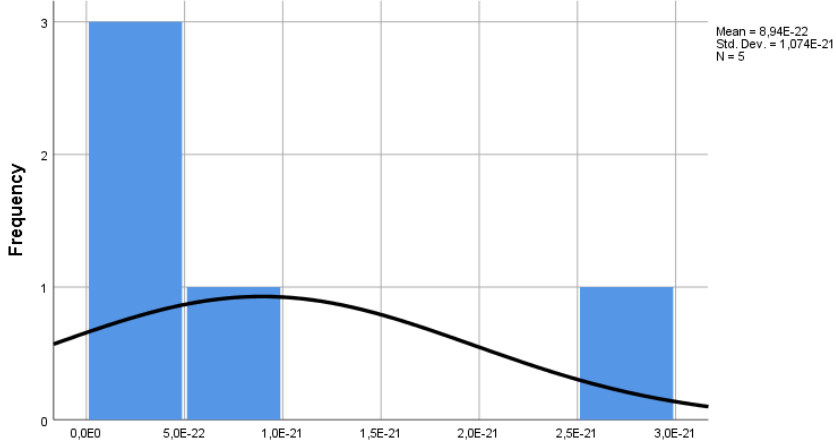
Left hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from neutral cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)

Right hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from all cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)



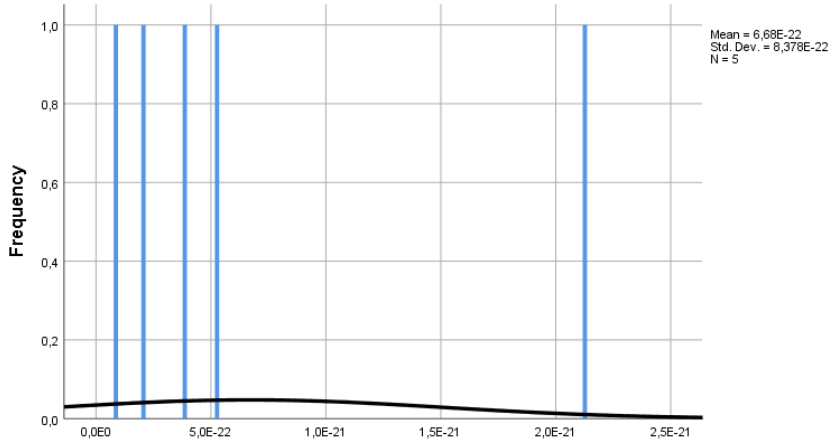
Right hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from all cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)

Right hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from neutral cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)



Right hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from neutral cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)

Right hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from valid cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)



Right hemisphere:Maxvalue for cue amplitude from valid cues; time from 0ms to 1495ms (cue was the zero point)