

Muusikkouden jälkiä aivoissa

PsM Seppänen Miia & Dos. Tervaniemi Mari
Kognitiivisen aivotutkimuksen yksikkö, Psykologian laitos, Helsingin yliopisto ja
Monitieteisen musiikintutkimuksen huippuyksikkö, Musiikin laitos, Jyväskylän yliopisto

Yhteystiedot

Miia Seppänen
PL 9 (Siltavuorenpenger 20 C)
Psykologian laitos
00014 Helsingin yliopisto,
GSM: 040-7212 061
email: miaa.seppanen@helsinki.fi

Abstrakti

Muusikoiden aivot ovat vuosia kestäneen, päivittäisen ja intensiivisen musisoinnin seurauksena optimoituneet äänen ja soittamiseen liittyvän tiedon käsittelyyn ja tuottamiseen. Musiikkia kuunnellessa aivot prosessoivat intensiivisesti ääntä sekä ääneen ja soittamiseen liittyviä mielikuvia. Soittaessa laajat hermoverkostot aktivoituvat ja mahdollistavat näin käsien ja jalkojen liikkeiden, äänipalautteen ja tuntoaistin koordinaation. Aivotutkimuksissa on voitu selvittää, miten muusikoiden aivojen toiminta eroaa ei-muusikoista näiden toimintojen osalta sekä millaisia aivorakenteiden muutoksia vuosia kestänyt soittaminen on aiheuttanut. Tässä katsauksessa esitellään viimeaikaisia tutkimuksia, joissa on vertailtu muusikoiden ja ei-muusikoiden aivojen toiminnallisia ja rakenteellisia eroja. Pääpaino on kuuloaistissa tehdyissä tutkimuksissa, mutta myös tunto- ja liikeaistin sekä aistien välisten tutkimusten tuloksia esitellään lyhyesti.

1. Johdanto

Muusikkouden aivoperustan tutkiminen on ollut vilkasta vasta 20 vuoden ajan. Lyhyestä historiastaan huolimatta aivotutkimus on osoittautunut arvokkaaksi tietolähteeksi

musiikkitutkimuksen lisäksi myös asiantuntijuuden kehittymisen ja aivojen muovautuvuuden tutkimuskentässä (Munte ym. 2002). Aivotutkimusmenetelmien avulla voidaan seurata sekunnin murto-osien tarkkuudella soittamiseen ja äänen havaitsemiseen liittyviä prosessointivaiheita sekä määrittää näiden vaatimien hermostollisten aktivaatioverkostojen sijainnit eri aivorakenteissa. Aivotutkimusten kautta saatu tieto on useimmiten ryhmäkohtaista mutta se tarjoaa myös mahdollisuuden yksilöllisten erojen tutkimiseen. Kun tutkitaan kuulijoiden toimintaa käyttäen ns. behavioraalisia menetelmiä, ts. kuuntelukokeita ja musikaalisuustestejä, voidaan tarkastella vain vastausten reaktioaikaa ja vastaustarkkuutta. Näihin muuttujiin voivat vaikuttaa tutkittavaan ominaisuuteen (esim. äänten erotteluun) liittymättömät yksilölliset ominaisuudet, kuten motivaatiotason, tarkkaavaisuuden ja keskittymiskyvyn vaihtelut. Aivotutkimusten etu on se, että useissa tutkimusasetelmissä havainto- ja ajatteluprosesseja voidaan tutkia huolimatta näiden vaihteluista.

Yleistäen voidaan todeta, että ammattimuusikoiden aivojen toiminta sekä rakenteet eroavat monella tavalla ei-muusikoiden aivoista. Eroja on luotettavimmin löydetty erityisesti niiltä aivoalueilta, joilla käsitellään muusikolle tärkeitä toimintoja, kuten sensomotorisia taitoja ja kuulohavaintoa. Sensomotorisilla taidoilla tarkoitetaan soittamisen aikana tapahtuvaa hienomotorisen toiminnan, tuntoaistin ja äänen havaitsemisen keskinäistä yhteistyötä, jonka välityksellä muusikko kykenee säätelemään seuraavien äänten esittämistä. Eroavaisuuksia on yleensä selitetty läpi elämän kestäväällä intensiivisellä harjoittelulla. Tätä ajatusta tukevat löydökset, joiden mukaan harjoittelun kesto ja määrä korreloivat kuulotietoa käsittelevien aivoalueiden toiminnallisiin ja rakenteellisiin muutoksiin. Vielä ei kuitenkaan varmasti tiedetä, minkä verran aiovasteiden ja -rakenteiden muovautumiseen muusikoilla vaikuttavat taustatekijät, kuten musikaalisuus ja geneettiset tekijät.

2. Äänten havaitsemiseen liittyvät aivotapahtumat

Muusikkojen aivotutkimusten alkutaipaleella pyrittiin selvittämään, onko kuuloaivokuoren toiminta mahdollisesti tehostuneempaa aikuisilla muusikoilla kuin ilman musiikillista koulutusta tai harrastuneisuutta olevilla verrokkikoehenkilöillä. Aivojen sähköistä äänten käsittelyyn liittyvää toimintaa rekisteröitiin aivojen sähkömagneettista toimintaa

kartoittavalla magnetoenkefalografia- eli MEG-metodilla samalla kun koehenkilöille esitettiin yksittäisiä ääniä useita kymmeniä, jopa satoja kertoja (kts. kuva 1). Näin pystyttiin eristämään kiinnostuksen kohteena oleva, ääniin liittyvä aivotoiminta muusta aivojen yleisestä aktiviteetista.

2.1 Äänten perusprosessointi

Kymmenen viime vuoden aikana on osoitettu lähinnä klassisen musiikin ammattilaisia tutkimalla, että kuuloaivokuori reagoi heidän kuunteleмиinsa ääniin voimakkaammin kuin ei-muusikkojen kuuloaivokuori. Tämä osoitettiin ensin syntetisoitujen pianoäänten suhteen (Pantev ym. 1998), mutta tuoreimpien tulosten mukaan myös yhdestä taajuuskomponentista koostuvat siniäänet aktivoivat muusikkojen kuuloaivokuorta voimakkaammin kuin ei-muusikkojen kuuloaivokuorta (Baumann ym. 2008). Hermostollisella tasolla tuloksen on tulkittu osoittavan, että muusikoilla sekä musiikilliset että myös yksinkertaiset, ”keinotekoiset” äänet aktivoivat laajempaa kuuloaivokuoren aluetta kuin ei-muusikoilla.

Tulokset herättävät kysymyksen siitä, onko kyseessä aivotoiminnan tehostuminen harjaantumisen vuoksi vai onko kuuloaivokuoren toiminnassa mahdollisesti synnynnäisiä eroja, jotka sitten johtaisivat musiikin harrastamisen pariin. Tutkimuksessa, jossa arvioitiin 5–7 -vuotiaiden soittamaan aloittavien lasten taitoja musiikillisissa, motorisissa ja muissa kognitiivisissa tehtävissä, ei löydetty merkittäviä eroja aivojen rakenteiden, aivotoiminnan tai tehtäväsuoriutumisen tasolla niihin lapsiin verrattuna, jotka eivät aloittaneet soittamista (Norton ym. 2005). Käytävissä olevien tutkimustulosten mukaan kyseessä onkin mitä todennäköisimmin harjaantumisesta aiheutuva aivotoiminnan tehostuminen. Tätä johtopäätöstä puoltaa mm. positiivinen yhteys kuuloaivokuoren aktivoitumisen ja soittamisen aloitusiän välillä: niillä muusikoilla, jotka olivat aloittaneet soittamisen ennen yhdeksän vuoden ikää, havaittiin kontrollikoehenkilöitä voimakkaammat aiovasteet (Pantev ym. 1998). Lisäksi on löydetty selkeä kuulovasteiden voimistuminen oman instrumentin äänille: viulisteilla viulun äänille ja trumpetin soittajilla trumpetin äänille (Pantev ym. 2001). Toisaalta, koska kyseessä on korrelatiivinen (ei kausaalinen) yhteys, vain

seurantatutkimukset soittamaan aloittaville lapsille pystyvät vastaamaan tyhjentävästi kysymykseen siitä, millaiset kuuloaivokuoren toiminnot mahdollistavat muusikkouden kehittymisen (ks. Huotilainen & Putkinen, painossa).

<kuva 1 suurin piirtein tähän>

2.2 Kuulomuistimallit

Sen lisäksi, mitä edellä todettiin muusikkojen kuuloaivokuoren tehostuneesta äänen käsittelystä, on syytä tarkastella sellaista ääniin liittyvää aivotoimintaa, joka mahdollistaa erilaisten äänten ja äänijatkumoiden erottelun toisistaan. Tällainen sangen yksinkertaiselta kuulostava tehtävä edellyttää primitiivisen muistimekanismin toimintaa: useista äänen piirteistä on muodostettava hermostollinen muistimalli. Jokaista kuultua ääntä verrataan tähän muistimalliin. Mikäli ne eivät eroa toisistaan, muistimalli vahvistuu. Mikäli niissä on pienikin akustinen eroavaisuus, muodostuu aivoissa yhteensopimattomuusreaktio, joka voidaan aivotutkimuksissa havaita ns. MMN-vasteen (engl. *mismatch negativity*) muodostumisena (Kujala ym. 2007). Äänten muistimallit muodostuvat automaattisesti ilman ääniin suunnattua tarkkaavaisuutta. Yksinkertaisesta toimintamallistaan huolimatta ne luovat pohjan esimerkiksi musiikin ja puheen säännönmukaisuuksien hahmottamiselle (Brattico ym. 2006; Shtyrov & Pulvermüller 2007).

Useissa yhteyksissä on osoitettu, että muusikoilla äänimuistimallit ovat tarkempia kuin musiikkia harrastamattomilla koehenkilöillä. Tämäkin tutkimustraditio sai alkunsa 1990-luvun lopulla, kun viulistien ja ei-muusikoiden äänen korkeusmuutosten käsittelyä aivoissa vertailtiin (Koelsch ym. 1999) Kokeen aikana koehenkilöille esitettiin soinnuista koostuvia äänisarjoja: suurin osa soinnuista oli kolmesta siniäänestä muodostettuja G-duurisointuja, mutta osassa sointuja keskimäinen ääni oli hieman epävireinen. MMN-vaste muodostui viulisteilla näihin epävireisiin sointuihin, kun he keskittyivät muuhun kuin äänten kuunteluun, samoin silloin kun he kuuntelivat äänisarjoja. Ei-muusikoilla MMN-vastetta ei muodostunut kummassakaan osassa koetta. Tästä pääteltiin, että viulisteilla on

kuuloaivokuorella äänenkorkeutta koodaavat äänimuistimallit, jotka aktivoituvat heidän tarkkaavaisuutensa suunnasta riippumatta – toisin sanoen sekä lukemisen että äänten kuuntelun aikana. Ei-muusikoille näitä äänimuistimalleja ei kokeen aikana ehtinyt muodostua. Yksinkertaisten siniäänten joukossa esitettyihin, äänen korkeudeltaan muita ääniä korkeampiin ääniin sen sijaan muodostui MMN hyvin samankaltaisesti sekä muusikoilla että ei-muusikoilla. Tämän tulkittiin osoittavan, että äänen korkeuden muistimallien muodostuminen on herkistynyt viulisteilla erityisesti musiikillisesti relevanttien äänten (kuten sointujen) suhteen.

Nager ym. (2003) vertailivat musiikillisen taustansa suhteen toisistaan eroavia ammattimuusikoita, kapellimestareita ja pianisteja. Heillä erityisen kiinnostuksen kohteena olivat äänilähteen sijainnin havaitsemisen aivomekanismit. Koehenkilöille esitettiin ääniä eteen ja sivuille sijoitetuista kuudesta kaiuttimesta. Koehenkilöiden tuli osoittaa huomanneensa joko heidän edessään olevasta kaiuttimesta esitetyt äänet tai äärimmäisenä oikealla olevasta kaiuttimesta esitetyt äänet. Tulosten mukaan kapellimestareilla oli pianisteja tarkempi kohdistetun tarkkaavaisuuden kenttä erityisesti sivuilta tulevien äänten paikantamisen suhteen. Lisäksi heillä, toisin kuin pianisteilla, äänilähteen yllättäville muutoksille muodostunutta MMN-vastetta seurasi P3a-vaste, joka ilmentää tahattoman tarkkaavaisuuden suuntaamista. Näin ollen kapellimestareilla äänilähteen käsittelyn kuulojärjestelmässä osoitettiin eroavan pianistien äänenkäsittelystä. Tämä tapahtui muusikkojen keskittyessä äänten kuunteluun ja myös, kun ko. äänet olivat annetun tehtävän suhteen epäolennaiset.

Viimeaikainen tutkimus osoittaa äänen prosessoinnin eroja myös laulajien, soittavien laulajien ja ei-muusikoiden välillä. Tulosten mukaan laulajilla ovat nopeammat MMN- ja P3a-vasteet äänenkorkeuden muutoksille verrattuna ei-muusikoihin (Nikjeh ym. 2008). Laulajilla oli erityisesti voimakkaampi MMN pienimmälle (1,5% muutos standardiääneen nähden) äänenkorkeuden muutokselle kuin soittavilla muusikoilla ja ei-muusikoilla. Myös tahattoman tarkkaavaisuuden siirtymiseen liittyvä P3a vaste pienimmille korkeuden muutoksille oli sekä soittavilla että pelkästään laulavilla laulajilla nopeampi kuin soittajilla. Hitaimmin P3a syntyi ei-muusikoille. Harjoitteluvuosien määrä ei korreloinut MMN:n

voimakkuuteen, mutta mitä enemmän harjoitteluvuotia oli, sitä nopeammin muusikolla esiintyi MMN helpoimmalle (6%) ja vaikeimmalle (1,5%) äänenkorkeuden muutokselle.

Kokonaisuudessaan Koelschin ym. (1999), Nagerin ym. (2003) ja Nikjehin ym. (2008) tulokset osoittavat, että musiikkitaitojen hankkimisen aikana saadut erityistaidot ilmenevät aivotoiminnassa hyvin monipuolisesti. On myös viitteitä siihen, että näiden taitojen hankkimisessa käytetyt oppimis- ja opetusstrategiat heijastuvat kuulomuistin aivokorrelaateissa. Tämän hetkisten tulosten mukaan muusikkoutta kuulonvaraisesti harjoittavat muusikot ja nuotinvaraisia strategioita hyödyntävät muusikot eroavat toisistaan sen suhteen, kuinka äänimuistimallit muodostuvat erityisesti suhteellisen monimutkaiselle, transponoidulle, melodiankaltaiselle äänimateriaalille (Tervaniemi ym. 2001; Seppänen ym. 2007). Esimerkiksi harjoittelustrategioiden merkitystä kuulovasteisiin on tutkittu vertailemalla muusikoita, jotka suosivat korvakuulolle perustuvaa soittamista (kuten improvisaatiota, harjoittelu kuulonvaraisesti ilman nuotteja ja äänitteiden kuuntelua harjoittelussa) muusikoihin, jotka suosivat enemmän muita harjoittelustrategioita (Seppänen ym. 2007). Ryhmien soiton aloitusikä, harjoittelutunnit viikossa, musiikillisen aktiviteettien määrä ja musiikkikoulutuksen määrä vuosina kontrolloitiin ryhmien välillä. Kävi ilmi, että sekä improvisointia ja muita harjoittelutapoja suosivat muusikot prosessoivat MMN-vasteen perusteella samankaltaisesti yksinkertaisia äänen piirteitä (kuten äänenkorkeutta, kestoaa, äänen tulosuuntaa, intensiteettiä). Lisäksi molemmat ryhmät erottelivat tarkkailutehtävän aikana yhtä hyvin lyhyiden äänisarjojen muutoksia, joissa joko melodian loppusävel tai toiseksi viimeinen sävel vaihtui. Sen sijaan passiivisessa kuuntelutilanteessa improvisoivat muusikot prosessoivat nopeammin (MMN-vasteen perusteella) loppusävelen vaihtumista, kun taas muita harjoittelutapoja suosivat prosessoivat nopeammin toiseksi viimeisen sävelen vaihtumista (Seppänen ym. 2007). Harjoittelutaipumuksilla ei näyttäisi olevan siis vaikutusta perusäänen prosessointiin. Voisi tosin spekuloida, että improvisoinnissa olennaista on nimenomaan miten melodia jatkuu, ja siksi improvisoivat muusikot prosessoivat nopeammin melodian lopun yllättäviä muutoksia. Muita harjoittelutapoja suosivat muusikot omasivat enemmän musiikin teorian opintoja ja heillä oli parempi suoriutuminen musikaalisuustestissä. Voikin olla, että he olivat harjaantuneempia havaitsemaan melodiahahmon rikkoutumista.

Uusin tutkimussuuntaus musiikkiaivotutkimuksen alueella on musiikin tunnevaikutusten aivoperustan selvittäminen. James ym. (2008) osoittivat äskettäin, että musiikillisten odotusten vastaiset äänet voivat aktivoida erityisesti muusikoilla myös niitä aivoalueita, joiden perinteisesti on katsottu osallistuvan tunteiden säätelyyn. Kokeeseen osallistui ammattipianisteja ja ilman musiikillista koulutusta olevia henkilöä. Heille esitettiin koetta varten sävellettyjä noin 10 sek. mittaisia pianokappaleita, joiden lopussa olevia ääniä kohtaan heille esitettiin yksinkertainen kysymys: Päätyykö kappale sopivalla tavalla? Kolmasosa kappaleista päättyi odotetulla tavalla toonikaan, kolmasosa VI asteen sointuun ja kolmasosa IV asteen sointuun. Aivovasteet osoittivat, että erityisesti muusikot reagoivat voimakkaasti ja verrattain nopeasti odotusten vastaisiin ääniin. Tämän aivovasteen voitiin osoittaa muodostuvan aivojen sisäosissa, insulassa, hippokampuksessa ja amygdalassa. Näistä rakenteista erityisesti amygdalan tiedetään osallistuvan tunteiden säätelyyn ja myös musiikin tunnesisältöjen käsittelyyn. Voitaneenkin päätellä, että erityisesti musiikin ammattilaisilla hienovarainen musiikillisten yllätysten kohtaaminen voi johtaa samanaikaiseen (mahdollisesti negatiivisten) tunnesisältöjen aktivoitumiseen.

3. Rakenteelliset aivomuutokset muusikoilla

Muusikoiden aivoista on löydetty useita rakenteellisia muutoksia, jotka ovat seurausta vuosia kestäneestä harjoittelusta. Muutokset sijoittuvat soittamiselle olennaisille kuulo-, tunto- ja liikeaistitietoa käsitteleville aivoalueille. Muutokset aivoissa johtuvat aivojen itseorganisoitumisen periaatteesta synapsiyhteyksien muodostumisessa: käytä tai menetä. Oppimisessa olemassa olevat synaptiset yhteydet vahvistuvat, mikä tarkoittaa hermosolujen välisen tiedonkulun tehostumista. Lisäksi voi syntyä uusia yhteyksiä. Aivoissa nämä voivat näyttäytyä vahvempina tai nopeampina reaktioina tai aktivoituneen aivoalueen laajentumisena. Sen lisäksi, että tietyt aivoalueet ovat harjoittelun myötä optimoituneet musiikin harjoittamiselle, myös näiden aivoalueiden välinen yhteistyö on muusikoilla tehokkaampaa verrattuna ei-muusikoihin. Esimerkiksi tunto- ja kuuloaistin välinen tiedonkulku on muusikoilla tehokkaampaa kuin ei-muusikoilla (mm. tutkimus trumpeteilla,

Schulz ym. 2003). Rakenteelliset muutokset heijastavat usein soitinspesifisiä tarpeita. Esimerkiksi ammattipianisteilla on molemmilla aivopuoliskoilla tasapuolisempi (symmetrisempi) liikeaivokuoren edustus käsille kuin ei-muusikoilla luultavasti siksi, että pianistit harjoittavat myös ei-dominoivaa kättä (Amunts ym. 1997). Lisäksi aivot toiminnan tehostuminen näyttäisi olevan erityisen voimakasta muusikoilla, jotka ovat aloittaneet soittamisen alle 7-vuotiaana. Rakenteellisten muutosten myötä hermostollinen muovautuvuus voi tehostua. Esimerkiksi liikeaivokuoren muovautuvuus näyttäytyy muusikoilla tehokkaana motorisena oppimisena (Rosenkranz ym. 2007). Seuraavissa kappaleissa käsitellään tarkemmin millaisia rakenteellisia aivomuutoksia muusikoilta on viimeaikaisissa tutkimuksissa löydetty.

3.1 Äänen käsittelyyn ja tiedon kulkuun liittyvät rakenteelliset muutokset

Musiikin kuuntelun ja äänitiedon käsittelyn harjaantuminen aiheuttavat erityisesti kuuloaivokuoren rakenteellisiä muutoksia muusikoilla. Taitojen harjoitteluun ja oppimiseen liittyviä rakenteellisiä muutoksia on havaittu harmaan ja valkean aineen koostumuksessa taidon vaatimilla aivokuoren alueilla. Harmaa aine eroaa valkoisesta siten, että se koostuu solurungoista, kun taas valkoinen aine koostuu myelinisoituneista (ja siten valkoisista) aksoneista. Myeliinivaippa aksonien ympärillä nopeuttaa tiedonkulkua hermostossa. Harjoittelun määrä voi vaikuttaa harmaan aineen muutoksiin. Esimerkiksi ammattimuusikoilla on amatöörisoittajiin ja ei-muusikoihin verrattuna enemmän harmaata ainetta primaarilla kuuloaivokuorella (Schneider ym. 2002). Lisäksi ilmeni, että mitä enemmän harmaata ainetta henkilöllä havaittiin, sitä voimakkaampi heräteväste hänellä syntyi kokeessa esitetyille äänille. Rakenteelliset muutokset ja herätevästeen voimakkuus korreloivat myös siihen, kuinka hyvin henkilö osasi Advanced Measures of Musical Audiation -musikaalisuustestissä erotella, olivatko esitetyt melodianpätkät samoja vai erilaisia (Schneider ym. 2002). Harmaan aineen muutokset ilmensivät luultavasti tehostunutta kuulotiedon käsittelyä, joka näyttäytyi myös parempana testissä suoriutumisenä. Muusikoilla on löydetty harmaan aineen koostumusmuutoksia myös liike- ja tuntoaistialueilla. Esimerkiksi miespuolisilla ammattimuusikoilla (kosketinsoittajilla) oli muun muassa näillä

alueilla tiheämpi harmaan aineen koostumus kuin amatöörisoittajilla ja ei-muusikoilla (Gaser & Schlaug 2003). Lisäksi muutoksia nähtiin pääläen alueilla, jotka käsittelevät visuospatiaalista tietoa, samoin äänen prosessointiin liittyvillä alueilla. Visuospatiaalisten alueiden toiminnan tehostuminen viitanee nuotinlukutaitoon ja sen aivoperustaan

Kaksikäätinen soittaminen sekä käsien ja jalkojen yhtäaikainen koordinointi musisoidessa vaativat tehokasta aivopuoliskojen välistä tiedonkulkua. Yksi tärkeimpiä aivopuoliskojen välistä tietoa kuljettava rakenne on aivokurkiainen. Muusikoilla on havaittu enemmän valkoista ainetta aivokurkiuaisessa kuin ei-muusikoilla. Tämä viittaa tehostuneeseen tiedonkulkuun aivopuoliskojen välillä (Schmithorst & Wilke 2002). Miesmuusikoilla on lisäksi havaittu laajempi aivokurkiaisen etuosa kuin ei-muusikkomiehillä (Lee ym. 2003). Samankaltaisia eroja ei havaittu naismuusikoiden ja ei-muusikkonaisten välillä. Tämä saattaa johtua siitä, että naisilla aivotoiminnat ovat luonnostaan hajautuneet symmetrisemmin eri aivopuoliskoille.

<kuva 2 suurin piirtein tähän>

Aikuisena ilmenevät erot valkoisen aineen määrässä korreloivat ilmeisesti myös harjoittelun määrään ja erityisesti lapsuudenaikaiseen harjoitteluun. Tutkimuksessa, jossa konserttipianistit arvioivat harjoittelutuntiansa määrän lapsuudessa (11 vuotiaaksi asti), nuoruudessa (12–16 v) ja aikuisuudessa (17 vuotiaasta tutkimukseen asti), havaittiin, että heidän valkoisen aineen koostumuksensa korreloi merkitsevästi harjoittelutuntimäärään eri aivojen alueille eri ikäkausina (Bengtsson ym. 2005). Lapsuuden harjoittelumäärä korreloi valkean aineen koostumukseen aivokurkiuaisessa ja liikehermoratoja sisältävillä alueilla, jotka ovat kriittisiä sormien liikkeille, kaksikäätisyyden koordinaatiolle sekä liikesarjojen oppimiselle. Nämä alueet jatkavat kehittymistään jopa 17 ikävuoteen asti. Nuoruudessa nämä alueet korreloivat harjoittelun määrään samalla tavoin. Aikuisiän harjoittelun määrään korreloi etuaivojen assosiaatoratojen myelinisaatio, joka aikuisiällä jatkuu kolmannelle vuosikymmenelle. Vaikka harjoittelun tuntimäärä oli lapsuudessa olennaisesti pienempi kuin aikuisena, lapsuuden aikainen harjoittelu korreloi suurimpaan osaan valkoisen aineen muutoksista (Bengtsson ym. 2005). Tämä saattaa tarkoittaa sitä, että lapsuudessa on

optimaalinen vaihe oppia uusia taitoja, koska silloin aivot kehittyvät ja muovautuvat helpommin kuin aikuisuudessa.

Harmaan ja valkean aineen koostumusmuutosten lisäksi muusikoilla saattaa olla spesifi aineenvaihduntatuotteiden pitoisuus musiikkia käsittelevillä aivoalueilla. Magneettikuvantamisen avulla on löydetty, että N-asetyyliaspartaatin (NAA) aineenvaihduntatuotteen pitoisuus oli merkittävästi suurempi muusikoilla vasemman aivopuoliskon ohimolohkolla, *planum temporale*, kuin ei-muusikoilla (Aydin ym. 2005). NAA liittyy hermosolujen ja hermotukisolujen väliseen tiedonkulkuun. *Planum temporale* on usein liitetty yleisesti ottaen kielelliseen prosessointiin ja musiikin osalta erityisesti absoluuttisen sävelkorvaan (Keenan ym. 2001). Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että NAA-taso korreloi musiikkikoulutuksen (ts. soittovuosien) kokonaiskestoon mutta ei siihen, kuinka paljon muusikko käytti aikaa musiikillisiin aktiviteetteihin viikossa, harjoittelun määrään tai soittamisen aloituskään (Aydin ym. 2005). Tutkijoiden mukaan nimenomaan pitkäkestoinen musiikkikoulutus säätelee NAA:n pitoisuutta.

3.2 Rakenteellisten muutosten taustatekijöitä

Aivotutkimusten mukaan on viitteitä siitä, että musiikillisen koulutuksen kesto, soittoharjoittelun määrä, soittamisen intensiteetti ja soittamisen aloituskään korreloivat toiminnallisiin ja rakenteellisiin muutoksiin ammattimuusikoilla. Kuten edellä jo esitettiin, korrelaatiot aivorakenteiden tai ääni-, tunto- ja liikeaistiedustusten aivokuorimuutosten välillä ovat usein vahvimpia muusikoilla, jotka ovat aloittaneet soittamisen lapsena alle 7–9 -vuotiaina. Aloitusikänsä merkitys korostuu erityisesti motoristen taitojen oppimisessa, mikä saattaa tarkoittaa sitä, että liikesarjojen oppimiselle olisi optimaalisia aikaikkunoita lapsuudessa. Esimerkiksi pianisteilla varhainen soittamisikä tehosti liikeaivokuorien tiedonkulkua aivopuoliskojen välillä (Rosenkranz ym. 2007). Samaisessa tutkimuksessa havaittiin lisäksi, että viiden viimeisen vuoden soittamisen määrä muusikoilla korreloi positiivisesti liikeaivokuoren herätevästeiden muutoksiin. Elbert ym. (1995) puolestaan havaitsivat, että viulisteilla vasemman käden sormien edustusten laajuus tuntoaistiaivokuorella korreloi soittamisen aloitusikänsä kanssa. Toisessa tutkimuksessa viulisteilla löydettiin myös merkitsevästi suurempi vasemman käden edustus primaareilla

tunto- ja liikeaistialueilla kuin ei-muusikoilla, kuitenkin ilman korrelaatiota edustusten koosta aloittamisikään, soittovuosiin tai päivittäiseen harjoittelun määrään (Schwenkreis ym. 2007).

Aloitusikä tai soittamisen intensiteetti voivat muusikoilla liittyä erityisesti pikkuaivomuutoksiin. Pikkuaivot osallistuvat liikesarjojen oppimiseen, liikkeiden ajoittamiseen ja tuntoliikeaistin yhdistämiseen sulavaksi liikesuorituksiksi. Hutchinsonin ym. (2003) tutkimuksessa aloitusikä ja soittovuosien määrä eivät miesmuusikoilla korreloineet pikkuaivojen suhteelliseen tilavuuskoostumukseen, vaikka elämänkestävä musiikkikoulutuksen intensiteetti, ts. päivittäinen keskimääräinen tuntimäärä vuosien aikana, siihen korreloikin. Toisessa tutkimuksessa löydettiin puolestaan korrelaatio aloitusiän ja pikkuaivoaktivaation välillä, eli mitä varhaisemmin muusikko on aloittanut soittamisen, sitä voimakkaampi aktivaatio havaittiin kokeen aikana soittavan käden puoleisessa pikkuaivossa (Lotze ym. 2003).

4. Lopuksi

Muusikoiden aivoissa soittamisen ja musiikin prosessoinnin vaatimukset näkyvät sekä toiminnallisina että rakenteellisina muutoksina. Pitkäkestoisesta harjoittelusta aiheutuneet aivomuutokset tehostavat erityisesti musiikillisesti relevanttien, monimutkaisten ärsykkeiden prosessointia. Muutokset voivat heijastaa myös tiettyä muusikkouden lajia, ammattitaidon tasoa tai harjoittelutapaa sekä jossain määrin sitä, kuinka varhain soittaminen on aloitettu.

Tulevaisuudessa voidaan selvittää tarkemmin, missä määrin yksilöllinen biologinen perimä motoristen taitojen, äänen prosessoinnin ja persoonallisuuden muovautumisen yhteydessä vaikuttaa muusikoksi kehittymiseen. Tulevien tutkimusten haasteina on myös selvittää, missä määrin musiikillinen koulutus yleistyy muille ajattelutoimintojen alueille. Alustavat tutkimukset osoittavat, että ei-muusikoihin verrattuna muusikoilla on varhaisessa äänen prosessoinnin vaiheessa voimakkaampia vasteita musiikin lisäksi myös puhesignaaliin (Musacchia ym. 2007). Tämänkaltaisilla tuloksilla on merkitystä sille, missä määrin musiikin opettamista tulisi harkita yleisessä perusopetuksessa.

Lähteet

- Amunts, K., Schlaug, G., Jäncke, L., Steinmetz, H., Schleicher, A., Dabringhaus, A. & Zilles, K. 1997. Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain. *Human Brain Mapping* 5: 206–215.
- Aydin, K., Ciftci, K., Terzibasoglu, E., Ozkan, M., Demirtas, A., Sencer, S. & Minareci, O. 2005. Quantitative proton MR spectroscopic findings of cortical reorganization in the auditory cortex of musicians. *American Journal of Neuroradiology* 26: 128–136.
- Baumann, S., Meyer, M. & Jäncke, L. (2008). Enhancement of auditory-evoked potentials in musicians reflects an influence of expertise but not selective attention. *Journal of Cognitive Neuroscience* 20: 2238–2249.
- Bengtsson, S., Nagy, Z., Skare, S., Forsman, L., Forsberg, H. & Ullén, F. 2005. Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nature Neuroscience* 8: 1148–1150.
- Brattico, E., Tervaniemi M., Näätänen, R. & Peretz, I. 2006. Musical scale properties are automatically processed in the human auditory cortex. *Brain Research* 1117: 162–174.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C., Rockstroh, B. & Taub, E. 1995. Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science* 270: 305–307.
- Gaser, C. & Schlaug, G. 2003. Brain structures differ between musicians and non-musicians. *The Journal of Neuroscience* 23: 9240–9245.
- Hutchinson, S., Lee, L., Gaab, N. & Schlaug, G. 2003. Cerebellar volume of musicians. *Cerebral Cortex* 13: 943–949.
- Huotilainen, M. & Putkinen, V. (painossa). Musiikkiharrastus vaikuttaa voimakkaasti lapsen aivotoimintaan. *Musiikki-lehti*.
- James, C.E., Britz, J., Vuilleumier, P., Hauert, C.A. & Michel, C.M. 2008. Early neuronal responses in right limbic structures mediate harmony incongruity processing in musical experts. *NeuroImage* 42: 1597–1608.
- Keenan, J., Thangaraj, V., Halpern, A. & Schlaug, G. 2001. Planum temporale and absolute pitch. *NeuroImage* 14: 1402–1408.
- Koelsch, S., Schröger, E. & Tervaniemi, M. 1999. Superior pre-attentive auditory processing in musicians. *NeuroReport* 10: 1309–1313.

Kujala, T., Tervaniemi, M. & Schröger, E. 2007. The mismatch negativity in cognitive and clinical neuroscience: theoretical and methodological considerations. *Biological Psychology* 74: 1–19.

Lee, D., Chen, Y. & Schlaug, G. 2003. Corpus callosum: musician and gender effects. *NeuroReport* 14: 205–209.

Lotze, M., Scheler, G., Tan, H.-R., Braun, C. & Birbaumer, N. 2003. The musician's brain: functional imaging of amateurs and professionals during performance and imagery. *NeuroImage* 20: 1817–1829.

Münte, T., Altenmüller, E. & Jäncke, L. 2002. The musician's brain as a model of neuroplasticity. *Nature Neuroscience* 3: 473–478.

Musacchia, G., Sams, M., Skoe, E. & Kraus, N. 2007. Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proceedings of National Academy of Sciences U S A* 104: 15894–15898.

Nager, W., Kohlmetz, C., Altenmüller, E., Rodriguez-Fomells, A. & Münte, T. 2003. The fate of sounds in conductor's brains: an ERP study. *Cognitive Brain Research* 17: 83–93.

Nikjeh, D., Lister, J. & Frisch, S. 2008. Hearing of note: An electrophysiologic and psychoacoustic comparison of pitch discrimination between vocal and instrumental musicians. *Psychophysiology* 45: 994–1007.

Norton, A., Winner, E., Cronin, K., Overy, K., Lee, D. & Schlaug, G. 2005. Are there pre-existing neural, cognitive, or motoric markers for musical ability? *Brain and Cognition* 59: 124–134.

Pantev, C., Oostenveld, R., Engelien, A., Ross, B., Roberts, L. & Hoke, M. 1998. Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature* 392: 811–814.

Pantev, C., Roberts, L., Schulz, M., Engelien, A. & Ross, B. 2001. Timbre-specific enhancement of auditory cortical representations in musicians. *NeuroReport* 12: 169–174.

Rosenkranz, K., Williamon, A. & Rothwell, J. 2007. Motorcortical excitability and synaptic plasticity is enhanced in professional musicians. *The Journal of Neuroscience* 27: 5200–5206.

Schmithorst, V. & Wilke, M. 2002. Differences in white matter architecture between musicians and non-musicians: a diffusion tensor imaging study. *Neuroscience Letters* 321: 57–60.

Schneider, P., Scherg, M., Dosch, M., Specht H., Gutschalk, A. & Rupp, A. 2002. Morphology of Heschl's gyrus reflects enhanced activation in the auditory cortex of musicians. *Nature Neuroscience* 5: 688–694.

- Schulz, M., Ross, B. & Pantev, C. 2003. Evidence for training-induced crossmodal reorganization of cortical functions in trumpet players. *NeuroReport* 14: 157–161.
- Schwenkreis, P., El Tom, S., Ragert, P., Pleger, B., Tegenthoff, M. & Dinse, M. 2007. Assessment of sensorimotor cortical representation asymmetries and motor skills in violin players. *European Journal of Neuroscience* 26: 3291–3302.
- Seppänen, M., Brattico, E., & Tervaniemi, M. 2007. Practice strategies of musicians modulate neural processing and the learning of sound-patterns. *Neurobiology of Learning and Memory* 87: 236–247.
- Shtyrov Y. & Pulvermüller, F. 2007. Language in the mismatch negativity design: Motivations, benefits, and prospects. *Journal of Psychophysiology* 21: 176–187.
- Tervaniemi, M., Rytkönen, M., Schröger, E., Ilmoniemi, R. & Näätänen, R. 2001. Superior formation of cortical memory traces for melodic patterns in musicians. *Learning & Memory* 8: 295–300.
- Tervaniemi, M., Szameitat, A. J., Kruck, S., Schröger, E., Alter, K., De Baene, W. & Friederici, A. D. 2006. From air oscillations to music and speech: functional magnetic resonance imaging evidence for fine-tuned neural networks in audition. *Journal of Neuroscience* 26, 8647–8652.
- Tervaniemi, M. & van Zuijen, T. L. 1999. Methodologies of brain research in cognitive musicology. *Journal of New Music Research* 28: 200–208.