

KUULOTIEDON KÄSITTELY 5—6-VUOTIAILLA

**– Kuulovasteet, niiden paikantaminen ja yhteys
käyttäytymistason testien tuloksiin**

Terttu Kananen
Pro gradu –tutkielma
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto
Syyskuu 2011

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Psykologian laitos

KANANEN, TERTTU: Kuulotiedon käsittely 5—6-vuotiailla: Kuulovasteet, niiden paikantaminen ja yhteys käyttäytymistason testien tuloksiin

Pro gradu –tutkielma, 31 s.

Ohjaaja: Jarmo Hämäläinen

Psykologia

Syyskuu 2011

Tutkimuksen aiheena oli 5—6-vuotiaiden lasten kuulotiedon käsittely ja sen kehittyminen. Tutkitavina oli 25 tyypillisesti kehittyntä lasta: 13 tyttöä ja 12 poikaa. 5-vuotiaita oli yhdeksän, 6-vuotiaita oli 16. Tutkittavat oli rekrytoitu Jyväskylästä ja sen lähialueilta Väestörekisterikeskukselta saatujen tietojen pohjalta. Tutkimuksessa tehtiin sekä EEG-mittaus että käyttäytymistason testejä. EEG-mittauksessa käytettiin ns. oddball-asetelmaa, jossa taajuudeltaan 500 Hz:n siniäänäen seassa soitettiin poikkeavana ärsykkeenä 425 Hz:n siniääntä. Käyttäytymistason testejä oli kaksi: Ensimmäisessä tutkittavien piti kuunnella kolmen siniäänäen joukosta, mikä äänistä oli taajuudeltaan korkeampi kuin kaksi muuta. Toisessa testissä kuunneltavina oli synteettisesti muodostettuja *y*- ja *i*-vokaaleja, ja tutkittavan piti erottaa kolmen vokaalin joukosta yksi poikkeava.

Tutkimuksen perusteella 5—6-vuotiaiden lasten kuulovasterakenne muodostuu P1—N2-aalloista, joista P1:n jännitehuippu osuu noin 100—115 ms ja N2:n noin 200—225 ms ärsykkeestä. Lisäksi poikkeavan äänen kuulovasteessa on näkyvissä ns. poikkeavuusnegatiivisuus- eli MMN-aalto (mismatch negativity) noin 230—250 ms ärsykkeestä. Lähdeanalyysin perusteella P1- ja N2-aaltojen syntypaikkaa kuvasi tangentialisesti suuntautunut dipolipari, joka sijoittui molempiin aivopuoliskoihin ylemmän temporaalipoimun sisäosiin. N2-aallon taustalta löytyi myös toinen dipolipari, joka oli orientaatioltaan radiaalinen ja sijoittui myös ylemmälle temporaalipoimulle, mutta tangentialista lateralisemmaksi. MMN-aalto syntyi yhdestä, tangentialisesti orientoituneesta dipoliparista, joka sijoittui ylemmän temporaalipoimun sisäosiin.

Kuulovasteissa ei ollut eroa 5- ja 6-vuotiaiden välillä, mutta MMN-aallossa oli suurta yksilöllistä vaihtelua. Käyttäytymistason testien perusteella voitiin nähdä, että tietoinen taajuuden erottelukyky kehittyy 5 ja 6 ikävuoden välillä. MMN-aallon ja tietoisin taajuuden erottelukyvyn välille ei löydetty mitään yhteyttä. Tutkimuksen tulokset antavat aiheen olettaa, että siniääniin liittyvän kuulotiedon käsittelyn kehitys on 5—6-vuotiailla vielä keskeneräinen.

Avainsanat: ERP-tutkimus, jännitevasteet, kuulovasteet, herätevasteet, P1, N2, MMN, mismatch negativity, kuulovasteiden lähdeanalyysi

SISÄLLYS

JOHDANTO	1
Kuulotiedon käsittelyn tutkiminen: kuulovasteet	2
Lasten kuulovasteet.....	3
Kuulovasteiden paikantamisesta	4
Kuulotiedon käsittelyn tutkiminen: käyttäytymistason testit ja MMN.....	5
Tutkimuskysymykset	6
TUTKIMUKSEN TOTEUTUS	8
Tutkittavat	8
Koeasetelma: EEG-mittaus	8
Koeasetelma: käyttäytymistason testit.....	9
EEG:n tallennus ja käsittely	9
Aineiston analysointi.....	10
TULOKSET	12
P1	14
N2.....	15
MMN.....	16
Käyttäytymistason testit.....	20
MMN ja tietoinen erottelukyky.....	21
POHDINTA	22
Kuulovasteen rakenne ja lähteen paikat.....	22
Käyttäytymistason testit ja yhteys MMN-aaltoon	25
Lopuksi	26
LÄHTEET	28

JOHDANTO

Kuulotiedon käsittelyä voidaan tutkia muun muassa aivosähkökäyrästä eli EEG:stä esille saatavien tapahtumasidonnaisten jännitevasteiden (event-related potentials, ERP) avulla (Nyrke, 1994; Näätänen, 1992; Partanen, 1994; Luck, 2005). Viime vuosina on yleistynyt myös jännitevasteiden synty-paikkojen selvittäminen paikantamalla ns. virtadipoleja jännitevasteiden lähdeanalyysin avulla (esim. Luck, 2005). ERP- eli jännitevastetutkimuksia on tehty paljon aikuisilla ja melko runsaasti myös kouluikäisillä lapsilla, mutta alle kouluikäisiä lapsia koskevaa tutkimustietoa on niukasti, ja varsinkin jännitevasteiden paikannuksen analyysia on käytetty alle kouluikäisten tutkimuksissa vähän. Tässä tutkimuksessa keskitytäänkin alle kouluikäisten lasten kuulotiedon käsittelyyn: tarkoituksena on selvittää kuulotiedon käsittelyssä ilmeneviä keskeisiä jännitevasteita, niiden mahdollisia kehityksellisiä muutoksia, niiden paikantamista aivoissa sekä sitä, onko vasteilla yhteyttä käyttäytymistason testien tuloksiin.

Lasten kuulotiedon käsittely on kiinnostava tutkimusalue myös siksi, että sen tarkastelusta voi avautua polku ymmärtää myös puheäänteiden käsittelyn kehittymistä ja sitä kautta lukivaikeuden syntyä. Tutkimuksissa on nimittäin havaittu, että kuulotiedon käsittelyn ongelmat liittyvät puheäänten piirteiden hahmottamisen ongelmiin ja sitä kautta lukivaikeuteen (esim. Baldeweg ym., 1999; Goswami ym., 2002; Hämäläinen ym., 2005). Dyslektikoiden vaikeus erotella äänteitä toisistaan näkyy jo aivojen esitietoisessa ja automaattisessa kuulotiedon käsittelyssä, joka poikkeaa dyslektikoilla selvästi verrattuna tyypillisesti kehittyviin lapsiin (Schulte-Körne, Deimel, Bartling, & Remschmidt, 1998), ja tämän taustalla voi olla yleisempi kuulotiedon käsittelyn vaikeus (esim. Hämäläinen ym., 2005). On myös oletettu, että kielellisistä häiriöistä kärsivien lasten kuuloaivo-kuori kehittyisi hitaammin kuin tyypillisesti kehittyvillä lapsilla (McArthur & Bishop, 2004).

Jotta voitaisiin sanoa jotain dysleksiariskilasten poikkeavasta kuulotiedon käsittelystä ja sen kehittymisestä, on saatava vertailukelpoista tietoa tavallisten, ei-riskiryhmään kuuluvien lasten kuulotiedon käsittelystä ja sen kehittymisestä. Suurin osa aikaisemmasta tutkimuksesta on kuitenkin keskittynyt aikuisiin tai kouluikäisiin lapsiin, joten tietoa varhaisesta kuulotiedon käsittelyn kehittymisestä ei ole kovin paljon ja lisäksi tulokset ovat osin ristiriitaisia. Tämän vuoksi on tärkeä tutkia jo alle kouluikäisiä lapsia ja heidän kuulotiedon käsittelyään.

Kuulotiedon käsittelyn tutkiminen: kuulovasteet

Kuulotiedon käsittelyä voidaan tutkia aivosähkökäyrän eli EEG:n avulla: tutkittavalle soitetään ääniä ja samalla päänahalle asetetut elektrodit mittaavat hermosolujen toimintaa; tarkoituksena on saada esille tapahtumasidonnaisia jännitevasteita nimenomaan kuultuun ääneen (Degerman, Salmi, Alho, & Rinne 2006; Luck, 2005; Nyrke, 1994; Näätänen, 1989; Partanen, 1994). Aivosähkökäyrässä näkyy laajojen hermosolujoukkojen toiminta, niiden postsynaptiset potentiaalit. Koska jännitevastetutkimuksessa on tarkoituksena saada esille juuri tutkittavaan ärsykkeeseen liittyvä hermosolujen toiminta, pyritään muun aivojen aktiivisuuden näkyminen lopputuloksena saatavassa käyrässä minimoimaan. Tämän vuoksi käytetään keskiarvoistusmenetelmää: samaa tapahtumaa (tässä tutkimuksessa ääntä) toistetaan kymmeniä tai satoja kertoja, ja ääneen (tai muuhun valittuun ärsykkeeseen) aikalukituista aivosähkökäyräjaksoista lasketaan keskiarvo (esim. Luck, 2005; Nyrke, 1994). Näin satunnainen tausta-aktiivisuus minimoituu, ja saadaan esille tapahtumasidonnainen jännitevaste, joka koostuu peräkkäisistä aalloista. Koska tässä tutkimuksessa käsitellään nimenomaan kuuloärsykkeisiin liittyviä jännitevasteita, käytän jatkossa tapahtumasidonnaisista jännitevasteista (ERP) pääasiassa nimitystä kuulovaste.

Aikuisilta on havaittu kuuloärsykkeeseen vasteita, jotka voidaan jakaa kolmeen pääryhmään: aivorunkolatenssiaallot (2—10 ms ärsykkeen alusta), keskilatenssiaallot (noin 10—50 ms) sekä pitkälatenssiset aallot (Näätänen, 1989; Näätänen, 1992). Ensimmäinen pitkälatenssisista aalloista on P1-aalto, joka ilmenee noin 50 ms ärsykkeestä, ja sitä seuraa N1, jolla on useita eri alakomponentteja, ja niiden latenssi vaihtelee 75—150 ms:n välillä (esim. Luck, 2005; Näätänen, 1989; Näätänen, 1992). Näiden jälkeen kuulovasteessa on seuraavana tavallisesti P2-aalto noin 200 ms ärsykkeestä, ja sitä seuraa N2-aalto, jolla myös on monia erillisiä alakomponentteja ja jonka suuruuteen vaikuttaa, onko esitetty ääni toistuva vai poikkeava ja onko koetilanteessa tutkittavaa pyydetty kiinnittämään ääneen huomiota vai ei. Noin 300 ms ärsykkeestä voi ilmentyä P3-aalto, erityisesti silloin, kun tutkittava kiinnittää huomiota esitettyyn ääneen (Luck, 2005).

Edellä mainittujen kuulovasteiden lisäksi on löydetty nk. poikkeavuusnegatiivisuusaalto eli MMN (mismatch negativity), joka syntyy, kun toistuvien samanlaisten kuuloärsykkeiden joukossa esiintyy edeltävistä ärsykkeistä poikkeava ärsyke (Luck, 2005; Näätänen, 1989; Näätänen, 1992; Näätänen & Alho, 1997; Sams, Paavilainen, Alho, & Näätänen, 1985). MMN on tarkkaavaisuudesta riippumaton ja se syntyy silloin, kun esitetty kuuloärsyke poikkeaa edeltävistä esimerkiksi voimakkuudeltaan, taajuudeltaan, kestoltaan, tulosunnaltaan tai foneettiselta rakenteeltaan (esim. Näätänen, 1992; Näätänen & Alho, 1997). Aikuisilla MMN:n latenssi on yleensä 160—220 ms ärsykkeen alusta (esim. Luck, 2005). MMN kertoo aivojen esitietoisesta aistitiedon prosessoinnista ja paljas-

taa, onko kaksi erilaista ärsykettä erotettu kuuloaivokuorella toisistaan – tämä erottelu on pohjana äänien tietoiselle erottamiselle (esim. Näätänen & Alho, 1997). MMN:n mittaaminen sopii myös lasten kuulotiedon käsittelyn tutkimiseen, sillä vaikka koe on pitkäkö, lasten ei tarvitse reagoida esitettyihin ääniin millään tavalla, ja näin ollen koe ei vaadi lapsilta erityistä tehtävään motivoitumista tai tarkkaavuuden ylläpitoa eikä myöskään luku- tai muuta taitoa (Shafer, Morr, Kreuzer, & Kurtzberg, 2000).

Lasten kuulovasteet

Lasten kuulovasteita ja niiden kehityksellisiä muutoksia tutkittaessa on havaittu, että aikuisille tyypillinen kuulovasterakenne (P1—N1—P2—N2) alkaa kehittyä lapsille vasta noin 12-vuotiaana (Ponton, Eggermont, Kwong, & Don, 2000). Yleisesti ottaen lasten kuulovasteissa on runsaampaa yksilöllistä vaihtelua kuin nuorilla ja aikuisilla (Albrecht, Suchodoletz, & Uwer, 2000; Ponton ym., 2000). Vaihtelu jopa lisääntyy 5-vuotiaasta 8-vuotiaaksi (Ponton ym., 2000). Lasten kuulovasteiden rakenne muodostuu tyypillisesti P1- ja N2-aalloista, joista positiivinen on latenssiltaan noin 100 ms ja negatiivinen noin 250 ms ärsykkeen alusta (Čeponiene, Rinne, & Näätänen, 2002; Albrecht ym., 2000). Lasten kuulovasteita tarkasteltaessa on havaittu, että N1-aalto syntyy noin 3—4 vuoden iässä, mutta alkaa tulla kunnolla näkyviin vasta 9-vuotiaana – sitä ennen se on nähtävissä vain niissä koeasetelmissa, joissa käytetään pitkää, vähintään sekunnin mittaista ärsykeväliä (Albrecht ym., 2000; Čeponiene, Cheour, & Näätänen, 1998; Čeponiene ym., 2002).

Kehityksellisinä muutoksina lasten kuulovasteissa tapahtuu P1- ja N2-aaltojen latenssien lyhenemistä ja amplitudien pienenemistä (Albrecht ym., 2000), ja erityisesti P1-aallolle käy näin (Ponton ym., 2000; Ponton ym., 2002). Toisaalta on myös havaintoja siitä, että sekä P1-aallon että N2-aallon latenssit eivät lyhenekään vielä 4—9 vuoden välillä, vaan vasta 9 vuodesta eteenpäin (Čeponiene ym., 2002). Saman tutkimuksen mukaan P1-aallon amplitudi ei pienene vaan kasvaa ikävuodesta 4 ikävuoteen 9, ja samana aikana N2:n amplitudi tasaisesti pienenee. N2-aallon kehityksestä on myös sellaisia tuloksia, että sen sekä latenssi että amplitudi kasvavat (Ponton ym., 2000) tai että latenssi kasvaa, mutta amplitudi pysyy suhteellisen vakaana 11-vuotiaaksi, jonka jälkeen se alkaa vähitellen pienentyä (Ponton ym., 2002).

Kehityksellisiä muutoksia koskevien tutkimustulosten eroihin on todennäköisesti useita eri syitä. Ensinnäkin tutkimusasetelmissa on eroja: Pontonin ym. (2000 ja 2002) tutkimuksessa ärsykkeenä käytettiin 18,1 ms:n mittaista, yhtenäiseltä kuulostavaa naksahdussarjaa, jota soitettiin vasempaan korvaan, kun taas Albrechtin ym. (2000) tutkimuksessa ärsykkeenä oli taajuudeltaan 1000

tai 1200 Hz:n ja kestoltaan 175 tai 100 ms:n siniääni, joita soitettiin oikeaan korvaan. Myös Čepónien en ym. (2002) tutkimuksessa oli siniääniärsyke taajuudeltaan 500, 1000 tai 1500 Hz ja kestoltaan 100 ms, ja äänet soitettiin kaiuttimista koehenkilön molemmilta puolilta. Myös ärsykkeiden välisessä ajassa oli eroja. Lisäksi koehenkilöiden ikäjakaumat poikkesivat toisistaan osittain. Albrechtin ym. (2000) ja Pontonin ym. (2000 ja 2002) tutkimuksissa koehenkilöitä oli tasaisin ikävällein: Albrechtin ym. tutkimuksessa koehenkilöt olivat 5—16-vuotiaita, Pontonin ym. tutkimuksessa oli 5—18-vuotiaiden lisäksi aikuisia. Sen sijaan Čepónien en ym. (2002) tutkimuksessa koehenkilöt olivat kolmesta eri ikäryhmästä: 4- ja 9-vuotiaat sekä aikuiset. Myös tulosten analyysimenetelmissä oli eroja: Albrechtin ym. (2000) ja Pontonin ym. (2002) tutkimuksissa oli käytetty samaa kuulovasteiden jännitelähteiden paikannusmenetelmää, jota taas Čepónien en ym. (2002) ja Pontonin ym. (2000) tutkimuksissa ei ollut hyödynnetty. Tämä selittää Pontonin ym. tulosten (2000 ja 2002) erot, kun kyseessä on kuitenkin sama aineisto.

Myös MMN-aallon kehityksellisistä muutoksista on monensuuntaista tietoa. Useiden tutkimusten mukaan MMN-aallon latenssissa ja amplitudissa ei ole merkittävää eroa lasten ja aikuisten välillä, mutta on myös tuloksia, joiden perusteella MMN:n latenssi on pienillä lapsilla pitempi kuin aikuisilla ja amplitudi noudattaisi U:n muotoista kehityskaarta ensin pienentyen ja myöhemmin kouluiässä kasvaen (Cheour, Leppänen, & Kraus, 2000). Muitakin eroja on havaittu: esimerkiksi pään pinnalta mitatuissa jännitejakaumissa on nähtävissä eroa lasten ja aikuisten MMN:n välillä ja lapsilla on selvästi suurempaa yksilöllistä vaihtelua kuin aikuisilla (Cheour ym., 2000). MMN-aallon kehityksellisiä muutoksia koskevien tutkimustulosten eroihin voi vaikuttaa esimerkiksi se, onko ärsykkeenä käytetty vokaaleja vai siniääntä (ks. esim. Shafer ym., 2000). Siniääneen liittyvän MMN:n latenssin on havaittu pienenevän iän myötä (Morr, Shafer, Kreuzer, & Kurtzberg, 2002; Shafer ym., 2000), mutta amplitudia koskevat tulokset eivät ole yhtä selkeitä: Shaferin ym. (2000) tutkimuksessa amplitudissa ei tapahtunut muutosta 4—10-vuotiailla lapsilla, mutta silti MMN:n amplitudi oli aikuisilla selvästi pienempi kuin lapsilla. Samana aikana MMN:n latenssi väheni keskimäärin 11 ms vuodessa.

Kuulovasteiden paikantamisesta

Useissa tutkimuksissa on pyritty paikantamaan kuulovasteiden eri aaltojen lähdepaikkoja. Niitä voidaan selvittää esimerkiksi lähdeanalyysin avulla, jolloin kaikista elektrodeista mitattu tieto yhdistetään ja etsitään pään pinnalta havaitun jännitejakauman pohjalla olevia jännitelähteitä eli virtadipoleja (Luck, 2005; Scherg, Hoeschtetter, & Berg, 2010). Lähdeanalyysia tehtäessä on kuitenkin

aina muistettava, että analyysin pohjana oleva aivosähkökäyrä on ajallisesti tarkka, mutta ei ole varsinaisesti mikään paikallistamismenetelmä. Koska pään pinnalta mitatun jännitejakauman voivat periaatteessa synnyttää hyvin monet erilaiset lähdealueet, on analyysissa käytettävä hyväksi aieman tutkimuksen antamaa tietoa. Näin ollen esimerkiksi kuulovasteita paikannettaessa voidaan olettaa, että merkittävimmät lähteet sijaitsevat ohimolohkoissa kuuloaivokuorella. Lähdeanalyysin lisäksi paikannuksessa on käytetty apuna myös magnetoenkefalografia- eli MEG-kuvausta ja toiminnallista magneettikuvausta sekä varsinkin aiemmin, ennen lähdeanalyysin kehittymistä, jännitejakaumien virtatiheysanalyysia (Näätänen, 1992).

P1-aallon syntypaikaksi on määritelty Heschlin poimun lateraalinen osa eli sekundaarinen auditorinen korteksi (Liégeois-Chauvel ym., 1994). N2-aallon pääasiallinen lähde on paikannettu bilateraalisesti auditoriselle aivokuorelle, supratemporaalialueiden ympäristöön (Čeponiene ym., 2002). Toisaalta N2-aallolla on todennäköisesti useita eri syntypaikkoja (esim. Näätänen, 1992), ja yksi oletus onkin, että ainakin jokin lähde sijaitsi myös posteriorisella ohimolohkolla, auditorisella assosiaatioalueella (Novak, Ritter, Vaughan, & Wiznitzer, 1990).

Albrechtin ym. (2000) tutkimuksessa 5—6-vuotiaiden lasten P1- ja N2-aaltojen taustalle löydettiin kaksi virtadipolia molemmissa aivopuoliskoissa: yksi dipolipari oli orientaatioiltaan tangentiaalinen ja sijaitsi ylempällä temporaalipoimulla, toinen dipolipari oli orientaatioiltaan radiaalinen ja sijainniltaan ensin mainittua dipoliparia lateralisempi. Myös Pontonin ym. (2002) tutkimuksessa 5—6-vuotiaiden lasten P1-aallon taustalla havaittiin olevan ylempään temporaalipoimuun sijoittuva lähde, jonka orientaatio oli tangentiaalinen.

MMN-aallon on oletettu muodostuvan kahdesta alakomponentista, joista ensimmäisen syntypaikka on auditorisella aivokuorella, supratemporaalisella alueella, ja toinen on frontaalinen komponentti, jonka syntypaikka sijaitsee frontaalisesti lähinnä oikealla aivopuoliskolla (esim. Näätänen, 1992). Näiden lisäksi on havaintoja myös vasemman aivopuoliskon frontaalista lähdepaikasta, joka sijainti olisi anteriorisempi kuin oikealla aivopuoliskolla (esim. Näätänen, 1992). Näätänen (1992) viittaa myös Schergin, Vajnsarin ja Pictonin tutkimukseen, jonka mukaan taajuudeltaan poikkeavaan ääneen syntyneen MMN-aallon on havaittu muodostuvan kahdesta peräkkäisestä mutta osittain limittyvästä komponentista, ja molempien syntypaikka sijoittuu supratemporaaliselle alueelle.

Kuulotiedon käsittelyn tutkiminen: käyttäytymistason testit ja MMN

Lasten kuulotiedon käsittelyn kehittymistä on tutkittu myös käyttäytymistason testeillä. Kuulotiedon käsittelyn perustaitoihin sisältyvät kyvyt erotella ääniä toisistaan niiden voimakkuuden, taajuu-

den ja keston perusteella (Jensen & Neff, 1993). Kyseiset kyvyt kehittyvät eri aikaan. Ensimmäisenä kehittyä kyky erottaa äänen voimakkuus, ja tämä kyky on jo 4-vuotiaalla lapsella lähellä aikuisen tasoa. Toiseksi kehittyä kyky erotella taajuutta ja kolmanneksi keston erottelukyky, joka ei vielä 7-vuotiaana ole aikuisen tasolla. Taajuuden ja keston erottelukyvyn kypsymisen keskeneräisyys näkyy 4- ja 5-vuotiailla lapsilla muun muassa tämänikäisten lasten vaikeutena pysyä mukana musiikin rytmisissä ja melodiassa (Jensen & Neff, 1993). Lisäksi näiden kolmen kyvyn erilainen kehittyminen voisi näkyä myös siinä, että Jensenin ja Neffin (1993) tutkimuksen mukaan voimakkuuden erottelukyvyyssä yksilöiden välinen vaihtelu on pientä, kun taas taajuuden ja keston erottelukyvyyssä on suurta yksilöllistä vaihtelua.

Aikuisten kuulotiedon käsittelyä on tutkittu myös yhdistämällä aivosähkökäyrästä saatua kuulovastetietoa käyttäytymistason testeistä saatuun tietoon. Näissä tutkimuksissa on havaittu, että MMN-aalto heijastaa menestymistä tietoista taajuuden erottelukykyä vaativassa tehtävässä. Novitskin, Tervaniemen, Huotilaisen ja Näätäsen (2004) tutkimuksessa havaittiin, että MMN-aallon amplitudi ja latenssi korreloivat käyttäytymistason testin oikeiden vastausten ja reaktioajan kanssa selvästi, ja suurin korrelaatio löytyi MMN:n amplitudin ja oikeiden vastausten välillä. Kun MMN:n amplitudi kasvoi ja latenssi pieneni, oikeiden vastausten määrä behavioraalisessa testissä kasvoi ja reaktioaika lyheni. Useissa muissakin tutkimuksissa on havaittu, että MMN:n amplitudin ja taajuuden erottelukyvyn välillä on selvä korrelaatio, ja yhteyttä on nähty myös silloin, kun ärsykkeenä on käytetty synteettisesti tuotettuja vokaaleja (Lang ym., 1990; Lang ym., 1995; Pakarinen ym., 2007). Korrelaatio amplitudin ja käyttäytymistason testien tulosten välillä on nähtävissä kuitenkin vain kohtalaisen pienissä, alle 100 Hz:n taajuuseroissa.

Tutkimuskysymykset

Tämä tutkimus keskittyy tyypillisesti kehittyvien lasten kuulotiedon prosessointiin. Tavoitteena oli selvittää 5—6-vuotiaiden lasten kuulotiedon käsittelyä ja sen kehittymistä. Tutkimuksessa keskityttiin siihen kuulovasterakenteeseen, jonka perusäänet (siniäänet) synnyttävät, sekä lasten kykyyn erotella taajuudeltaan erilaisia siniääniä toisistaan. Elektroenkefalografia- eli EEG-mittauksin tutkittiin, millaisia kuulovasteen aaltomuotoja siniäänet synnyttävät, ja lähdeanalyysin avulla kartoitettiin aaltomuotojen syntypaikkoja. Käyttäytymistason testeillä selvitettiin tietoista siniäänien taajuuden erottelukykyä sekä synteettisesti muodostettujen *y*- ja *i*-vokaalien erottelukykyä. Tilastollisten testien avulla selvitettiin, onko kuulovasteissa eroja eri-ikäisillä lapsilla ja onko vasteiden ja käyttäytymistason testien tulosten välillä yhteyttä.

Tutkimuksessa etsittiin vastauksia neljään pääongelmaan: Ensinnäkin tutkittiin, millainen kuulovasterakenne lapsilla syntyy siniääniin, eli millaiset aaltomuodot löytyvät 5—6-vuotiailta lapsilta, millaiset ovat niiden latenssit ja amplitudit ja mihin niiden syntypaikka voidaan lähdeanalyysin perusteella sijoittaa. Toiseksi selvitettiin, muuttuvatko aaltomuotojen amplitudit tai latenssit iän myötä. Lapsilta on aiemmissa vastaavanlaisissa tutkimuksissa löydetty lähinnä P1- ja N2-aallot sekä MMN-aalto, ja niiden amplitudeissa ja latensseissa on havaittu eroja eri-ikäisillä lapsilla (Albrecht ym., 2000; Čeponiene ym., 1998; Čeponiene ym., 2002; Cheour ym., 2000; Morr ym., 2002; Ponton ym., 2000; Ponton ym., 2002; Shafer ym., 2000). Näin ollen olettamuksena oli, että P1-aallon latenssi todennäköisesti lyhenee ja amplitudi pienenee ja että myös N2-aallon latenssissa ja amplitudissa sekä MMN-aallon latenssissa voi tapahtua muutoksia. Kolmanneksi katsottiin, onko lapsen iällä yhteyttä käyttäytymistason testeissä menestymiseen. Oletuksena oli, että sekä taajuuden erottelutestissä että synteettisesti muodostettujen *y*- ja *i*-vokaalien erottelutestissä menestyminen on sitä parempaa, mitä vanhempi lapsi on, koska taajuuden erottelukyky kehittyy iän myötä alle kouluikäisillä eikä ole yleensä vielä 6-vuotiaallakaan aikuisen tasolla (Jensen & Neff, 1993). Neljänneksi etsittiin vastausta kysymykseen, onko poikkeavaan ääneen syntyvän vasteen aaltomuodolla ja tietoisella äänen taajuuden ja *y*- ja *i*-vokaalien erottelukyvillä yhteyttä toisiinsa. Aiempien, aikuisia koskevien tutkimusten pohjalta (Lang ym., 1990; Lang ym., 1995; Novitski ym., 2004; Pakarinen ym., 2007) tehtiin oletus, että myös lapsen MMN-aallon ominaisuudet ja käyttäytymistason testien tulokset korreloivat keskenään. Oletettiin, että mitä suurempi on lapsen MMN-aallon amplitudi ja mitä lyhyempi on sen latenssi, sen paremmin lapsi erottaa äänen taajuuksia ja synteettisesti muodostettuja *y*- ja *i*-vokaaleja toisistaan käyttäytymistason testeissä.

TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

Tutkittavat

Tämä tutkimus on osa Jarmo Hämäläisen johtamaa Aufon-projektia, jonka tarkoituksena on seurata kuulotiedon ja puheen käsittelyn kehittymistä kolmen vuoden ajan alkaen 4—5-vuotiailta lapsilta. Aufon-projektin tarkoituksena on selvittää, miten kuulotiedon käsittely on yhteydessä puheäänten erotteluun ja puheäänten hahmottamiseen. Kolmevuotinen tutkimusprojekti aloitettiin vuonna 2009 ja se toteutetaan Jyväskylän yliopiston Psykologian laitoksella ja Oppimisen ja motivaation huippu-tutkimusyksikössä. Tutkimuksessa on mukana sekä lukivaikeusriskiryhmään kuuluvia että tyypillisesti kehittyviä lapsia.

Tutkittavina oli 25 tyypillisesti kehittyntä lasta, iältään 5—6-vuotiaita; 5-vuotiaita oli yhdeksän, 6-vuotiaita 16. Tyttöjä oli 13 ja poikia 12. Tutkimukseen osallistuneet lapset oli rekrytoitu Jyväskylästä ja sen lähialueilta Väestörekisterikeskukselta saatujen tietojen pohjalta. Lasten yleinen kognitiivinen kyvykkyys testattiin Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence -testin suomenkielisellä versiolla, ja tutkimukseen otettiin mukaan vain ne lapset, joiden kognitiivinen kyvykkyys oli normaalitasoinen (yli 84 standardipistettä). Lasten kuulo testattiin audiometrilla, ja kaikki tutkittavat ovat kuuloltaan normaaleja, eli heidän kuulokynnyksensä oli taajuudeltaan 500—2000 Hz:n äänissä molemmissa korvissa alle 25 dB.

Koeasetelma: EEG-mittaus

EEG-mittauksissa käytettiin ns. oddball-asetelmaa, jossa samanlaisten ärsykkeiden joukossa esiintyy välillä erilaisia ärsykeitä. Vakioärsykkeenä oli siniääni, joka oli taajuudeltaan 500 Hz, kestoltaan 200 ms ja voimakkuudeltaan 70 dB. Poikkeavia ääniä oli kolmenlaisia: matalampi ääni oli taajuudeltaan 425 Hz, lyhyempi ääni oli kestoltaan 160 ms ja hiljaisempi ääni oli voimakkuudeltaan 60 dB. Kaikkien äänten nousu- ja laskuajat olivat 10 ms. Poikkeavat äänet esiintyivät pseudosatunnaisesti viiden prosentin todennäköisyydellä. Aikaväli äänen lopusta toisen alkuun oli 400 ms, ja sen pituus vaihteli satunnaisesti ± 50 ms. Tässä tutkimuksessa tarkastelun kohteena olivat vain standardiääneen ja poikkeavista äänistä taajuudeltaan matalampaan ääneen liittyvät mittaukset.

Yksi EEG-mittaukselta valmisteluineen kesti kaikkiaan noin tunnin, josta tähän tutkimukseen käytetyn mittauksen osuus oli noin 15—20 minuuttia. Tutkittavat katselivat valitsemaansa ää-

netöntä lasten elokuvaa, ja ärsykkeet soitettiin heille kuulokkeiden kautta, molemmista kuulokkeista 70 dB(A):n (± 2 dB) voimakkuudella. Tutkittavia kehoitettiin olemaan välittämättä äänistä ja keskittymään rauhassa elokuvan katseluun.

Koeasetelma: käyttäytymistason testit

EEG-mittauksen jälkeen tutkittavat saivat välipalaa, ennen kuin he tekivät käyttäytymistason testejä. Testejä oli useita, mutta tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vain kahden testin eli taajuuserottelutestin sekä synteettisesti tuotettujen *y*- ja *i*-vokaalien erottelutestin tuloksia. Testit tehtiin Dino-nimisellä tietokoneohjelmalla (ks. Richardson, Thomson, Scott, & Goswami, 2004). Ohjelma valitsee adaptiivisesti ärsykearvoja, jotka mahdollistavat erottelukynnyksen mittaamisen. Taajuuserottelutestissä tulokseksi saatiin hertsiarvo, vokaalien erottelutestistä tuloksena oli *y*- ja *i*-vokaalien taajuuksien euklidinen etäisyys.

Dino-ohjelmassa tietokoneen näytölle tuli näkyviin kolme erilaista dinosaurusta, ja lapsi kuuli kuulokkeista kolme ääntä, joista keskimäinen oli aina vakio ja joko ensimmäinen tai viimeinen poikkesi vakiosta. Tutkittavaa lasta ohjeistettiin valitsemaan, kumpi ääni, ensimmäinen vai kolmas, kuulosti erilaiselta: taajuuserottelutestissä kuului yksi korkeampi ääni, vokaalien erottelutestissä *y*-vokaalien joukossa poikkeavana oli *i*-vokaali. Kolmen äänen sarjoja oli molemmissa testeissä yhteensä 40. Äänet esitettiin 70 dB:n voimakkuudella ja ääniärsykkeiden välinen aika (ISI) oli 500 ms. Taajuuserottelutestissä äänten taajuus vaihteli 250—280 Hz:n välillä, kesto oli 200 ms ja nousu- ja laskuajat olivat 15 ms. Synteettisesti Praat-ohjelmalla tehtyjen *y*- ja *i*-vokaalien erottelutestissä äänen kesto oli 280 ms, nousuaika oli 5 ms ja laskuaika 15 ms. Vokaaliäänten eri formantteja oli yhteensä 11, joista F0 ja F4 olivat vakioita (274 Hz ja 3500 Hz), formantti F1 vaihteli 1886—2400 Hz:n ja F2 2400—3000 Hz:n välillä. Formanttien F5—F10 taajuudet olivat vakioita tasaisesti 1000 Hz:n välein välillä 4500—9500 Hz.

EEG:n tallennus ja käsittely

Aivosähkökäyrä- eli EEG-data mitattiin Electrical Geodesics Inc (EGI) EEG-laitteistolla käyttäen 128-kanavaista sensoriverkkoa ja Ag/AgCl-elektrodeja. Tallennushetkellä EEG-data suodatettiin välillä 0,1—200 Hz. Näytteenottotaajuus oli 1000 Hz. Elektrodiin impedanssi pyrittiin pitämään alle 50 k Ω . Tallennuksen aikana EEG-dataa tarkkailtiin ja elektrodien kontaktia parannettiin tarvittaessa. Elektrodit referoitiin tallennusvaiheessa pään keskikohdan (Cz) elektrodiin.

EEG-aineiston käsittelyssä käytettiin BESA5.3 –ohjelmaa (Brain Electric Source Analysis). Ennen keskiarvoistusta data suodatettiin katselua varten digitaalisesti 1 Hz:n ylipäästösuodattimella, joka käytti 12 dB:n oktaavijyrkkyyttä edestakaisella (zero-phase) suodatuksella. Sähköhäiriöiden vaimentamiseksi notch-suodatin asetettiin 50,0 Hz:iin 2,0 Hz:n laajuudella.

Keskiarvoistuksessa aikaikkunaksi valittiin 100 ms ennen ja 500 ms jälkeen ärsykkeen. Ylipäästösuodattimen arvot pysyivät samoina (1 Hz/12 dB, edestakainen suodatus), alipäästösuodattimen arvoiksi asetettiin 40 Hz 24 dB:n oktaavijyrkkyydellä edestakaisella (zero-phase) suodatuksella häiriösegmenttien etsimisen ajaksi. Häiriöiden hylkäyskriteereinä olivat analyysiikkunan maksimi- ja minimiarvorajana 120 μV , nopeiden muutosten arvorajana 75 μV ja heikon signaalin rajana 0,01 μV . Heikon ihokontaktin tai muun syyn vuoksi häiriöiset EEG-kanavat poistettiin analyysistä ennen keskiarvoistusta. Keskiarvoistetut jännitevasteet referoitiin uudelleen keskiarvoreferenssiin ja suodatettiin 40 Hz:n edestakaisella suodatuksella. Hyväksytyjen jaksosten (trial) määrä vaihteli koehenkilöittäin vakioärsykkeessä 270—387 välillä (ka 346) ja poikkeavassa ärsykkeessä 83—119 välillä (ka 101).

Aineiston analysointi

Kunkin koehenkilön EEG-datan keskiarvoistuksen jälkeen standardiääneen ja taajuuspoikkeamaääneen liittyvät EEG-aineistot keskiarvoistettiin yli kaikkien koehenkilöiden ja niistä tehtiin lähdeanalyysi BESA 5.3 –ohjelmalla käyttäen nelinkertaisen ellipsimuodon (4-shell ellipsoidal) asetusta. Lähdeanalyysissä asetettiin kaksi dipolia kerrallaan molempiin aivopuoliskoihin, ja ohjelman annettiin pääkomponenttianalyysin pohjalta etsiä virtadipoleita eri aikaikkunoista. Aikaikkunoina olivat standardiäänen datassa 64—111 ja 175—210 ms ja poikkeavan äänen datassa 220—240 ms. Aikaikkunat valittiin keskiarvoistettujen kuulovastekäyrien perusteella vasteen alku- ja huippukohtien ajalta. Lähdemallien kelpoisuuden ehdoiksi asetettiin alle 5 prosentin jäännösvarianssi, vertailukelpoisuus aiempien tutkimustulosten kanssa sekä mallin tuottaman ja datasta mitatun pään pinnan jännitejakauman samankaltaisuus.

Saatuja dipolimalleja käytettiin kunkin koehenkilön datan analysoinnissa haettaessa aaltomuotojen yksilöllisiä lähteen maksimivoimakkuuksia (amplitudeja) ja maksimivoimakkuuksien ajanhetkiä (latensseja) siten, että dipolien paikat kiinnitettiin vakioksi, mutta niiden orientaation annettiin asettua kullekin henkilölle yksilöllisesti. Aikaikkunat olivat aikasijainniltaan pääpiirteisään samat kuin mallia tehtäessäkin, mutta tässä vaiheessa pyrittiin käyttämään lyhyempiä, noin 20 ms:n aikaikkunoita. Poikkeavan äänen datassa neljällä lapsella jouduttiin käyttämään selvästi myö-

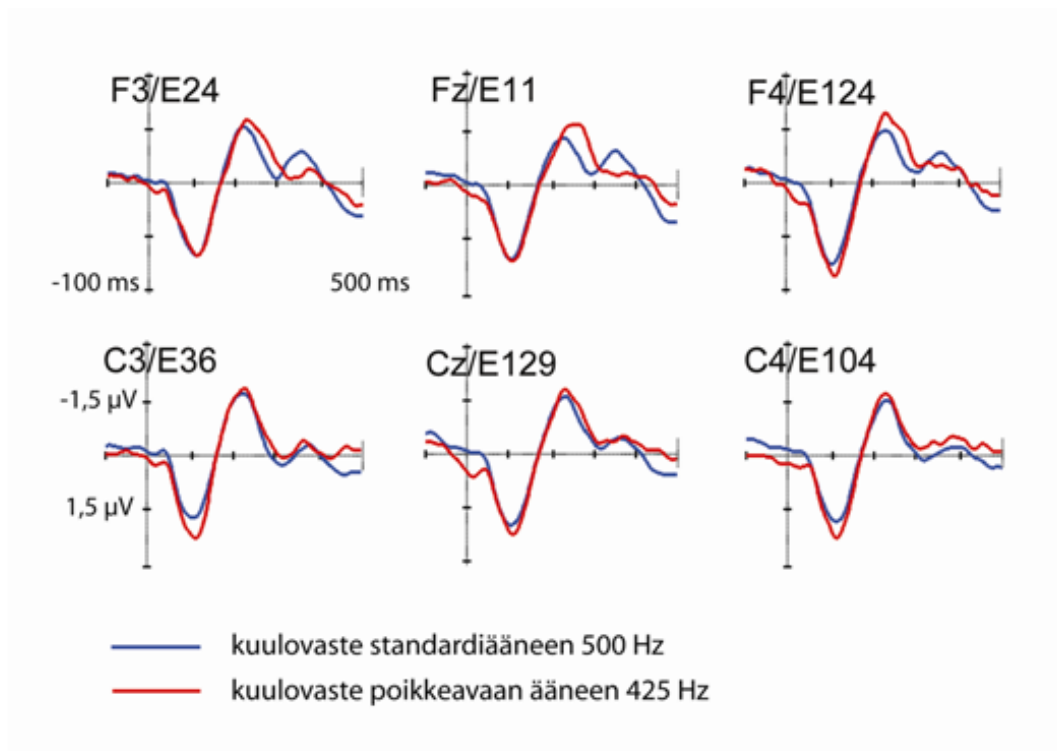
häisempää eli noin 300 ms:n kohdalle sijoittuvaa aikaikkunaa. Lähteen maksimivoimakkuudet (amplitudit) ja niiden ajanhetket (latenssit) katsottiin mallitetusta aaltomuodosta sen terävimmistä kohdista. Aikaikkuna rajattiin ± 40 ms siitä kohdasta, jossa P1- ja N2-vasteen kokonaisvoimakkuus (global field power, GFP) oli suurin. MMN-aallon amplitudin arvoa ei otettu suoraan lähteen aktivaation aaltomuodosta, vaan sen arvoksi laskettiin tuolta ajanhetkeltä vakioärsykkeen N2-aallon ja MMN-aallon amplitudien erotus. MMN-aallon latenssit ja amplitudit katsottiin myös alkuperäisestä jännitevastedatasta vain yhden, ylemmällä frontaalialueella sijaitsevasta elektrodin (E11/Fz) mitaamasta kuulovasteesta: latenssien ja amplitudien katsomista varten laskettiin erotuskäyrä, joka saatiin, kun poikkeavan äänen kuulovastekäyrästä vähennettiin standardiäänen kuulovastekäyrä.

Aineiston tilastollisessa analyysissä käytettiin yksisuuntaista varianssianalyysia (ANOVA) tutkittaessa iän ja kuulovasteiden piirteiden välistä yhteyttä, ja faktorina oli ikä vuosina (5- ja 6-vuotiaat). Myös Pearsonin korrelaatiokerrointa käytettiin tutkittaessa iän ja kuulovasteiden piirteiden välistä yhteyttä, ja tällöin ikämuuttujana käytettiin ikää kuukausina. Riippuvien otosten t-testi oli menetelmänä, kun selvitettiin kuulovasteiden latenssien ja amplitudien eroja aivopuoliskojen välillä. Niissä tilanteissa, joissa otokset eivät olleet normaalisti jakautuneet, käytettiin Kruskalin-Wallisin yksisuuntaista varianssianalyysia. Regressioanalyysia käytettiin käyttäytymistason testien ja iän välisen yhteyden selvittämiseen. Käyttäytymistason testien tulosten ja MMN-aallon latenssin ja amplitudin välistä yhteyttä tarkasteltiin Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla. Merkitsevyystaso analyyseissa oli 0,05.

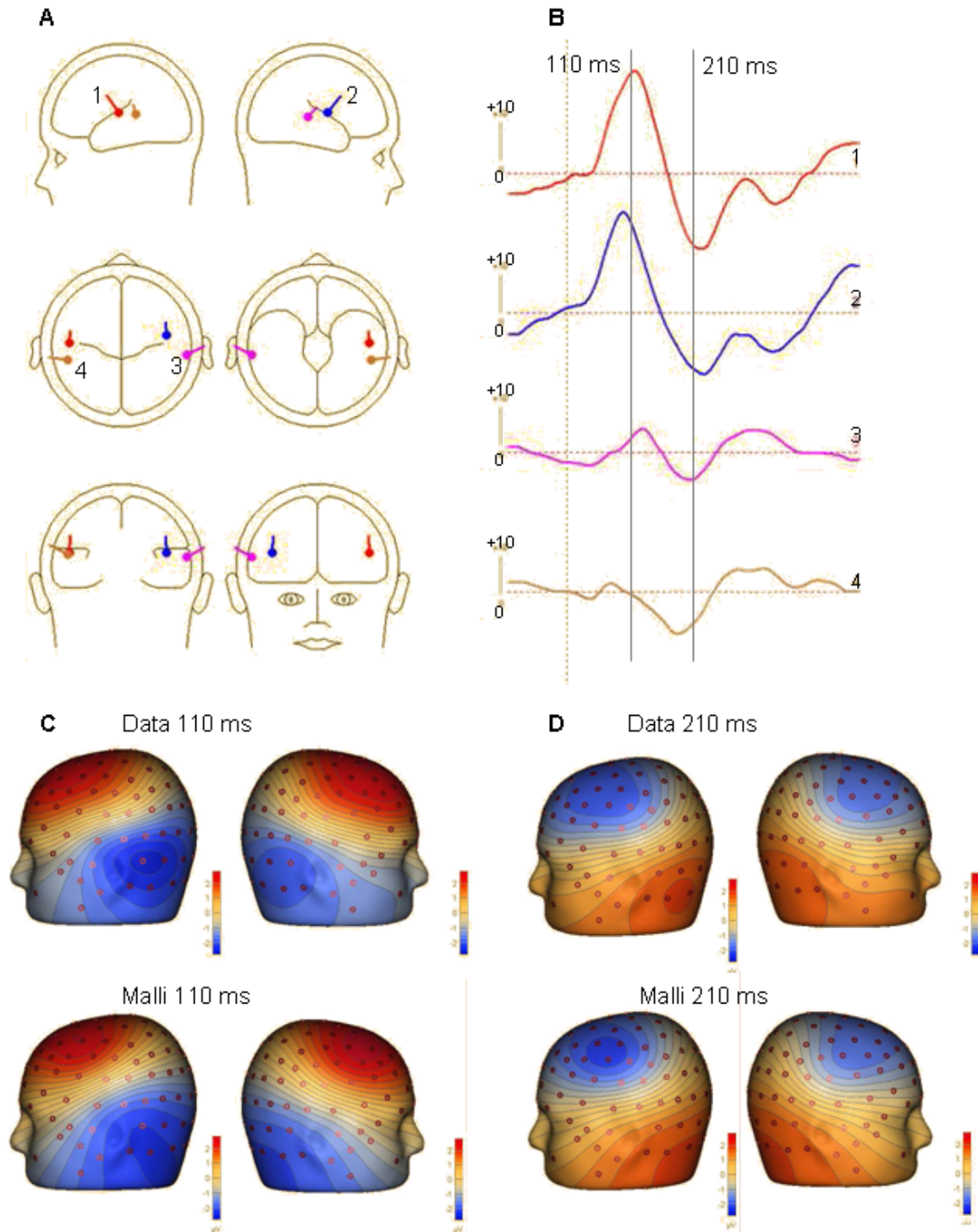
TULOKSET

Tässä tutkimuksessa keskityttiin tyypillisesti kehittyvien lasten kuulotiedon prosessointiin. Tavoitteena oli selvittää, millainen on 5—6-vuotiaiden lasten kuulovasterakenne siniääniin, onko siinä nähtävissä kehityksellistä muutosta ja onko kuulovasteen eri aaltojen ominaisuuksilla ja tietoisella äänten erottelukyvylä yhteyttä toisiinsa.

Kaikkien koehenkilöiden yli keskiarvoistetussa kuulovasteessa standardiärsykkeeseen oli nähtävissä kaksi selkeää aaltoa: ensimmäinen noin 100—115 ms:n kohdalla (P1) ja toinen noin 200—225 ms:n kohdalla (N2) (ks. kuva 1). Poikkeavaan ärsykkeeseen syntyneen kuulovasteen keskiarvokäyrässä oli havaittavissa ensimmäisen aaltomuodon (P1) lisäksi toinen huomattava aalto (MMN), joka oli frontaali- ja päälaen alueilla mitattuna negatiivinen ja jonka huippu osui hieman myöhemmäksi kuin N2:lla (noin 230—250 ms).



KUVA 1. Kaikkien koehenkilöiden yli keskiarvoistettu kuulovaste standardi- ja poikkeavaan ääneen kuudesta eri elektrodista mitattuna. (Negatiivisuus ylöspäin.)



KUVA 2. Standardiärsyksen kuulovasteen lähdemallinnus. (A) Tangentiaalisesti suuntautuneet dipolit 1 (vasen) ja 2 (oikea), radiaalisesti suuntautuneet dipolit 3 (oikea) ja 4 (vasen). (B) Kaikkien koehenkilöiden yli keskiarvoistettu lähdeaktivaatio standardiääneen: ylimpänä tangentiaalisista dipoleista peräisin olevien lähdeaktivaatioiden aikakäyttäytyminen (1 ja 2), alimpana radiaalisista dipoleista peräisin olevien lähdeaktivaatioiden aikakäyttäytyminen (3 ja 4). (C) Pään pinnalta mitattu jännitekenttä 110 ms ärsykkeestä (P1) keskiarvoistetun datan perusteella (ylemmät kuvat), alakuvissa mallin tuottama jännitekenttä. (D) Pään pinnalta mitattu jännitekenttä 210 ms ärsykkeestä (N2) keskiarvoistetun datan perusteella (ylemmät kuvat), alakuvissa mallin tuottama jännitekenttä.

Kuulovasteiden lähdeanalyysin tuloksena P1- ja N2-aaltojen syntyapaikkaa kuvasi kaksi tangentiaalisesti suuntautunutta dipolia, jotka sijoittuivat molempiin aivopuoliskoihin ylemmän temporaalipoimun sisäosiin, primaarille kuuloaivokuorelle (ks. kuva 2). N2-aallon taustalle voitiin löytää myös kaksi radiaalisesti suuntautunutta dipolia, jotka myös sijaitsivat molemmissa aivopuoliskoissa temporaalialueen yläosassa, mutta sijainti oli lateraalisempi kuin tangentiaalisilla dipoleilla, erityisesti oikeassa aivopuoliskossa.

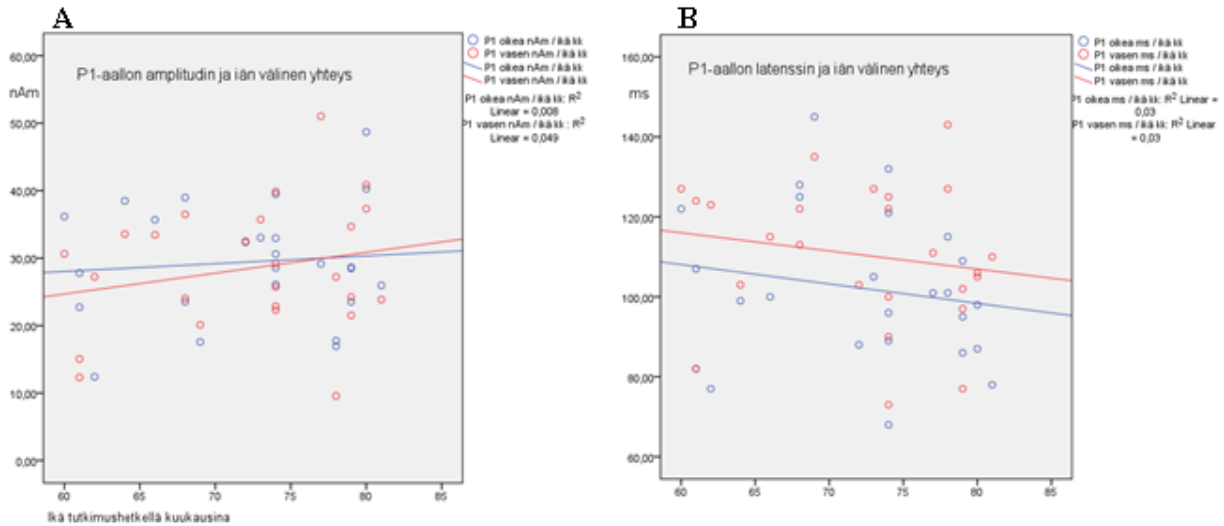
P1

P1-aalto oli löydettävissä jokaiselta lapselta, ja sen keskimääräinen latenssi kaikkien tutkittavien keskiarvona oli 106 ms: oikealla puolella latenssi oli 102 ms ja vasemmalla 110 ms. P1:n keskimääräinen amplitudi oli oikealla puolella 29,4 nAm ja vasemmalla 28,4 nAm. Erot eri aivopuoliskojen välillä sekä latenssissa että amplitudissa eivät olleet riippuvien otosten t-testissä tilastollisesti merkitseviä.

Taulukon 1 perusteella voisi vaikuttaa siltä, että iän myötä P1:n latenssi lyhenee, mutta 5- ja 6-vuotiaiden välillä ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevää eroa latenssissa eikä myöskään amplitudissa. Varianssianalyysissa (ANOVA) kaikki p-arvot ylittivät arvon 0,05 selvästi. Myöskään ikä kuukausina ei Pearsonin korrelaatiokertoimen perusteella näy vaikuttavan P1-komponentin latenssiin tai amplitudeihin. Iän ja P1-komponentin latenssin ja amplitudin välillä ei siis ole tässä aineistossa tilastollisesti merkitsevää yhteyttä (ks. myös kuva 3).

TAULUKKO 1. P1-aallon latenssien ja amplitudien keskiarvot eri ikäryhmissä (suluissa keskihajonta).

P1 ikä vuosia	oikea		vasen					
	ms	(sd)	nAm	(sd)	ms	(sd)	nAm	(sd)
5 (n = 9)	109	(22)	28,1	(9,7)	116	(16)	25,9	(8,6)
6 (n = 16)	98	(16)	30,2	(8,0)	107	(19)	29,9	(9,9)



KUVA 3. Iän ja P1:n amplitudien ja latenssien välinen yhteys. Oikean aivopuoliskon lähdeaktivaation lukemat merkitty sinisellä, vasemman punaisella. (A) Tangentiaalisista dipoleista peräisin olevan P1-aallon amplitudin (nAm) ja iän (kk) välinen yhteys. (B) Tangentiaalisista dipoleista peräisin olevan P1-aallon latenssin (ms) ja iän (kk) välinen yhteys.

N2

Lähdeanalyysin perusteella lasten N2-aalto syntyi siis yhteensä neljästä virtadipolista, joista kaksi oli orientaatioltaan tangentiaalisia ja kaksi radiaalisia. Kahden lapsen kuulovasteessa ei ollut näkyvissä ollenkaan N2-aaltoa. Lisäksi kahdella lapsella ei ollut havaittavissa radiaalisesta dipolista peräisin olevaa N2-komponenttia. Yhteensä siis neljältä lapselta jäi N2-aallosta mittaustulos joko osittain tai kokonaan saamatta. Tangentiaalisesta dipolista peräisin olevan N2-komponentin amplitudi oli koko aineistossa keskiarvoltaan oikealla ja vasemmalla puolella melkein sama (-21,5 ja -20,3 nAm), eikä ero ollut riippuvien otosten t-testissä merkitsevä. Sen sijaan radiaalisesta dipolista lähtevän N2-komponentin amplitudissa oli eroa eri aivopuoliskoissa: oikealla amplitudi oli keskiarvoltaan -13,8 nAm, vasemmalla -18,2 nAm ($t(20) = 3.009, p = .007$). Tangentiaalisien dipolien N2-komponentin latenssin keskiarvo oli koko aineistossa 220 ms: oikealla latenssi oli 225 ms ja vasemmalla 215 ms, ja ero aivopuoliskojen välillä oli myös tilastollisesti merkitsevä ($t(22) = 2.180, p = .040$). Radiaalisen dipolin synnyttämän N2-komponentin latenssi oli keskiarvoltaan 202 ms. Se oli molemmilla puoliskoilla suunnilleen sama eikä ero ollut myöskään tilastollisesti merkitsevä: oikealla latenssi oli 204 ms ja vasemmalla 200 ms.

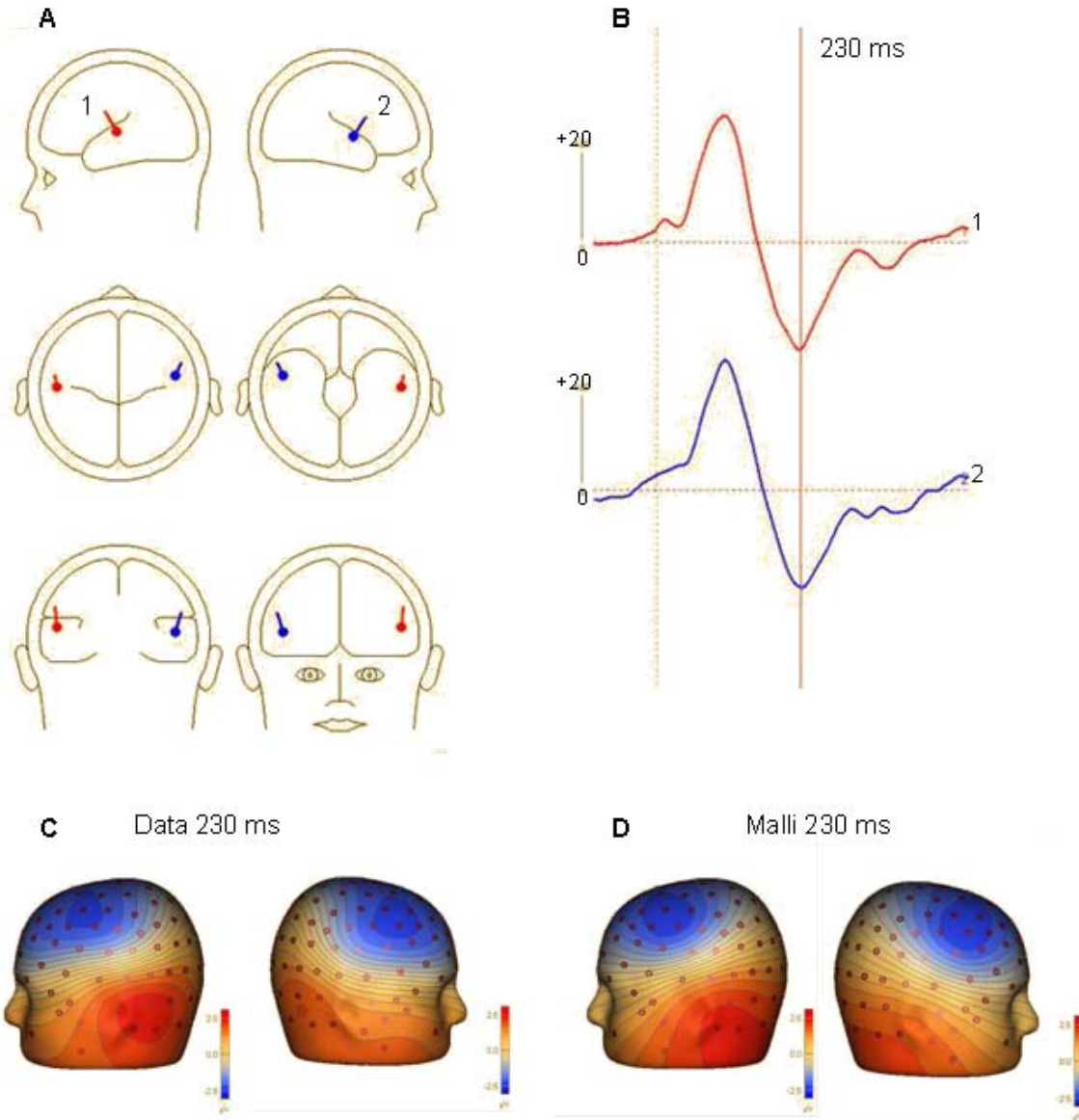
N2-aallon ja iän välillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä. Tämä tulos tuli sekä yksisuuntaisella varianssianalyysillä katsottuna, jolloin faktorina oli ikä vuosina ja ryhminä 5- ja 6-vuotiaat, että Pearsonin korrelaatiokertoimia tarkasteltaessa, kun N2-aallon latensseja ja amplitudeja verrattiin ikään kuukausina. Poikkeus näistä tuloksista kuitenkin oli, että radiaalisen N2-komponentin vasemmanpuoleisen latenssin ja iän välillä oli nähtävissä yhteys yksisuuntaisella varianssianalyysillä siten, että latenssi kasvaa iän myötä ($F(1, 19) = 4.508, p = .047$). Kun ikämuuttujana käytettiin ikää kuukausina ja yhteyttä tarkasteltiin Pearsonin korrelaatiokertoimella, ei tilastollisesti merkitsevää yhteyttä kuitenkaan löytynyt.

TAULUKKO 2. N2-aallon latenssien ja amplitudien keskiarvot eri ikäryhmissä (suluissa keskihajonta).

N2	oikea		vasen	
	tangentiaalinen			
ikä vuosina	ms (sd)	nAm (sd)	ms (sd)	nAm (sd)
5 (n = 8)	225 (11)	-23,8 (14,2)	220 (21)	-21,0 (14,8)
6 (n = 15)	225 (25)	-20,3 (9,0)	213 (21)	-19,8 (10,4)
radiaalinen				
5 (n = 7)	201 (20)	-13,0 (3,6)	185 (30)	-17,4 (5,1)
6 (n = 14)	206 (19)	-14,2 (6,1)	209 (21)	-18,6 (9,1)

MMN

Poikkeavaan ärsykkeeseen syntyneen kuulovasteen keskiarvokäyrässä oli havaittavissa runsaan 100 ms:n kohdalla esiintyneen ensimmäisen aaltomuodon lisäksi huomattava aalto (MMN), jonka huippu osui hieman myöhemmäksi kuin N2:lla, noin 230—250 ms:iin. Lähdeanalyysin perusteella MMN-aallon syntypaikkaa kuvasi kaksi tangentiaalisesti suuntautunutta dipolia, jotka sijoittuivat molempiin aivopuoliskoihin ylemmän temporaalipoimun sisäosiin, primaarille kuuloaivokuorelle, eli likipitään samalle alueelle kuin P1- ja N2-aaltojen tangentiaaliset dipolit (ks. kuva 4).



KUVA 4. Poikkeavan äänen kuulovasteen lähdemallinnus. (A) Dipolien sijainnit vasemmassa (1) ja oikeassa (2) aivopuoliskossa. (B) Kaikkien koehenkilöiden yli keskiarvoistettu lähdeaktivaatio poikkeavaan ääneen: ylimpänä vasemman lähteen (1) voimakkuuden aikakäyttäytyminen, alempana oikean lähteen (2) voimakkuuden aikakäyttäytyminen. (C) Pään pinnalta mitattu jännitekenttä keskiarvoistetun datan perusteella 230 ms poikkeavan ärsykkeen alusta. (D) Mallin antama jännitekenttäarvio samalta ajanhetkeltä.

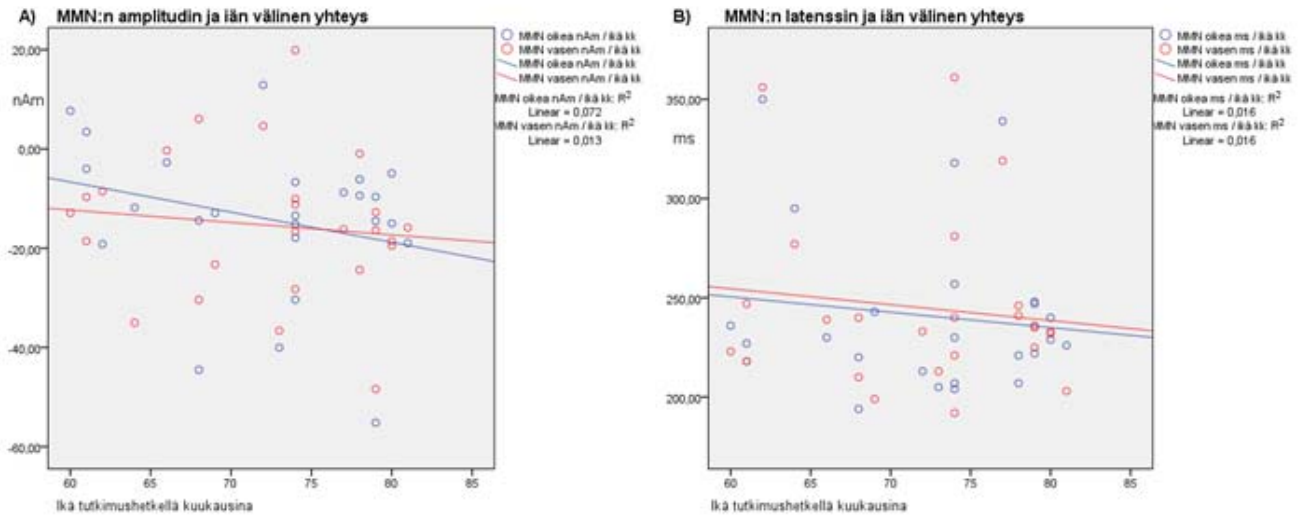
Lähdeanalyysin pohjalta katsottuna neljällä lapsella MMN:n latenssi oli hyvin myöhäinen, noin 300 ms ja ylikin, ja yhdellä lapsella oli oikealla puolella hyvin suuri negatiivinen arvo amplitudissa (yli -50 nAm). Tästä seurasi, että MMN:n jakaumat olivat normaalisia vain vasemmanpuoleisen amplitudin osalta, joten aivopuoliskojen välisten erojen tutkimiseen käytettiin Kruskalin-

Wallisin yksisuuntaista varianssianalyysia. Tilastolliset analyysit tehtiin myös riippuvien otosten t-testillä siten, että kyseessä olevien viiden lasten mittaustulokset jätettiin analyysista pois. MMN:n keskimääräinen latenssi koko aineistossa oli 243 ms, ja latenssit olivat oikeassa ja vasemmassa aivopuoliskossa melkein samat: oikealla 241 ms ja vasemmalla 245 ms – ilman viittä koehenkilöä keskiarvot olivat oikealla 224 ms ja vasemmalla 229 ms. Amplitudin keskiarvo koko aineistossa oli oikeassa hemisfäärissä -14,07 nAm ja vasemmassa -15,36 nAm. Poikkeavat arvot pois jätettynä amplitudien keskiarvo oli oikealla -11,32 nAm ja vasemmalla -12,96 nAm. Sekä Kruskalin-Wallisn että riippuvien otosten t-testi osoitti, että erot eri aivopuoliskoissa eivät olleet tilastollisesti merkitseviä.

TAULUKKO 3. MMN-aallon latenssien ja amplitudien keskiarvot eri ikäryhmissä lähdeanalyysin pohjalta (suluissa keskihajonta).

MMN	oikea		vasen	
	ms (sd)	nAm (sd)	ms (sd)	nAm (sd)
ikä vuosia				
5 (n = 9)	246 (48)	-10,9 (15,3)	245 (47)	-14,7 (13,5)
6 (n = 16)	238 (39)	-15,8 (15,5)	244 (43)	-15,7 (15,8)

MMN-aallon latenssin ja amplitudin yhteyttä ikään kuukausina tutkittiin Pearsonin korrelaatiokertoimella, ja koska Cookin etäisyys oli kaikissa yhdistelmissä selvästi alle 2, analyysiin otettiin mukaan kaikki arvot. Lapsen iällä kuukausina ja MMN-aallon latenssilla tai amplitudilla ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä (ks. kuva 5). Tilastolliset testaukset tehtiin myös siten, että edellä mainittujen viiden lapsen mittaustulokset jätettiin pois ja tarkasteltiin MMN:n latenssin ja amplitudin yhteyttä ikään vuosina yksisuuntaisella varianssianalyysillä (ANOVA), mutta tilastollisesti merkitsevää yhteyttä ei löytynyt.



KUVA 5. MMN-aallon ja iän välinen yhteys lähdeanalyysin pohjalta tarkasteltuna. Oikean aivopuoliskon lähdeaktivaation lukemat on merkitty sinisellä, vasemman punaisella. (A) MMN:n amplitudin (nAm) ja iän (kk) välinen yhteys. (B) MMN:n latenssin (ms) ja iän (kk) välinen yhteys.

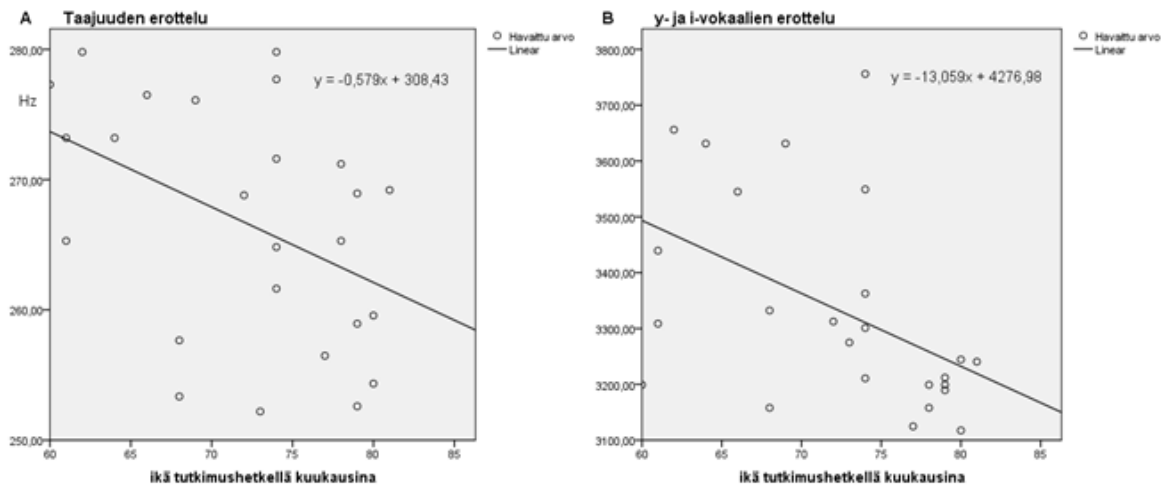
MMN-aallon latenssit ja amplitudit katsottiin myös vain yhden, ylemmällä frontaalialueella sijaitsevan elektrodin (E11/Fz) kohdalta poikkeavan äänen ja standardiäänen kuulovasteiden erotuskäyrästä (ks. kuva 1). Erotuskäyrässä oli havaittavissa paitsi negatiivinen aalto runsaan 200 ms:n kohdalla, myös positiivinen aalto ennen tätä. Negatiivisen MMN-aallon latenssien ja amplitudien arvojen lisäksi poimittiin vastaavat arvot myös positiivisesta aallosta. Koko aineiston keskiarvo negatiivisen MMN:n latenssille oli 230 ms ja amplitudille -1,85 μ V. Positiivisen MMN:n keskiarvot olivat 148 ms ja 1,59 μ V. Yksisuuntainen varianssianalyysi (ANOVA) ja Pearsonin korrelaatiokerroin osoitti, että iällä vuosina tai kuukausina ja MMN:n latensseilla ja amplitudeilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä tälläkään tavalla katsottuna. Kolmelta lapselta ei voitu havaita negatiivista MMN-aaltoa ollenkaan, ja näistä lapsista kaksi oli niitä, joilla oli lähdeanalyysin pohjalta tarkasteltuna hyvin myöhäinen (yli 300 ms) MMN. Lisäksi kuudelta lapselta puuttui aikainen positiivinen aaltomuoto. Kyseessä olivat eri lapset, joten yhteensä yhdeksältä lapselta ei saatu kaikkia taulukossa 4 esitettyjä arvoja.

TAULUKKO 4. Elektrodista E11 poimittujen MMN-aallon latenssien ja amplitudien keskiarvot eri ikäryhmissä (suluissa keskihajonta).

E11 MMN	negatiivinen			positiivinen			
	ikä vuosia	ms (sd)	μ V (sd)	n	ms (sd)	μ V (sd)	n
5		239 (62)	-1,64 (1,13)	8	147 (40)	1,51 (0,35)	7
6		225 (46)	-1,96 (1,58)	14	149 (35)	1,63 (0,97)	12

Käyttäytymistason testit

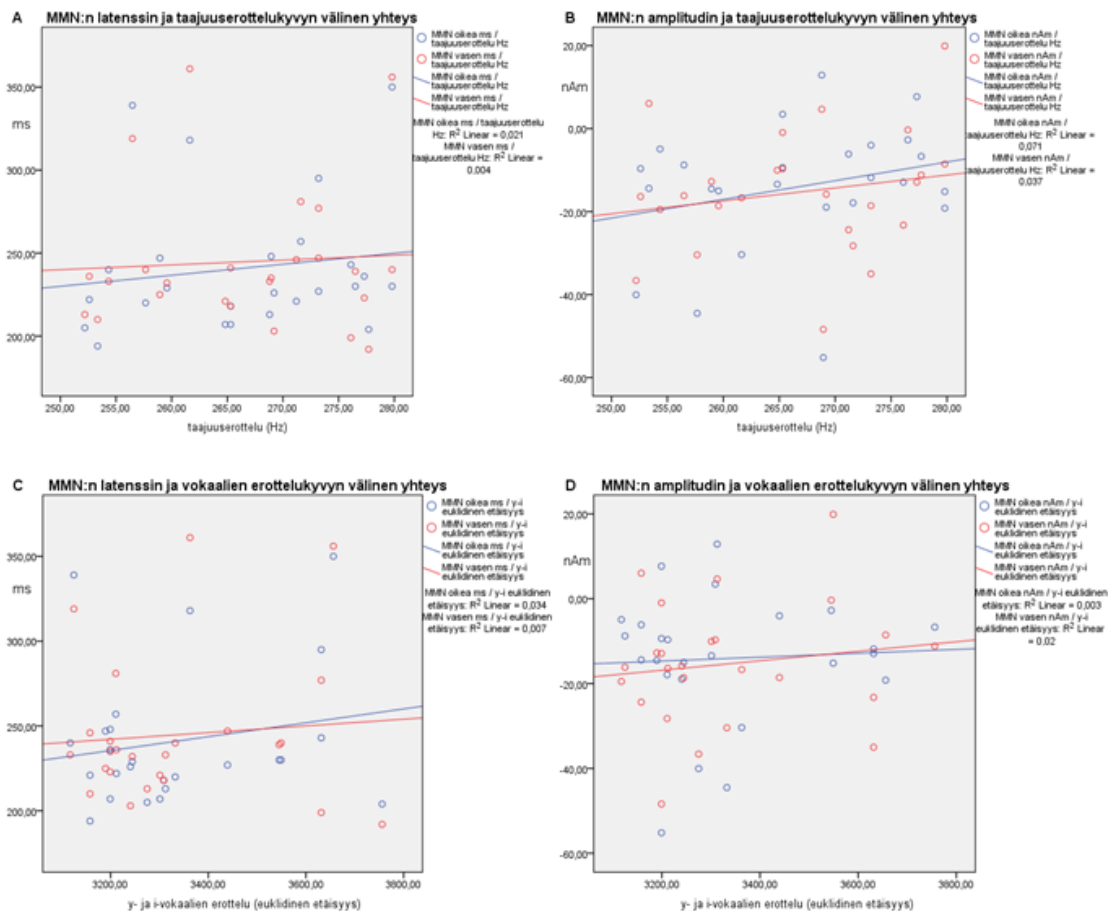
Käyttäytymistason testeissä näkyi, että lapsen ikä vaikutti testeissä menestymiseen jonkin verran: mitä vanhempi lapsi, sen tarkemmin hän erotti sekä siniäänen taajuusmuutokset että synteettisesti muodostetut *y*- ja *i*-vokaalit toisistaan (ks. kuva 6). Taajuuserottelutestissä yhteys iän ja erottelutehtävässä suoriutumisen välillä oli jonkin verran pienempi ($r = -.43$, $p = .031$) kuin *y*- ja *i*-vokaalien erottelutestissä ($r = -.47$, $p = .017$), mutta molemmissa testeissä yhteys iän ja tehtävässä suoriutumisen välillä oli kuitenkin tilastollisesti merkitsevä.



KUVA 6. Iän yhteys käyttäytymistason testien tuloksiin. (A) Taajuuserottelun ja iän välinen yhteys ($p = .031$). Y-akselilla lapsen erottama taajuusmuutos hertseinä. (B) Synteettisesti muodostettujen *y*- ja *i*-vokaalien erottelun ja iän välinen yhteys ($p = .017$). Y-akselilla lapsen erottamien *y*- ja *i*-vokaalien euklidinen etäisyys.

MMN ja tietoinen erottelukyky

Yhtenä tutkimushypoteesina oli, että käyttäytymistason testien ja MMN-aallon välillä on yhteys, eli MMN:n perusteella voisi ennustaa menestymistä käyttäytymistason testissä. Asiaa testattiin Pearsonin korrelaatiokerroimen avulla, ja mukaan otettiin kaikki lähdeanalyysin perusteella poimitut arvot, koska Cookin etäisyyden arvo oli kaikissa yhdistelmissä selvästi alle kaksi. MMN:n latenssin tai amplitudin sekä käyttäytymistason testien välillä ei löytynyt tilastollisesti merkitsevää yhteyttä (ks. kuva 7). Tilastollisen testauksen (Pearson) tulos oli samanlainen myös silloin, kun äärihavainnot jätettiin tarkastelusta pois. Myöskään E11-elektrodin pohjalta poimitujen MMN-aallon arvoilla ja käyttäytymistason testien tuloksilla ei ollut tilastollisesti merkitsevää yhteyttä.



KUVA 7. Lähdeanalyysin pohjalta tarkastellun MMN-aallon latenssin ja amplitudin yhteys käyttäytymistason testien tuloksiin. Oikean aivopuoliskon lähdeaktivaation lukemat on merkitty sinisellä, vasemman punaisella. (A) MMN:n latenssin ja taajuuserottelukyvyn välinen yhteys. X-akselilla taajuuserottelukyvyn mittayksikkönä hertsit: mitä pienempi x-akselin arvo, sen tarkempi taajuuden erottelukyky. (B) MMN:n amplitudin ja taajuuserottelukyvyn välinen yhteys. (C) MMN:n latenssin ja syntetisestisesti muodostettujen y- ja i-vokaalien erottelukyvyn välinen yhteys. X-akselilla lapsen erottamien y- ja i-vokaalien välinen euklidinen etäisyys erottelukyvyn mittana: mitä pienempi arvo, sen tarkempi erottelukyky. (D) MMN:n amplitudin ja y- ja i-vokaalien erottelukyvyn välinen yhteys.

POHDINTA

Tässä tutkimuksessa selvitettiin 5—6-vuotiaiden lasten kuulotiedon käsittelyä käyttäen ärsykkeenä siniääntä. Tavoitteena oli tutkia, millainen on tämänikäisten lasten kuulovasteen rakenne, mitkä ovat vasteen syntypaikat ja millaisia kehityksellisiä muutoksia vasteissa voidaan nähdä. Samalla tutkittiin, miten tietoinen taajuuden erottelukyky kehittyy, ja selvitettiin, voidaanko kuulovasteiden perusteella ennustaa taajuuserottelun tarkkuutta.

Lasten kuulovaste muodostui P1—N2-aaltomuodoista, joiden maksimivoimakkuudet olivat noin 100—115 ja 200—225 ms:n kohdalla, ja poikkeavaan ääneen syntyi myös poikkeavuusnegatiivisuus- eli MMN-aalto maksimivoimakkuudeltaan 220—250 ms ärsykkeestä. P1- ja N2-aallon syntypaikka voitiin määrittellä molempiin aivopuoliskoisiin ylempään temporaalipoimuun, sen sisäosiin, ja tämä virtadipolipari oli orientaatioltaan tangentialinen. N2-aallon taustalta voitiin löytää myös radiaalisesti suuntautunut dipolipari, jonka sijainti oli tangentialista hieman lateralisempi. Myös MMN-aallon synty sijoittui ylempään temporaalipoimuun, likipitään samaan kohtaan kuin P1- ja N2-aaltojen tangentialinen lähde. Aaltomuotojen maksimivoimakkuuksissa (amplitudeissa) ja niiden ajanhetkissä (latensseissa) ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa eri-ikäisten välillä. Käytetyntymistason testeissä oli nähtävissä, että sekä siniäänen taajuuden että synteettisesti muodostettujen vokaalien erottelukyky oli 6-vuotiailla keskimäärin tarkempi kuin 5-vuotiailla. Erottelukykyä ei kuitenkaan voitu ennustaa kuulovasteen perusteella, sillä MMN-aallon ja tietoisien erottelukyvyn välille ei löytynyt mitään yhteyttä.

Kuulovasteen rakenne ja lähteen paikat

Čeponienien ym. (2002) ja Albrechtin ym. (2000) tutkimuksissa on havaittu, että lasten kuulovaste-rakenne koostuu P1- ja N2-aalloista, joiden latenssit ovat noin 100 ja 250 ms ärsykeen alusta. Sama havainto tehtiin myös tässä tutkimuksessa, tosin tämän tutkimuksen perusteella P1-aallon latenssi oli hieman myöhäisempi ja N2-aallon latenssi jonkin verran aikaisempi kuin edellä mainituissa tutkimuksissa: P1-aallon latenssi oli koko aineistossa 106 ms ja N2-aallon radiaalisen komponentin latenssi oli noin 202 ms ja tangentialisen komponentin noin 220 ms. Shaferin ym. (2000) tutkimuksessa N2-aallon latenssi 5—6-vuotiailla oli 214 ms. Poikkeavaan ääneen syntyi poikkeavuusnegatiivisuus- eli MMN-aalto, joka oli tässä tutkimuksessa latenssiltaan koko aineiston keskiarvona noin 243 ms ärsykkeestä. Arvo oli hieman suurempi kuin Shaferin ym. (2000) tutkimuksessa, jossa 5—6-vuotiaiden MMN-aallon latenssi oli keskimäärin 226 ms.

P1-aalto. Selkein aaltomuoto oli P1, joka löytyi kaikilta lapsilta. Pontonin ym. (2002) tutkimuksessa P1-aalto on lapsilla vakaa jo 5-vuotiaana, ja sen sekä latenssi että amplitudi vähenevät iän myötä siten, että P1:n latenssi lyhenee 5—6-vuotiaan 80—110 millisekunnista 18—20-vuotiaan noin 30—50 millisekuntiin, ja P1-aallon amplitudi on 18—20-vuotiaalla vain 15—30 prosenttia 5—6-vuotiaiden P1:n amplitudista. Myös Albrechtin ym. (2000) tutkimuksen mukaan P1-aallon latenssi ja amplitudit pienenevät, tosin verkkaisesti. Toisaalta Čeponiene ym. (2002) tutkimuksen perusteella P1-aallon amplitudi kasvaa 4—9 vuoden välillä. Tässä tutkimuksessa P1-aallon latenssissa ja amplitudissa ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja 5- ja 6-vuotiaiden välillä. Ikäero oli kenties liian pieni, jotta olisi voitu havaita kehityksellisiä muutoksia. Tulokset ovat kuitenkin yhteisiä muiden tutkimusten kanssa siinä, että P1-aalto esiintyi selkeänä kaikilla lapsilla noin 100 ms ärsykkeestä. Samoin P1-aallon lähdepaikka oli sama kuin aiemmissa tutkimuksissa, eli ylempi temporaalipoimu (Albrecht ym., 2000; Ponton ym., 2002), tarkemmin sen sisäosa. Orientaatioiltaan tämä lähde oli tangentialinen, ja tämäkin tulos vastasi aiempia tutkimuksia (Albrecht ym., 2000; Ponton ym., 2002).

N2-aalto. Lasten toinen selkeä, säännönmukaisesti esille tuleva aaltomuoto P1:n lisäksi oli N2-aalto, jonka latenssien ja amplitudien muutoksista iän myötä on tutkimuksissa erisuuntaisia tuloksia. Čeponiene ym. (2002) mukaan N2-aallon amplitudi pienenee ja latenssi pysyy samanlaisena 4—9 vuoden välillä. Albrechtin ym. (2000) tutkimuksessa 5—6-vuotiailla esiintynyt tangentialisen lähteen negatiivisuus latenssiltaan noin 250 ms lyheni iän myötä siten, että latenssi oli 9—10-vuotiaana noin 210—220 ms. Muutamissa tutkimuksissa on kuitenkin viitteitä sekä latenssin että amplitudin negatiivisuuden kasvusta lapsilla: Pontonin ym. (2000 ja 2002) tutkimusten mukaan N2:n latenssi kasvaa iän myötä, ja myös amplitudin negatiivisuus kasvaa, mutta vain 10-vuotiaaksi asti. Myös Shaferin ym. (2000) tutkimuksessa oli havaittu N2-aallon latenssin ja amplitudin negatiivisuuden kasvua, joka ei kuitenkaan ole erityisen voimakasta. Pontonin ym. (2002) tutkimuksessa tuli esille N2-aallon latenssin nopea pidentyminen 5—6-vuotiaan noin 160—185 ms:sta 10-vuotiaan noin 200—220 ms:iin, ja tämän nopean muutoksen jälkeen N2 on 10-vuotiaana samankaltainen kuin aikuisilla. Näin nopean ja selvän N2-aallon kehityksellisen muutoksen olisi pitänyt näkyä myös tässä tutkimuksessa, mutta esille tuli vain yksi, juuri ja juuri tilastollisesti merkitsevä muutos: radiaalisen N2-komponentin vasemmanpuoleinen latenssi kasvoi iän myötä jonkin verran, nimittäin 5-vuotiaiden 185 ms:sta 6-vuotiaiden 209 ms:iin. Oikealla puolella ja tangentialisissa dipoleissa vastaavaa muutosta ei ollut havaittavissa. Tulos osoittaa, että N2-aalto on kompleksi eikä koehenkilöiden pienellä ikäerolla saada selville kunnollista kuvaa sen kehityksellisistä muutoksista. On myös otettava huomioon, että Pontonin ym. (2000 ja 2002) tutkimuksissa käytetty ärsyke poik-

kesi tämän ja muiden tutkimusten ärsykkeestä sekä laadultaan (naksahdussarja / siniääni) että erityisesti kestoltaan (18,1 ms / 100—175 ms).

N2-aallon taustalle löydettiin tässä tutkimuksessa kaksi virtadipolia molemmissa aivopuoliskoissa: ensimmäinen dipolipari oli sama kuin P1-aallolla, sijaitsi ylemmän temporaalipoimun sisäosissa ja oli orientaatioltaan tangentiaalinen. Toinen dipolipari oli orientaatioltaan radiaalinen ja oli sijainniltaan ensimmäistä lateraalisempi. Tämä sama tulos oli myös Albrechtin ym. (2000) tutkimuksessa. N2-aalto oli tämän tutkimuksen perusteella epävakampi kuin P1, koska kaikilla lapsilla ei ollut näkyvissä N2-aaltoa ollenkaan ja kahdelta puuttui radiaalisesta dipolista peräisin oleva N2-komponentti. N2-aallossa tuli esille myös aivopuoliskojen välinen ero siten, että oikeassa aivopuoliskossa vasteen voimakkuus oli radiaalisessa dipolissa pienempi ja latenssi tangentiaalisessa dipolissa myöhäisempi kuin vasemmassa aivopuoliskossa. N2-aallossa olisi siis jonkin verran nähtävissä vasemman aivopuoliskon dominoivuutta. Lisäksi N2-aallon dipolien välillä oli eroa: N2-aallon radiaalisen dipolin voimakkuus oli pienempi ja latenssi aikaisempi sekä oikealla että vasemalla puolella kuin tangentiaalisella dipolilla, ja sama tulos oli myös Albrechtin ym. (2000) tutkimuksessa. Samassa tutkimuksessa esitettiin oletus, että radiaalisen dipolin negatiivisuus edustaisikin N1-aallon 2-komponenttia.

MMN-aalto. Tässä tutkimuksessa epävakain aaltomuoto oli MMN: yksilölliset erot olivat niin suuret, että jakaumat eivät olleet normaalisia kuin vasemmanpuoleisen dipolin amplitudin osalta. Aivopuoliskojen välillä ei näkynyt eroja latenssissa ja amplitudissa, samoin eri ikäryhmien välillä ei ollut eroja, eli ikään liittyvää muutosta ei tämän tutkimuksen valossa ole näkyvissä. Tämä tulos on vastaava kuin useissa muissa tutkimuksissa, joiden perusteella lasten ja aikuisten MMN-aallon latenssissa ja amplitudissa ei ole merkittäviä eroja (esim. Cheour ym., 2000). Kuitenkin Shaferin ym. (2000) tutkimuksen mukaan lasten MMN:n latenssi pienenee 11 ms vuodessa. Kyseisessä tutkimuksessa MMN:n arvot oli otettu Fz-elektrodista, ja tutkimuksessa oli jouduttu jättämään 5—6-vuotiaiden ryhmästä pois kuusi lasta 21:stä, koska heiltä ei löytynyt MMN-aaltoa. Tässä tutkimuksessa oli samansuuntainen ilmiö: kolmelta lapselta ei löytynyt MMN-aaltoa, kun sitä tarkasteltiin E11/Fz-elektrodista, mutta samaa ongelmaa ei tullut, kun MMN-aaltoa katsottiin lähdeanalyysin avulla. Samoin pelkkien keskiarvojen perusteella elektrodista E11/Fz poimittuna latenssi pieneni: keskiarvo 5-vuotiailla oli 239 ms ja 6-vuotiailla 225 ms. Ero ei kuitenkaan ollut tilastollisesti merkitsevä, sillä keskihajonta ryhmissä oli niin suurta. Keskihajonnat ja latenssien ero ikäryhmien välillä olivat lähdeanalyysin pohjalta katsottuna pienemmät. Lähdeanalyysia tehtäessä havaittiin myös, että yksilölliset erot pään pinnalta mitatuissa jännitejakaumissa olivat suuret, joten MMN-aallon tarkastelu lähdeanalyysin avulla vaikuttaa näiden havaintojen perusteella mielekkäämmältä kuin yksittäisen elektrodin pohjalta mittaaminen.

Useiden tutkimusten perusteella MMN-aalto syntyy kahdesta eri alakomponentista (esim. Näätänen, 1992), mutta tämän tutkimuksen perusteella MMN-aallon taustalle löytyi vain yksi dipoli. Se oli orientaatioltaan tangentialinen ja sijoittui ylempään temporaalipoimuun, likipitään samaan kohtaan kuin P1- ja N2-aaltojen tangentialinen lähde. Tämä sijainti on sama kuin useiden tutkimusten perusteella havaittu MMN-aallon ensimmäisen komponentin syntypaikka (Näätänen, 1992), mutta toista, frontaalista lähdepaikkaa ei havaittu.

Käyttäytymistason testit ja yhteys MMN-aaltoon

Käyttäytymistason testien perusteella voitiin havaita, että tietoisessa taajuuden erottelukyvyyssä on nähtävissä eroa 5- ja 6-vuotiaiden välillä. Sekä taajuuden erottelutestissä että synteettisesti muodostettujen *y*- ja *i*-vokaalien erottelutestissä yhteys iän ja tehtävässä suoriutumisen välillä oli tilastollisesti merkitsevä: 6-vuotiaat olivat erottelukyvyltään 5-vuotiaita tarkempia. Tulos on yhtäpitävä Jensenin ja Neffin (1993) tutkimuksen kanssa, jonka mukaan taajuuden erottelukyky kehittyy selvästi 4 ja 6 ikävuoden välillä, ja kehitys jatkuu vielä tämän jälkeenkin, sillä erottelukyky ei yllä tuona aikana vielä aikuisen tasolle.

MMN-aallon ja tietoisesta taajuuden erottelukyvyn välille on löydetty selvä yhteys aikuisilla tehdyissä tutkimuksissa (Lang ym., 1990; Novitski ym., 2004; Pakarinen ym., 2007). Vastaavaa tulosta ei ollut nähtävissä tässä tutkimuksessa. Käyttäytymistason testeissä menestymistä ei voitu ennustaa MMN-aallon amplitudilla eikä latenssilla, ja sama tulos tuli sekä lähdeanalyysin pohjalta että elektrodista E11/Fz mitattujen arvojen pohjalta.

Tutkimustulosten eroja mietittäessä on ensiksikin otettava huomioon, että tämän tutkimuksen kohteena olivat lapset, kun Langin ym. (1990), Novitskin ym. (2004) ja Pakarisen ym. (2007) tutkittavina olivat aikuiset. MMN-aalto ei ilmeisesti ole 5–6-vuotiailla niin vakaa, että sen perusteella voitaisiin tehdä arvioita auditiivisista taidoista. Tulos tukee Morrin ym. (2002) tutkimusartikkelissa esitettyä ajatusta siitä, että MMN-aaltoa ei voida käyttää kliinisessä tutkimuksessa alle 4-vuotiailla, koska sen kehitys on tuossa iässä vielä kesken. Tämä tutkimus antaa aihetta olettaa, että MMN-aalto voi olla vielä 5–6-vuotiaanakin niin epävakaa, että sen käyttö kliinisessä työssä on kyseenalaista.

Toiseksi tässä tutkimuksessa taajuuserona oli 75 Hz, mikä saattoi olla liian suuri ero. Langin ym. (1990) tutkimuksessa nimittäin havaittiin, että selvimmät yhteydet tietoisesta taajuuden erottelukyvyn ja MMN-aallon amplitudin välillä tulivat silloin, kun kyse oli pienistä taajuuseroista: kyseisessä tutkimuksessa ero saatiin esille 53 Hz:n ja sitä pienemmissä, mutta ei enää 99 Hz:n eros-

sa. Kolmas merkittävä ero löytyy tutkittavien valikoinnista: tässä tutkimuksessa tietoisien erottelukyvyn ja MMN-aallon yhteyttä tutkittiin kaikilta lapsilta, kun taas Langin ym. (1990) lopulliseen tutkimukseen valittiin vain ne koehenkilöt, jotka toistivat tietoisien taajuuserottelutestin mahdollisimman samalla tavalla kuin ensimmäisellä kerralla – kaikkiaan noin puolet alkuperäisestä tutkimusryhmästä jätettiin tällöin pois. Myös neljäs ero koskee tutkimusasetelmaa: tässä tutkimuksessa EEG-mittauksessa käytettiin vakioäänenä 500 Hz:n siniääntä ja poikkeavana 425 Hz:n eli matalampaa ääntä, kun taas taajuuserottelun käyttäytymistason testissä taajuus vaihteli 250—280 Hz:n välillä ja poikkeavana äänenä oli korkeampi siniääni, ja synteettisesti muodostettujen vokaalien erottelutestissä äänten taajuus vaihteli 274—9500 Hz:n välillä. Sen sijaan Novitskin ym. (2004) tutkimuksessa ärsykkeet olivat täsmälleen samat sekä EEG-mittauksessa että käyttäytymistason testissä.

Toisaalta on aiheellista myös kysyä, kannattaako 5—6-vuotiailta vielä edes tarkastella MMN-aallon ja tietoisien taajuuserottelukyvyn välistä yhteyttä, koska tietoisien taajuuserottelukyvyn kehittyminen on tämän ikäisillä vielä niin keskeneräistä. Useissa tutkimuksissa on myös havaittu, että aivokuoren alueista ylempi temporaalikorteksi kehittyy viimeisimpänä ja että yleensäkin temporaalilohkoissa harmaa aine lisääntyy aina 14 vuoden ikään asti (Gogtay & Thompson, 2010). Näin ollen voidaan olettaa, että taajuuden erotteluun liittyvä MMN-aalto on epävakaata ennen siihen liittyvien aivoalueiden kypsymistä. Tietoisien taajuuden erottelukyvyn ja MMN-aallon yhteyden tutkimusta kehittyvässä hermojärjestelmässä tosin puoltaa se, että näin voidaan pyrkiä selvittämään, toimivatko aikuisilla ja lapsilla taajuuserottelutehtävissä samat neuraaliset mekanismit.

Lopuksi

Tutkimuksen tuloksia voidaan pitää yleistettävänä tietyin rajoituksin. Jännitevasteiden lähdeanalyysin perusteella saatua mallia lasten kuulovasteen P1—N2-rakenteesta ja paikantamisesta voidaan pitää luotettavana ensinnäkin siksi, että mallin tuottama ja aineistosta saatu jännitejakauma vastasivat hyvin toisiaan. Toiseksi tulokset olivat yhteneviä aikaisempien tutkimustulosten kanssa. Myös MMN-aallon aineistosta saatu ja mallin tuottama jännitejakauma olivat yhteneviä, mutta kysymyksiä herättää suuri yksilöllinen vaihtelu. Ikään liittyviä muutoksia kuulovasteen ominaisuuksissa ei tässä tutkimuksessa havaittu, mutta on otettava huomioon, että tutkittavat lapset olivat hyvin samanikäisiä. Luotettavampien tulosten saamiseksi tutkimuksessa olisi pitänyt olla mukana vähintään myös 4- ja 7-vuotiaita lapsia. On myös muistettava, että tässä tutkimuksessa ärsykkeet olivat siniääniä, joten tuloksia ei voida yksioikoisesti yleistää esimerkiksi puheäänien käsittelyyn.

Tulosta tietoisien taajuudenerottelukyvyn kehittymisestä voidaan pitää luotettavana, mutta sen sijaan tulos MMN-aallon ja tietoisien erottelukyvyn välisen yhteyden puuttumisesta herättää kysymyksiä. Tutkimusasetelmaa ei ollut alun perin rakennettu tämän yhteyden tarkastelua varten, joten ärsykkeet EEG-mittauksessa ja käyttäytymistason testeissä olivat erilaisia, ja näin ollen tulosta voidaan pitää kyseenalaisena. Toisaalta yksilöllinen vaihtelu MMN-aallossa oli hyvin suurta: latenssien ja amplitudien jakaumien epänormaalisuus ja yksilöllisten jännitejakaumatopografioiden erilaisuus herättävät kysymyksiä, mistä ilmiöstä MMN-aallossa lopulta on kyse. Aaltomuotojen yksilöllisyys antoi myös aihetta pohtia, onko järkevää mitata latensseja ja amplitudeja aaltojen terävimmistä kohdista, vaan voisiko esimerkiksi pinta-alan mittaaminen tuottaa luotettavamman tuloksen.

Tutkimuksen perusteella 5—6-vuotiaiden lasten kuulovasteessa esiintyy P1—N2-aaltomuoto, joka on jo kohtuullisen vakaa, sillä siinä ei tässä ikähaarukassa esiinny muutoksia ja yksilöllinen vaihtelu pysyttelee normaalijakauman rajoissa. Sen sijaan suuret yksilölliset erot MMN-aallossa kertonevat sen kehityksen keskeneräisyydestä 5—6 vuoden iässä. Myös muutokset tietoisessa taajuudenerottelukyvyyssä kertovat, että perusääniin liittyvän kuulotiedon käsittelyn kehitys on 5—6-vuotiailla vielä kesken. Edellä mainitut tulokset sekä tietoisien taajuudenerottelukyvyn ja MMN-aallon välisen yhteyden puuttuminen eivät puolla MMN-aallon käytön mahdollisuuksia 5—6-vuotiaiden kliinisessä arvioinnissa.

LÄHTEET

Albrecht, R., Suchodoletz, W. v., & Uwer, R. (2000). The development of auditory evoked dipole source activity from childhood to adulthood. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 2268—2276.

Baldeweg, T., Richardson, A., Watkins, S., Foale, C., & Gruzelier, J. (1999). Impaired auditory frequency discrimination in dyslexia detected with mismatch evoked potentials. *Annals of Neurology*, *45* (4), 495—503.

Čeponiene, R., Cheour, M., & Näätänen, R. (1998). Interstimulus interval and auditory event-related potentials in children: evidence for multiple generators. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, *108*, 345—354.

Čeponienė, R., Rinne, T., & Näätänen, R. (2002). Maturation of cortical sound processing as indexed by event-related potentials. *Clinical Neurophysiology*, *113*, 870—882.

Cheour, M., Leppänen, P. H. T., & Kraus, N. (2000). Mismatch negativity (MMN) as a tool for investigating auditory discrimination and sensory memory in infants and children. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 4—16.

Degerman, A., Salmi, J., Alho, K., & Rinne T. (2006). Elektroenkefalografia (EEG). Teoksessa Hämäläinen, H., Laine, M., Aaltonen, O., & Revonsuo, A. (toim.), *Mieli ja aivot: Kognitiivisen neurotieteen oppikirja* (s. 105—110). Turku: Kognitiivisen neurotieteen tutkimuskeskus, Turun yliopisto.

Gogtay, N. & Thompson, P. M. (2010). Mapping gray matter development: Implications for typical development and vulnerability to psychopathology. *Brain and Cognition*, *72*, 6—15.

Goswami, U., Thomson, J., Richardson, U., Stainthorp, R., Hughes, D., Rosen, S., & Scott, S. K. (2002). Amplitude envelope onsets and developmental dyslexia: A new hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *99* (16), 10911—10916.

Hämäläinen, J., Leppänen, P. H. T., Torppa, M., Müller, K., & Lyytinen, H. (2005). Detection of sound rise time by adults with dyslexia. *Brain and Language*, *94*, 32—42.

Jensen, J. K. & Neff, D. L. (1993). Development of basic auditory discrimination in preschool children. *Psychological Science*, *4* (2), 104—106.

Lang, A. H., Eerola, O., Korpilahti, P., Holopainen, I., Salo, S., & Aaltonen, O. (1995). Practical issues in the clinical application of mismatch negativity. *Ear & Hearing*, *16*, 118—130.

Lang, H., Nyrke, T., Ek, M., Aaltonen, O., Raimo, I., & Näätänen, R. (1990). Pitch discrimination performance and auditive event-related potentials. Teoksessa Brunia, C. H. M., Gaillard, A. W. K., & Kok, A. (toim.), *Psychophysiological brain research, Vol. 1* (s. 294—298). Tilburg: Tilburg University Press.

Liégeois-Chauvel, C., Musolino, A., Badier, J. M., Marquis, P., & Chauvel, P. (1994). Evoked potentials recorded from the auditory cortex in man: evaluation and topography of the middle latency components. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, *92*, 204—214.

Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, Massachusetts, Lontoo: The MIT press.

McArthur, G. M. & Bishop, D. V. M. (2005). Speech and non-speech processing in people with specific language impairment: A behavioural and electrophysiological study. *Brain and Language*, *94*, 260—273.

Morr, M. L., Shafer, V. L., Kreuzer, J., & Kurtzberg, D. (2002). Maturation of mismatch negativity in typically developing infants and pre-school children. *Ear & Hearing*, *23*, 118—136.

Novak, G. P., Ritter, W., Vaughan, H. G. Jr., & Wiznitzer, M., L. (1990). Differentiation of negative event-related potentials in an auditory discrimination task. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, *75*, 255—275.

Novitski, N., Tervaniemi, M., Huotilainen, M., & Näätänen, R. (2004). Frequency discrimination at different frequency levels as indexed by electrophysiological and behavioral measures. *Cognitive Brain Research*, *20*, 26—36.

Nyrke, T. (1994). Herätepotentiaalien fysiologiset ja metodiset perusteet. Teoksessa Lang, H., Häkkinen, V., Larsen, A., Partanen, J., & Tolonen, U. (toim.), *Sähköiset aivomme* (s. 359—378). Turku: Suomen Kliinisen Neurofysiologian Yhdistys.

Näätänen, R. (1989). Herätepotentiaalit ja kognitiiviset prosessit. *Psykologia*, *24*, 436—449.

Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.

Näätänen, R. & Alho, K. (1997). Mismatch negativity – the measure for central sound representation accuracy. *Audiology & Neuro-Otology*, *2*, 341—353.

Pakarinen, S., Takegata, R., Rinne, T., Huotilainen, M., & Näätänen, R. (2007). Measurement of extensive auditory discrimination profiles using the mismatch negativity (MMN) of the auditory event-related potential (ERP). *Clinical Neurophysiology*, *118*, 177—185.

Partanen, J. (1994). Aivosähkötoiminnan fysiologiaa. Teoksessa Lang, H., Häkkinen, V., Larsen, A., Partanen, J., & Tolonen, U. (toim.), *Sähköiset aivomme* (s. 23—34). Turku: Suomen Kliinisen Neurofysiologian Yhdistys.

Ponton, C. W., Eggermont, J. J., Kwong, B., & Don, M. (2000). Maturation of human central auditory system activity: evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical Neurophysiology*, *111*, 220—236.

Ponton, C. W., Eggermont, J. J., Khosla, D., Kwong, B., & Don, M. (2002). Maturation of human central auditory system activity: separating auditory evoked potentials by dipole source modeling. *Clinical Neurophysiology*, *113*, 407—420.

Richardson, U., Thomson, J. M., Scott, S. K., & Goswami, U. (2004). Auditory processing skills and phonological representation in dyslexic children. *Dyslexia*, *10*, 215—233.

Sams, M., Paavilainen, P., Alho, K., & Näätänen, R. (1985). Auditory frequency discrimination and event-related potentials. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, *62*, 437—448.

Scherg, M., Hoechstetter, K., & Berg, P. (2010). BESA Research 5.3. BESA Research Tutorial 1: Introduction to discrete source analysis. Gräfelfing: MEGIS Software GmbH. [viitattu 11.4.2011]. Saatavissa:ftp://www.besa.de/be/besa.de/demonstrations_and_tutorials/BESA%20Research%20Tutorial%201%20-%20Introduction%20to%20Source%20Analysis.pdf

Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., & Remschmidt, H. (1998). Auditory processing and dyslexia: evidence for a specific speech processing deficit. *NeuroReport*, *9*, 337—340.

Shafer, V. L., Morr, M. L., Kreuzer, J. A., & Kurtzberg, D. (2000). Maturation of mismatch negativity in school-age children. *Ear & Hearing*, *21*, 242—251.