

**AIVOJEN MUOVAUTUMINEN KIELIYMPÄRISTÖN OMINAISUUKSIEN POHJALTA  
KEHITYKSEN AIKANA – N250-VASTEEN ROOLI FONOLOGISEN TIEDON  
KÄSITTELYSSÄ**

Timja Junkkarinen  
Pro gradu -tutkielma  
Psykologian laitos  
Jyväskylän yliopisto  
Toukokuu 2023

JUNKKARINEN, TIMJA: Aivojen muovautuminen kieliympäristön ominaisuuksien pohjalta kehityksen aikana – N250-vasteen rooli fonologisen tiedon käsittelyssä

Pro gradu -tutkielma, 37 s.

Ohjaaja: Tiina Parviainen

Psykologia

Toukokuu 2023

---

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kieliympäristön roolia lasten aivojen fonologisen tiedon prosessoinnissa sekä iän vaikutusta aivojen fonologisen tiedon prosessointiin. Tämä toteutettiin tarkastelemalla natiivikielen ominaisuuksien pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden yhteyksiä N250-kuuloherätevasteeseen. Tutkimuksen aineisto kerättiin Oxfordissa osana suurempaa tutkimusprojektia vuosina 2010–2011. Aineisto koostui 32 lapsesta ja 11 aikuisesta, jotka olivat äidinkieleltään englanninkielisiä. Tutkittavat osallistuivat MEG-mittauksiin, joissa mitattiin kuuloherätevasteita kuulluille tavuille, joita edelsi joko samaan tai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Tilastolliset analyysit suoritettiin toistomittausten varianssianalyysillä.

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että N250-vasteen voimakkuus ei eronnut lapsilla tilastollisesti merkitsevästi sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Eri ikäisten lasten ei myöskään havaittu eroavan toisistaan tilastollisesti merkitsevästi fonologisten kategorioiden prosessoinnin suhteen. Aikuisilla N250-aktiivisuuden voimakkuus puolestaan oli tilastollisesti merkitsevästi lapsia alhaisempaa. N250-vaste ei kuitenkaan muuttunut aikuisilla lapsiin verrattuna tilastollisesti merkitsevästi eri tavoin sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu.

Tulokset viittaavat siihen, että N250-vaste ei ole herkkä kuvaamaan kieliympäristön ominaisuuksien vaikutusta aivojen fonologisen tiedon käsittelyyn. Voikin olla mahdollista, että N250-vaste heijastaa fonologisen tiedon käsittelyn sijaan kuulotiedon käsittelyn muita vaiheita esimerkiksi akustisten piirteiden prosessoinnin muodossa. Tutkimuksen tulokset tukevat kuitenkin aikaisemman tutkimuksen tuloksia siitä, että N250-vaste on merkittävä herätevaste nimenomaan lasten kuulotiedon käsittelyssä ja heijastaa siten mahdollisesti kuuloaivokuoren plastisuuden tasoa. N250-vasteeseen kohdistuva tutkimus voikin jatkossa tuoda lisäymmärrystä aivojen herkkyyksikaudesta esimerkiksi kielen oppimisen suhteen. Jotta kieliympäristön roolia lasten aivojen fonologisen tiedon käsittelyssä voitaisiin jatkossa ymmärtää paremmin, olisi jatkotutkimuksessa tärkeää verrata fonologisen tiedon käsittelyä englannin kielen lisäksi myös eri kielijärjestelmissä.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ  
Department of Psychology

JUNKKARINEN, TIMJA: Effects of language environment on neuroplasticity during the development – the role of N250 response in processing of phonological information

Master's thesis, 37 p.

Supervisor: Tiina Parviainen

Psychology

May 2023

---

The aim of this thesis was to examine the role of language environment in the processing of phonological information in children's brains and the effect of age on this processing. This was conducted by studying effects of phonological categories shaped by native language on the auditory event-related potential N250. The data was collected in Oxford as part of a larger research project during the years 2010-2011. The data consisted of 32 children and 11 adults who spoke English as their native language. The subjects participated in MEG recordings in which event-related potentials were measured to syllables which were preceded by a syllable that belonged either to the same or to a different phonological category. The statistical analyses were conducted using repeated measures ANOVA.

The results of the study demonstrated that the amplitude of the children's N250 response did not differ statistically significantly depending on if the syllable was preceded by a syllable that belonged to the same or to a different phonological category. Children belonging to different age groups did not differ from each other statistically significantly regarding this processing either. In turn, the amplitude of the N250 response among the adults was statistically significantly lower than among the children. The N250 response of the adults did not however change statistically significantly differently compared to the children depending on whether the syllable was preceded by a syllable that belonged to the same or to a different phonological category.

The results of the study indicate that the N250 response might not be a sensitive indicator of the effects of language environment on the processing of phonological information in the brain. It could be possible that instead of processing phonological information, the N250 response reflects other stages of auditory processing, such as processing of acoustic information. However, the results of the study support findings of previous studies that the N250 response is a significant event-related potential in the auditory processing of especially children and thus might reflect plasticity of the auditory cortex. In the future, research concerning the N250 response could increase knowledge about sensitive periods in for example language learning. In order to understand the role of language environment in the processing of phonological information in children's brains, future research should compare processing of phonological information also in other language systems in addition to English.

Keywords: phonological development, language environment, categorical perception, N250, magnetoencephalography (MEG)

# SISÄLTÖ

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Fonologinen kehitys .....	2
1.2 Kategorinen havaitseminen.....	3
1.3 Kielen äänteiden käsittely aivoissa .....	5
1.4 Kieliympäristön yhteys kuuloherätevasteisiin .....	7
1.5 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset.....	8
2. MENETELMÄT .....	10
2.1 Tutkittavat.....	10
2.2 Ärsykkeet ja tehtävä .....	11
2.3 MEG-mittaukset.....	12
2.4 MEG-datan esikäsittely ja analyysi.....	13
2.5 Tilastolliset analyysit.....	14
3. TULOKSET.....	16
3.1 Aktivaatiokuvion tarkastelu.....	16
3.2 Fonologisten kategorioiden prosessointi lasten aivoissa .....	19
3.3 Lapsen iän vaikutus fonologisten kategorioiden prosessointiin .....	21
3.4 Lasten ja aikuisten väliset erot fonologisten kategorioiden prosessoinnissa .....	24
4. POHDINTA.....	24
4.1 Kieliympäristön yhteydet fonologisen tiedon prosessointiin N250-vasteen osalta .....	24
4.2 Tutkimuksen vahvuudet, heikkoudet sekä jatkotutkimusmahdollisuudet.....	29
4.3 Johtopäätökset.....	31
LÄHTEET .....	32

# 1. JOHDANTO

Puheella ja sen havaitsemisella on tärkeä merkitys yksilön elämässä. Puheen havaitsemisella tarkoitetaan sitä, kuinka yksilö havaitsee kielen ääniteitä (Harley, 2008). Arkipäiväisessä elämässä tämä ääniteiden yhdistäminen merkityksiksi tapahtuu saumattomasti ja sujuvasti (Jusczyk, 1997). Vaikka kielet ovat monimutkaisia järjestelmiä, omaksuvat lapset äidinkieltä silminnähten vaivattomasti (Friederici & Brauer, 2019). Puheen havaitsemisella vaikuttaakin olevan muuhun kuulonvaraiseen prosessointiin verrattuna erilaisia ominaispiirteitä. Tutkimusten mukaan puheääniteiden käsittely on esimerkiksi muiden äänien käsittelyä nopeampaa (Lieberman ym., 1967; Miller & Taylor, 1948). Näiden tutkimustulosten pohjalta koartikulaation, eli vierekkäisten ääniteiden toisiinsa mukautumisen, aikaansaama foneettisten segmenttien limittäisyys mahdollistaa puheinformaation nopean käsittelyn (Jusczyk & Luce, 2002; Ohala, 1993). Koska eri kielet eroavat toisistaan tällaisilta äännekuvioiltaan, on kieliympäristöllä merkittävä rooli lapsen oppiessa havaitsemaan puhetta nimenomaan oman natiivikielensä tyypillisten piirteiden kautta (Jusczyk, 1997).

Edellä kuvattu puheen ja kielen prosessointi on aivojen aikaansaama (Friederici & Brauer, 2019), joten kielenkehitystä ei siten voida erottaa aivojen kehityksestä. Aivojen kehityksen kannalta olennaista on, että aivokuori muovautuu saamansa syötteen mukaan (Buonomano & Merzenich, 1998). Tämä muovautuvuus eli aivokuoren plastisuus onkin aivojen väline mahdollistaa esimerkiksi kielen oppimista (Zhang & Wang, 2007). Aivokuoren plastisuus perustuu Donald Hebbin (1949) esiintuoman näkemyksen mukaisesti siihen, että yhdessä laukeavien hermosolujen vaikutuksesta syntyy pitkäkestoisia solutason muutoksia, joiden seurauksena kyseiset hermosolut laukeavat todennäköisemmin yhdessä myös jatkossa. Kielenkehityksen kannalta tärkeää on erityisesti aivokuoren ohimolohkoissa sijaitsevan kuuloaivokuoren plastisuus, sillä kuuloaivokuori on merkittävässä roolissa esimerkiksi puheen havaitsemisessa (Barbour, 2009; Rauschecker, 1999).

Edellä kuvatusti lapset siis oppivat hyödyntämään fonologista tietoa, eli tietoa oman kielensä ääniteistä, puhutun kielen prosessoinnissa ja näin ollen havaitsemaan puhetta natiivikielensä piirteiden perusteella (Jusczyk, 1997; Wagner & Torgesen, 1987). Lisäksi kuuloaivokuoren tiedetään muovautuvan kieliympäristöstä tulevan syötteen perusteella ja tämän muovautuvuuden olevan merkittävässä roolissa yksilön kielenkehityksen kannalta (Buonomano & Merzenich, 1998; Rauschecker, 1999). Vielä ei kuitenkaan ymmärretä täysin, kuinka kieliympäristö on yhteydessä siihen, miten lasten aivot reagoivat kuuloherätevästeiden muodossa fonologiselle tiedolle. Toisaalta ei myöskään ole selvyyttä siitä, miten pitkälle lapsuuteen kuuloaivokuoren plastisuus fonologisen

tiedon käsittelyn suhteen säilyy suurena. Tämän tutkimuksen tavoitteena onkin selvittää, miten kieliympäristön ominaisuudet vaikuttavat lasten aivojen fonologisen tiedon käsittelyyn.

## 1.1 Fonologinen kehitys

Kielenkehityksessä merkittävässä roolissa olevalla fonologisella prosessoinnilla tarkoitetaan kykyä käyttää fonologista tietoa, eli kielen äänneitä, puhutun ja kirjoitetun kielen prosessoinnissa (Wagner & Torgesen, 1987). Fonologisen prosessoinnin nähdään koostuvan kolmesta osasta: fonologisesta työmuistista, fonologisten sanahahmojen nopeasta tavoittamisesta ja fonologisesta tietoisuudesta (Wagner & Torgesen, 1987). Kieliympäristö vaikuttaa erityisesti fonologiseen tietoisuuteen, jolla tarkoitetaan yksilön sensitiivisyyttä puhutun kielen äännerakenteelle (Anthony & Francis, 2005). Oman natiivikielensä äännerakenteen sujuvaksi havaitsijaksi tullakseen lapsen tuleekin oppia monia erilaisia kykyjä (Jusczyk, 1997). Hänen tulee oppia pärjäämään vaihtelevien puhesignaalien kanssa huolimatta esimerkiksi puhujan tai puhenopeuden aiheuttamista akustisista eli äänen fysikaalisista eroista sekä oppia omalle äidinkielelleen tyypilliset äänneet ja merkityksen ilmaisemisen kannalta tärkeät äänne-erot (Jusczyk, 1997). Tähän liittyen on opittava myös, mitkä äänneet voivat omassa äidinkielessä esiintyä peräkkäin (Kelley & Lambert, 2011). Lapsen tulee lisäksi oppia erottamaan puheesta sanojen väliset rajat (Friederici & Wessels, 1993). Edellä kuvatut tekijät, kuten äänneiden järjestyksen ja sanojen välisten rajojen oppiminen, ovat olennaisessa roolissa lapsen alkaessa yhdistää sanojen äännekuvioita niiden merkityksiin (Saffran & Graf Estes, 2006). Kaikki nämä prosessit on lisäksi opittava toteuttamaan niin tehokkaasti ja nopeasti, että puhetta on mahdollista ymmärtää semanttisella tasolla (Jusczyk, 1997). Oppiessaan uusia fonologisen tietoisuuden taitoja lapset hiovat myös jo oppimiaan taitoja, joten fonologisen prosessoinnin kehittyminen ei siten koostu ainoastaan erillisistä vaiheista (Anthony ym., 2003). Lapset tulevat iän myötä esimerkiksi sensitiivisemmiksi yhä pienemmille sanojen osille (Anthony & Francis, 2005).

Ihmiskielen monimutkaisuudesta huolimatta edellä kuvattu kielen oppiminen tapahtuu lapsuudessa melko vaivatta ilman tietoista ponnistelua (Friederici & Brauer, 2019). Ihmisen fonologinen kehitys alkaakin jo hyvin varhain. Jo vastasyntynyt vauva reagoi kielellisiin ärsykkeisiin ja pystyy tunnistamaan esimerkiksi kielen sävelkorkeuteen, rytmiin ja tauotukseen liittyviä piirteitä (Siiskonen, Ahonen & Määttä, 2019). Osa fonologisen prosessoinnin kehityksestä, kuten sensitiivisyyden kehittyminen suuremmista puheen yksiköistä pienempiin, on universaalialue ja kielestä riippumatonta (Anthony & Francis, 2005). Kieliympäristö on kuitenkin suuressa roolissa

muovaamassa lapsen fonologisen tietoisuuden kehitystä (Anthony & Francis, 2005). Alle puolen vuoden ikäiset vauvat pystyvät erottelemaan toisistaan sellaisia puheäänteiden eroavaisuuksia, jotka eivät ilmene heidän ympäristössään puhutussa kielessä (Streeter, 1976; Trehub, 1976). Ensimmäisen elinvuotensa jälkimmäisen puoliskon aikana lapsi kuitenkin omaksuu nimenomaan omalle äidinkielelleen tyypillisiä piirteitä (Kuhl ym., 2006), ja jo 9 kuukauden ikäiset vauvat osoittavat preferenssiä omalle kieliympäristölle tyypillisiä äännekuvioita eli foneettista rakennetta kohtaan (Jusczyk ym., 1994).

## 1.2 Kategorinen havaitseminen

Ensimmäisen elinvuotensa aikana lapsi siis omaksuu oman äidinkieltensä tyypillisiä akustisia, foneettisia ja fonologisia piirteitä (Jusczyk ym., 1994). Kielen oppiakseen lapsen tuleekin oppia natiivikielensä merkitysten ymmärtämisessä käytetyt foneettiset erot (Kuhl ym., 2006). Näillä foneettisilla eroilla tarkoitetaan puheäänteiden akustisten piirteiden eroavaisuuksia, jotka voivat liittyä esimerkiksi äänihuulten värinään tai äänen artikulaatiopaikkaan puhe-elimistössä (Parviainen, 2007). Eri kielet poikkeavat toisistaan sen suhteen, millaiset foneettiset erot ovat kielen merkityksen ymmärtämisen kannalta olennaisia (Lieberman ym., 1957). Äänteet, joiden foneettiset erot eivät heijasta tietyn kielen merkityseroja, muodostavat kyseisessä kielessä fonologisen kategorian, jonka sisällä äänteiden välinen erottelukyky toisistaan on heikentynyt (Hauser, 2019; Liberman ym., 1957). Tässä pro gradu -tutkimuksessa ilmiöstä käytetään fonologisen kategorian käsitettä (Hauser, 2019), mutta samaa asiaa on tutkimuksissa kuvattu myös foneettisen tai foneemisen kategorian käsitteillä (ks. esim. Hazan & Barrett, 2000; Liberman ym., 1957; Sharma & Dorman, 2000). Fonologisten kategorioiden välisistä, eli tietyn kielen merkityseroja heijastavista, foneettisista eroista käytetään tässä pro gradu -tutkimuksessa puolestaan nimitystä fonologinen ero.

Edellä kuvattua ilmiötä, jossa kategoriat vaikuttavat havaitsemiseen havaintotoimintojen muuttaessa jatkuvat havaintosignaalit epäjatkuviksi sisäisiksi edustuksiksi, kutsutaan kategoriseksi havaitsemiseksi (Goldstone & Hendrickson, 2010). Kategorinen havaitseminen on tärkeää, sillä se heijastaa havaitsemisen välttämätöntä adaptaatiota ja tukee yksilön tekemiä luokitteluita (Goldstone & Hendrickson, 2010). Puheen havaitsemisessa kategorinen havaitseminen mahdollistaa nopean ja tarkan havaitsemisen (Kong & Edwards, 2016) huolimatta siitä, että puheen akustiset piirteet vaihtelevat esimerkiksi puhujan tai puhenopeuden mukaan (Jusczyk & Luce, 2002). Vaikka kuulluissa foneemeissa, eli merkityksen erottelemisessa käytetyissä puheen yksiköissä, voi siten olla

paljon vaihtelua, yksilö kiinnittää harvoin huomiota tähän vaihteluun, sillä kuullut puheäänteet luokitellaan automaattisesti erilaisiin kategorioihin (Harley, 2008).

Ihmisellä vaikuttaa tutkimusten valossa olevan biologinen taipumus kategoriseen havaitsemiseen osana kielen oppimista (Eimas ym., 1971). Kieliympäristön altistuksella on kuitenkin merkittävä rooli lapsen oppiessa luokittamaan kategorioita nimenomaan omalle äidinkielelle tyypillisten äänteiden perusteella (Kuhl ym., 1992). Puheäänteiden kategorioiden rakentumista kieliympäristön piirteiden pohjalta on kuvattu perseptuaalisella magneettiefektillä (engl. *perceptual magnet effect*, PME) (Kuhl, 1991; Kuhl ym., 1992). Tällä tarkoitetaan ilmiötä, jossa kunkin kielen kannalta merkityksellisten äänteiden prototyypit vaikuttavat yksilön tekemiin havaintoihin ärsykkeistä (Kuhl, 1991). Teorian mukaan prototyypit toimivat eräänlaisena havaitsemista ohjaavana magneettina, jotka ikään kuin vetävät samankaltaisia ärsykeitä puoleensa (Kuhl, 1991). Tämä näyttäytyy kuulonvaraisessa havaitsemisessa siten, että äänteiden erottelukyky heikentyy prototyyppiä muistuttavien äänteiden osalta (Iverson & Kuhl, 1995), eli samaan fonologiseen kategoriaan kuuluvien äänteiden välisten erojen havaitseminen vaikeutuu. Havaitsemiseen vaikuttaa siten äänteiden tyypillisuus omassa natiivikielessä (Kuhl, 1991).

Kielispesifien kategorioiden on havaittu muodostuvan kieliympäristön ominaisuuksien pohjalta pitkälti jo ensimmäisen ikävuoden aikana (Werker & Lalonde, 1988; Werker & Tees, 1984), ja niiden muodostuminen on tärkeässä roolissa ohjaamassa esimerkiksi sanojen oppimista (Werker & Tees, 2005). Kategorioiden pohjalta tapahtuvan havaitsemisen kehittyminen oman äidinkielen piirteiden mukaisesti jatkuu kuitenkin tutkimusten mukaan vielä myöhemminkin lapsuudessa aikuisten ja vanhempien lasten tunnistaessa oman äidinkielen fonologisia eroja nuorempia lapsia tarkemmin (Burnham ym., 1991; Hazan & Barrett, 2000; Simon & Fourcin, 1978). Fonologisen prosessoinnin kehityksen voidaan siten nähdä jatkuvan pitkälle lapsuuteen ja nuoruuteen saakka.

Äänteiden kategorisen havaitsemisen tutkimuksessa on hyödynnetty ääniärsykkeiden akustisten erojen kontrolloimiseksi soinnin alkamisajan käsitettä (ks. esim. Elangovan & Stuart, 2011; McFayden ym., 2020; Sharma & Dorman, 1999). Soinnin alkamisajalla (engl. *voice onset time*, VOT) tarkoitetaan aikaa, joka kuluu klusiilin, eli konsonantin, jota äännettäessä ääniväylässä on sulkeuma, laukeamisesta siihen, että äänihuulet alkavat väristä (Fujimura & Erickson, 1997; Lisker & Abramson, 1964). Soinnittomissa konsonanteissa, kuten äänteissä /p/ ja /t/, tässä kestää noin 60 millisekuntia, kun taas soinnillisissa konsonanteissa, kuten äänteissä /b/ ja /d/, äänihuulet alkavat väristä heti klusiilin lauettua (Harley, 2008). On myös mahdollista luoda äänteitä, joissa soinnin alkamisaika on jotakin tältä väliltä, ja tällaiset äänteet yksilö tyypillisesti kategorisoi joko soinnillisiksi tai soinnittomiksi äänteiksi (Harley, 2008). Esimerkiksi englanninkieliset aikuiset mieltävät ääniärsykkeet, joissa soinnin alkamisaika on 0-20 millisekuntia, tyypillisesti konsonantiksi



/b/, kun taas ääniärsykkeet, joissa soinnin alkamisaika on 40-60 millisekuntia, konsonantiksi /p/ (Molfese, 1978). Tutkimuksissa on havaittu, että myös lapset luokittelevat VOT-arvoltaan eripituisia äänneitä hyvin aikuistenkaltaisesti (Eimas ym., 1971; King ym., 2008). Koska eri kielet poikkeavat toisistaan sen mukaan, missä kohti soinnin alkamisajan jatkumoa äänneiden merkityksen erottelemisessa käytetyt kategoriarajat sijaitsevat (Oron ym., 2019; Sharma & Dorman, 2000), tarjoaa ilmiö mahdollisuuden tarkastella kieliympäristön vaikutusta puheen havaitsemiseen.

### 1.3 Kielen äänneiden käsittely aivoissa

Edellä kuvattu kielen prosessointi tapahtuu aivoissa (Friederici & Brauer, 2019), joten kielenkehitys kulkee siten käsikädessä aivojen kehityksen kanssa. Puheen havaitsemisen kannalta tärkeässä roolissa oleva kuuloaivokuori sijaitsee aivokuoren ohimolohkoissa Sylviuksen uurteen alla (Barbour, 2009; Shamma & Fritz, 2009). Korvien vastaanottama akustinen signaali muuttuu neuraaliseksi signaaliksi simpukassa, ja tämä signaali etenee erilaisten aivorakenteiden, kuten aivokukkuloiden ja talamuksen, kautta kuuloaivokuorelle (Shamma & Fritz, 2009). Kuuloaivokuorelta puolestaan on yhteyksiä kognitiivisten toimintojen kannalta keskeisille alueille otsa- ja päälaenlohkoihin (Shamma & Fritz, 2009). Edellä kuvattu tiedon eteneminen aivoissa tapahtuu neuraalisen signaalin edetessä synapsien välityksellä hermosolusta toiseen (Hari & Puce, 2017). Tätä signaalien etenemistä ja kortikaalista aktiivisuutta voidaan tutkia noninvasiivisesti ajallisesti tarkasti EEG:n eli elektroenkefalografian ja MEG:n eli magnetoenkefalografian avulla (Hämäläinen ym., 1993).

MEG- ja EEG-signaalien pääasialliset generaattorit ovat aivokuoren pyramidaalisten hermosolujen synkroniset postsynaptiset virtaukset (Hari, 1990). MEG- ja EEG-signaaleilla on mahdollista tutkia muun muassa tapahtumasidonnaisia herätevasteita, joilla tarkoitetaan esimerkiksi tiettyihin sensorisiin tai kognitiivisiin tapahtumiin liittyviä aikaan sidonnaisia aiovasteita (Luck, 2014). EEG:llä aivoaktiivisuuden tutkiminen tapahtuu mittaamalla aivojen sähköisiä potentiaaleja, kun taas MEG:llä mitataan vaihteluita neuronaaalisen aktiivisuuden aikaansaamissa magneettisissa kentissä (Hari & Puce, 2017). EEG:hen verrattuna MEG:n etuna on, että sen avulla on mahdollista paikantaa neuraaliset tapahtumat muutamien millimetrien tarkkuudella (Hämäläinen, 1992) ja näin ollen analysoida pään ulkopuolelta mitattujen magneettisten kenttien lähteitä niin ajallisesti kuin paikallisestikin (Hari ym., 2010). MEG:tä onkin käytetty kuulonvaraisen prosessoinnin tutkimuksessa jo 1980-luvulta lähtien (Hari ym., 1980).

Puheen kuulonvaraisen kortikaalisen prosessoinnin tiedonkäsittelyketjua on kuvattu obligatoristen tapahtumasidonnaisten herätevasteiden osalta tutkimuskirjallisuudessa tarkasti erityisesti aikuisilla. Obligatorisilla tapahtumasidonnaisilla herätevasteilla tarkoitetaan vasteita, jotka ovat havaittavissa riippumatta esimerkiksi edeltävistä tai yhtäaikaaisista tapahtumista, tehtävään liittyvistä piirteistä ja yksilön motivaatiosta tai taidoista (Winkler ym., 2013). Aikuisilla merkittävimmät kortikaaliset obligatoriset kuuloherätevasteet ovat noin 50 millisekunnin kohdalla ärsykkeen esittämisestä ilmenevä P1-vaste, noin 100 millisekunnin kohdalla ilmenevä N1-vaste sekä noin 180 millisekunnin kohdalla ilmenevä P2-vaste (Näätänen, 1992; Trainor, 2007). Lapsilla merkittävimmät obligatoriset kuuloherätevasteet ovat sen sijaan noin 100 millisekunnin kohdalla ilmenevä P1-vaste ja noin 250 millisekunnin kohdalla ilmenevä N250- tai N2-vasteeksi nimitetty vaste (Čeponiencová ym., 2002; Parviainen ym., 2011). Lapsilla kuuloherätevasteissa on siten havaittavissa aikuisiin verrattuna pitkittyneempi reaktio noin 250 millisekunnin kohdalla (Parviainen, 2007; Parviainen ym., 2011). Koska kuuloherätevasteissa tapahtuu iän myötä merkittäviä muutoksia (Albrecht ym., 2000; Čeponiencová ym., 2002; Ponton ym., 2000; Wunderlich ym., 2006), on niitä käytetty tutkimuksessa kuvaamaan aivojen kuulojärjestelmän plastisuuden tasoa (Sharma ym., 2002; van Bijnens ym., 2022). Kuulojärjestelmän kehityksen tarkastelun kannalta merkityksellisenä voidaan pitää erityisesti N250-vastetta, sillä kyseinen vaste on havaittavissa kaikenikäisillä lapsilla sen ollessa aikuisilla puolestaan huomattavasti lapsia heikompi (Ponton ym., 2000; van Bijnens ym., 2022).

N250-vastetta vastaava vaste ilmenee jo noin kuuden kuukauden ikäisillä vauvoilla (Kushnerenko ym., 2002), ja vasteen voimakkuus kasvaa noin kymmenvuotiaaksi asti (Ponton ym., 2000). Kymmenen ikävuoden jälkeen N250-vasteen voimakkuuden on havaittu lähtevän laskuun ja vasteen olevan aikuistenkaltainen noin 17-vuotiaana (Ponton ym., 2000). Voimakkuuden muutoksista huolimatta N250-vasteen neuraaliset lähteet on sekä aikuisilla että lapsilla paikannettu ohimolohkojen yläosiin (Čeponiencová ym., 2002). Vasteen aikainen ilmaantuminen ja iästä riippumaton suhteellisen pysyvä paikannus viittaavatkin siihen, että N250-vasteen voimakkuudessa lapsuudesta aikuisuuteen tapahtuvat muutokset kertovat aivojen biologisesta kypsymisestä (Čeponiencová ym., 2002). Voimakkuudessa tapahtuvien muutosten taustalla on esitetty olevan esimerkiksi pyramidaalisten hermosolujen synapsitiheyden väheneminen (Ponton ym., 2000). On myös esitetty, että N250-vasteen heikkeneminen lapsuudesta aikuisuuteen voisi liittyä aivojen inhibitorisen kontrollin vahvistumiseen (Čeponiencová ym., 2002). Tällä hermostollisella inhibitiolla tarkoitetaan aivojen toiminnan kannalta keskeisessä roolissa olevaa, pääasiassa välittäjäaine GABA:n vaikutuksesta tapahtuvaa, neuraalisen aktivaation vaimentumista (Barron, 2021). Hermosolujen alhaisempi inhibitio on yhdistetty suurempaan aivokuoren plastisuuden tasoon (Kral ym., 2001; Ziemann ym., 2001), joten N250-vaste heijastaa siten mahdollisesti aivokuoren plastisuuden tasoa.

## 1.4 Kieliympäristön yhteys kuuloherätevasteisiin

Edellä kuvatun foneettisen havaitsemisen kielispesifisyyden taustalla on esitetty olevan natiivikielen pohjalta tapahtuva aivojen hermoverkkojen muovautuvuus (Kuhl, 2004). Kieliympäristön ominaisuuksien pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden onkin useissa tutkimuksissa havaittu olevan yhteydessä niin kutsutun poikkeavuusnegatiivisuusvasteen (engl. *mismatch negativity*, MMN) voimakkuuteen aikuisilla (Näätänen ym., 1997; Sharma & Dorman, 1999, 2000; Winkler ym., 1999). Kyseinen tyypillisesti erotusvasteena esitettävä vaste heijastaa aivojen automaattista prosessointia toistetuissa ääniärsykkeissä tapahtuville muutoksille ja kertoo näin ollen aivojen tiedonkäsittelyketjun sijaan aivokuoren lyhytaikaisista muistijäljistä (Näätänen ym., 2007). Tutkimustulokset fonologisten kategorioiden ja kieliympäristön yhteyksistä aivojen kuulotiedon käsittelyketjusta kertoviin obligatorisiin kuuloherätevasteisiin aikuisilla ovat puolestaan ristiriitaisia. Esimerkiksi N1-vasteen muutosten on osassa tutkimuksissa esitetty heijastavan fonologisia kategorioita (Sharma & Dorman, 1999; Simos ym., 1998), kun taas uudemmissa tutkimuksissa muutokset on yhdistetty ainoastaan ääniärsykkeiden akustisiin eroihin (Elangovan & Stuart, 2011; Hoonhorst ym., 2009; Sharma & Dorman, 2000). Myös lapsilla obligatoristen kuuloherätevasteiden on havaittu heijastavan ääniärsykkeiden akustisia eroja siten, että VOT-arvoltaan pitkät äänteet aikaansaavat myöhäisempiä P1- ja N250-vasteita (King ym., 2008).

Kieliympäristön yhteyttä lasten kuuloherätevasteisiin on aikaisemmin tutkittu lähinnä vauvojen osalta. Vauvoilla poikkeavuusnegatiivisuusvasteen on havaittu ensimmäisen ikävuoden jälkimmäisellä puolella kasvavan natiivikielen fonologisille eroille ja vähenevän vieraiden kielten fonologisten erojen osalta (Cheour ym., 1998; Rivera-Gaxiola ym., 2005) sekä heijastavan vuoden ikäisillä vauvoilla natiivikielen kategorioita (Garcia-Sierra ym., 2016). Aikaisempaa tutkimusta kieliympäristön vaikutuksesta kouluikäisten lasten kuuloherätevasteisiin ei kuitenkaan juurikaan ole. Auditivisesta neuropatiasta kärsivillä lapsilla natiivikielen piirteiden pohjalta muodostuneet äänteiden väliset fonologiset kategoriarajat eivät eräissä tutkimuksissa olleet merkittävästi yhteydessä P1- ja N250-vasteisiin (McFayden ym., 2020). Musiikkiharjoittelun on puolestaan aikaisemmin havaittu olevan kouluikäisillä lapsilla yhteydessä tavujen keston ja soinnin alkamisajan tehostuneeseen esitietoiseen prosessointiin suurentuneen poikkeavuusnegatiivisuusvasteen muodossa (Chobert ym., 2012), mikä viittaa aivojen kuulojärjestelmän muovautuvuuteen ympäristön perusteella vauvaiän lisäksi myös myöhemmin lapsuudessa.

## 1.5 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten kieliympäristön ominaisuudet vaikuttavat lasten aivojen fonologisen tiedon käsittelyyn sekä tarkastella lisäksi iän vaikutusta aivojen fonologisen tiedon prosessointiin. Näitä tavoitteita lähestyttiin tarkastelemalla natiivikielen ominaisuuksien pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden yhteyksiä kuuloherätevasteisiin. Aikaisemmissa tutkimuksissa kieliympäristön ja sen pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden on havaittu olevan aikuisilla ja vauvoilla yhteydessä poikkeavuusnegatiivisuusvasteen voimakkuuteen (ks. esim. Garcia-Sierra ym., 2016; Näätänen ym., 1997; Rivera-Gaxiola ym., 2005; Sharma & Dorman, 1999, 2000). Kieliympäristön roolia vauvaikäistä vanhempien lasten aivojen kuulotiedon prosessoinnissa ei kuitenkaan ole juurikaan tutkittu aikaisemmin. Koska N250-vaste on kuulotiedon käsittelyssä lapsilla vallitsevin negatiivinen obligatorinen tapahtumasidonnainen jännitevaste ja vasteen voimakkuudessa tapahtuu iän myötä merkittäviä muutoksia (Čeponiencová ym., 2002), oltiin tässä tutkimuksessa kiinnostuneita tässä aikaikkunassa tapahtuvasta prosessoinnista.

Tarkasteltaessa fonologisten kategorioiden yhteyksiä N250-vasteeseen tässä tutkimuksessa hyödynnettiin priming-efektiin perustuvaa koeasetelmaa. Priming-efektillä tarkoitetaan aikaisemmin esitetyn ärsykkeen aikaansaamia muutoksia saman tai samankaltaisen ärsykkeen myöhemmässä prosessoinnissa (American Psychological Association, 2009). Tämän nähdään johtuvan siitä, että edeltävän aktivaation seurauksena ärsykkeen edustus on helpommin saavutettavissa (Forster & Davis, 1984). Aivotasolla priming-efekti näyttäytyy vähentyneenä neuraalisena aktivaationa saman ärsykkeen toistuessa (Grill-Spector ym., 2006). Tässä tutkimuksessa priming-efektiä hyödynnettiin tarkasteltaessa aiovasteita kuulluille tavuille, joita edelsi joko samaan tai eri fonologiseen kategoriaan natiivikielessä kuuluva tavu. Tarkemmat tutkimuskysymykset olivat seuraavat:

1. Eroaako N250-vasteen voimakkuus kuullulle tavulle lapsilla sen mukaan, edeltääkö sitä samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu?
2. Vaikuttaako lapsen ikä fonologisten kategorioiden prosessointiin N250-vasteen osalta?
3. Eroavatko lapset aikuisista fonologisten kategorioiden prosessoinnin suhteen N250-vasteen osalta?

Jo vuoden ikäisillä vauvoilla kuuloherätevasteiden osalta poikkeavuusnegatiivisuusvasteen on havaittu heijastavan natiivikielen piirteitä ja fonologisia kategorioita (Cheour ym., 1998; Garcia-Sierra ym., 2016; Rivera-Gaxiola ym., 2005). Aikaisempaa tutkimusta kieliympäristön ja

fonologisten kategorioiden yhteydestä N250-vasteeseen ei sen sijaan juurikaan ole. Priming-efektin pohjalta oletettiin, että N250-vaste on lapsilla voimakkaampi silloin, kun kuultua tavua edeltää eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu (hypoteesi 1), sillä edeltävä aktivaatio ei ole helpottanut ärsykkeen saavutettavuutta. Huomionarvoista oli kuitenkin se, että aikuisilla merkittävimmän negatiivisen tapahtumasidonnaisen kuuloherätevasteen, N1-vasteen, on osassa tutkimuksissa havaittu kieliympäristön pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden sijaan heijastavan lähinnä äänteiden akustisia eroja (Elangovan & Stuart, 2011; Hoonhorst ym., 2009; Sharma & Dorman, 2000). Siten oli myös mahdollista, ettei fonologisten kategorioiden havaittaisi käsillä olevassa tutkimuksessa vaikuttavan lapsilla tarkasteltavaan N250-vasteeseen. Aikaisemman tutkimuksen perusteella ei pystytty asettamaan hypoteesia siitä, kummassa aivopuoliskossa kieliympäristön myötä syntyvät erot fonologisten kategorioiden käsittelemisessä mahdollisesti ilmenevät. Siten tutkimuksessa tarkasteltiin N250-vasteen voimakkuutta erikseen vasemmassa ja oikeassa aivopuoliskossa, vaikka aivopuoliskojen väliset erot eivät olleetkaan tutkimuskysymysten kannalta keskiössä.

N250-vasteen on aikaisemmissa tutkimuksissa havaittu voimistuvan noin kymmenvuotiaaksi asti ja vasteen voimakkuuden lähtevän tämän jälkeen laskuun (Ponton ym., 2000). Siten N250-vasteen odotettiin olevan voimakkaimmillaan noin kymmenen ikävuoden kohdalla (hypoteesi 2a) ja olevan lapsilla aikuisia voimakkaampi (hypoteesi 3a). Iän yhteyttä fonologisten kategorioiden prosessointiin aivoissa ei sen sijaan tiedettävästi ole aikaisemmin tutkittu vauvaikäistä vanhemmilla normaalin kuulon omaavilla lapsilla. Natiivikielen kategorioiden pohjalta tapahtuvan havaitsemisen kehittymisen on kuitenkin havaittu tutkimuksissa jatkuvan vielä vauvaikää myöhemmin lapsuudessa ja nuoruudessa (Burnham ym., 1991; Hazan & Barrett, 2000; Simon & Fourcin, 1978), ja tämän foneettisen havaitsemisen kielispesifisyyden taustalla on esitetty olevan aivojen hermoverkkojen muovautuminen natiivikielen piirteiden mukaisesti (Kuhl, 2004). Siten voitiin olettaa, että hermoverkot muovautuvat natiivikielen piirteiden pohjalta vielä myöhemminkin lapsuudessa. Näin ollen N250-vasteen voimakkuuden odotettiin eroavan vanhemmilla lapsilla nuorempia lapsia suuremmin sen mukaan, edeltääkö tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu (hypoteesi 2b). Samoin odotettiin, että N250-vasteen voimakkuuden eroavaisuus on aikuisilla lapsia suurempaa sen mukaan, kuuluuko edeltävä tavu samaan vai eri fonologiseen kategoriaan (hypoteesi 3b).

## 2. MENETELMÄT

### 2.1 Tutkittavat

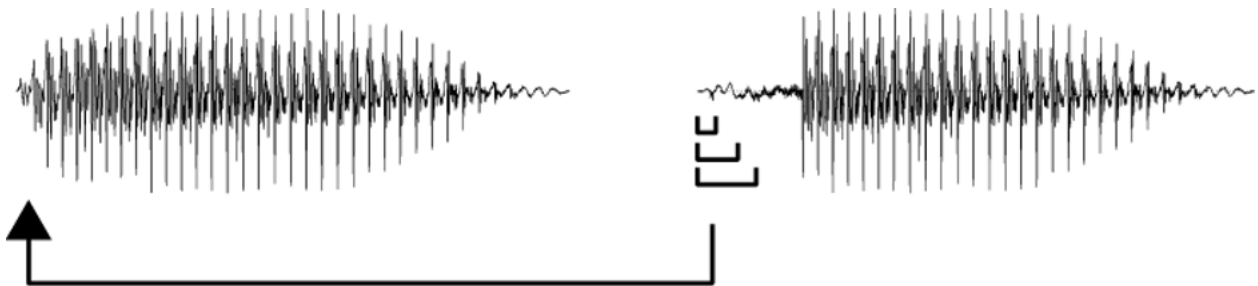
Tutkimuksen aineisto kerättiin Oxfordissa vuosina 2010–2011 osana suurempaa tutkimusprojektia. Tutkimusprojektilla oli puoltava lausunto Oxfordin yliopiston eettiseltä toimikunnalta. Tutkimukseen osallistui 33 iältään 6–14.5-vuotiasta lasta, joista 13 oli tyttöjä ja 20 poikia, sekä 11 iältään 19–26-vuotiasta aikuista, joista 7 oli naisia ja 4 miehiä. Tutkimukseen osallistuneet lapset rekrytoitiin Oxfordin alueen kouluista ja tutkimukseen osallistuneet aikuiset sähköpostilistan kautta Oxfordin yliopiston opiskelijoista. Tutkittaville korvattiin tutkimukseen osallistumisesta heille aiheutuneet kustannukset. Ennen testausten aloittamista tutkittavilta aikuisilta sekä tutkittavien lasten vanhemmilta kerättiin tietoinen suostumus tutkimukseen. Tutkimuskäynnit toteutettiin Warnefordin sairaalan Oxford Centre for Human Brain Activity (OHBA) -yksikössä. Yksi tutkimukseen osallistuneista lapsista jätettiin pois tutkimuksen analyyseistä dataan liittyvien syiden vuoksi, joten tutkimuksen aineisto koostui 32 lapsesta ja 11 aikuisesta.

Kaikki tutkittavat lapset ja aikuiset olivat oikeakätisiä ja kuuloltaan normaaleita, eikä heillä ollut historiassa neurologisia sairauksia. Kenelläkään tutkittavista lapsista tai aikuisista ei ollut dysleksian tai kielellisen erityisvaikeuden diagnoosia, ja kaikkien äidinkieli oli englanti. Tutkittavien lasten kielellistä kehitystä kartoitettiin lasten vanhempien täyttämällä kyselylomakkeella. Viiden tutkittavan lapsen osalta vanhemman täyttämä kyselylomake puuttui. Kyselylomakkeen tietojen mukaan tutkittavista lapsista kolme oli saanut erityisopetusta lukemisen pulmiin ja yksi oli käynyt puheterapeutilla myöhästyneen puheen vuoksi. Kolmella lapsella oli säännöllistä altistumista englannin kielen lisäksi myös jollekin muulle kielelle.

Tämän tutkimuksen toista tutkimuskysymystä varten tutkittavat lapset jaettiin kolmeen ryhmään ikänsä perusteella. Ryhmä A ( $n = 10$ ) koostui iältään 6–7.5-vuotiaista 2 tytöstä ja 8 pojasta, ryhmä B ( $n = 11$ ) iältään 9–10.5-vuotiaista 5 tytöstä ja 6 pojasta ja ryhmä C ( $n = 11$ ) iältään 12–14.5-vuotiaista 6 tytöstä ja 5 pojasta. Neljäs ikäryhmä, ryhmä D ( $n = 11$ ), puolestaan koostui 19–26-vuotiaista aikuisista, joista 7 oli naisia ja 4 miehiä.

## 2.2 Ärsykkeet ja tehtävä

Koeasetelman ääniärsykkeinä käytetyt tavut muokattiin Adobe Audition -ohjelmalla suomea äidinkielenään puhuvalta mieheltä nauhoitetuista tavuista /ba/ ja /pa/. Tavuista luotiin jatkumoinnin alkamisajan (VOT) mukaan tavusta /ba/ tavuun /pa/. Tämä toteutettiin siten, että tavun /pa/ alusta leikattiin vaihtelevan mittainen akustisen signaalin osa ja korvattiin tällä leikatulla osalla saman mittainen osa äänitetyn tavun /ba/ alusta (ks. Kuvio 1). Akustinen signaali leikattiin ääniaallon amplitudin nolla-arvon kohdalta äänihäiriöiden syntymisen välttämiseksi. Tällä tavoin muokattiin yhteensä kymmenen VOT-arvoltaan erilaista puheääntä, joista muodostettiin tässä tutkimuksessa käytetyt kolme erilaista tavuparityyppiä.



KUVIO 1. Skemaattinen esitys nauhoitettujen tavujen /ba/ (vasemmalla) ja /pa/ (oikealla) ääniaalloista sekä tavujen muokkauksesta.

Tutkittavien kategorista havaitsemista testattiin kunkin tutkittavan yksilöllisen /ba/- ja /pa/-tavujen välisen kategoriarajan VOT-arvon määrittämiseksi. Testissä esitettyjen tavujen VOT-arvot vaihtelivat 0 millisekunnista 62 millisekuntiin. /Ba/- ja /pa/-tavujen välinen kategoriaraja sijoittui tutkittavilla VOT-arvon osalta noin 25 millisekuntiin, joskin lapsilla kategoriarajassa oli jonkin verran enemmän yksilöllistä vaihtelua.

Tutkimusasetelmassa käytettyjen tavuparien jälkimmäinen tavu oli akustisiin piirteisiin liittyvän prosessoinnin kontrolloimiseksi jokaisessa tavuparityypissä sama, /ba/ (24 VOT). Ensimmäisessä tavuparityypissä tätä tavua myös edelsi tavu /ba/ (24 VOT), joten parin tavut olivat sekä akustisesti että fonologiselta kategorialtaan (/ba/) samat. Tästä tavuparityypistä käytetään jatkossa nimitystä ”samat tavut”. Toisessa tavuparityypissä edeltävä tavu oli /ba/ (0 VOT), jolloin parin tavuissa oli akustinen ero, mutta molemmat tavut kuuluivat samaan fonologiseen kategoriaan

(/ba/). Kyseisestä tavuparityypistä käytetään jatkossa nimitystä ”akustinen ero”. Kolmannessa tavuparityypissä ensimmäinen tavu oli puolestaan /pa/ (50 VOT), eli edeltävä tavu erosi jälkimmäisestä tavusta niin akustisesti kuin fonologiselta kategorialtaan. Tästä tavuparityypistä käytetään jatkossa nimitystä ”akustinen + fonologinen ero”. Kahden jälkimmäisen tavuparityypin ensimmäisen ja toisen tavun väliset akustiset erot olivat VOT-arvon osalta yhtä suuret akustisten erojen kontrolloimiseksi. Tavut esitettiin tutkittavien molempiin korviin kuulokkeilla äänenvoimakkuudella, joka oli 65 desibeliä kunkin tutkittavan yksilöllistä kuulokynnystä suurempi. Tavuparin jälkimmäinen tavu esitettiin 1200 millisekuntia sitä edeltävän tavun jälkeen. Kunkin tavuparin jälkimmäisen tavun esittämisen jälkeen oli keskimäärin 2000 millisekunnin väli ennen seuraavan tavuparin ensimmäisen tavun esittämistä.

MEG-mittauksen aikana tutkittavia ohjeistettiin istumaan paikallaan ja kiinnittämään huomiota kuulemiinsa tavuihin. Noin 7 %:ssa esitetyistä tavupareista tutkittavien tuli ilmaista edessään olevaa nappia painamalla, olivatko esitetyn tavuparin tavut heidän mielestään samoja vai eri tavuja. Lasten keskittymisen tukemiseksi heille esitettiin tehtävän yhteydessä tietokoneen näytöllä kuva pupusta. Pupun korvat menivät ylös ja näytölle ilmaantui kysymysmerkki silloin, kun tutkittavan tuli vastata nappia painamalla. Vastauksen jälkeen tietokoneen näytölle ilmestyi palkkioksi kuva karkeista.

### **2.3 MEG-mittaukset**

MEG-mittaukset toteutettiin koko pään kattavalla 306-kanavaisella MEG-kypärällä (VectorView, Elekta-Neuromag Oy, Helsinki, Suomi). Kyseisen kypärän kanavat on jaettu 102 sensorielementtiin, joista jokainen sisältää yhden magnetometrin ja kaksi ortogonaalista planaarisista gradiometriä. MEG-mittaukset toteutettiin magneettisesti suojatussa huoneessa. Mittauksissa käytettiin 1000 Hz:n näytteenottotaajuutta. Tutkittavilta digitalisoitiin ennen mittausta kolme anatomista maamerkkiä: nenä sekä vasen ja oikea korvan edusta. Pään asentoa mitattiin mittauksen alussa HPI (Head Position Indicator) -järjestelmällä neljällä päähän asetetulla HPI-kelalla, joiden avulla voitiin myöhemmin vakioida pään paikka suhteessa mittaustantureihin. Lisäksi nuoremmilla lapsilla HPI-kelat olivat aktivoituna koko MEG-mittauksen ajan, mikä mahdollisti liikkeen aiheuttaman vääristymän korjaamisen jälkikäteen. Vaaka- ja pystysuoria silmänliikkeitä eli silmänräpäytyksiä ja sakkadeja nauhoitettiin mittauksen aikana elektro-okulografian (EOG) avulla.



## 2.4 MEG-datan esikäsittely ja analyysi

MEG-datasta poistettiin aluksi MaxFilter-ohjelmalla SSS (engl. *signal-space separation*) -menetelmällä (Taulu & Kajola, 2005) pään ulkopuolisten magneettikenttien aiheuttamat häiriöt. Lisäksi häiriöiden ajallisen muutoksen huomioivalla tSSS (engl. *temporal signal-space separation*) -menetelmällä (Taulu & Simola, 2006) poistettiin häiriöt, joiden poistoon staattinen SSS ei riittänyt. Aineistosta korjattiin pään asento liikekompensaatiomenetelmällä (engl. *movement compensation*, MC) (Taulu ym., 2005) niiden tutkittavien osalta, joilla HPI-kelat olivat olleet aktivoituna koko MEG-mittauksen ajan. Tämän jälkeen aineiston jatkokäsittelyt suoritettiin Meggie-ohjelmalla, joka on Jyväskylän yliopistossa kehitetty MNE-pythoniin perustuva graafinen käyttöliittymä MEG- ja EEG-datan analysointiin (Heinilä & Parviainen, 2022). Data suodatettiin kaistanpäästösuodattimella välille 1–40 Hz, ja näytteenottotaajuudeksi asetettiin 250 Hz. MEG-signaalista korjattiin silmänliikkeiden ja sydämensykkeen aiheuttamat häiriöt riippumattomien komponenttien analyysin (engl. *independent component analysis*, ICA) (Hyvärinen & Oja, 2000) avulla.

MEG-signaalista leikattiin kullekin yksittäiselle tavuparille 2200 ms pituinen epokki aikavälille -200 – 2000 ms suhteessa parin ensimmäiseen ääneen. Kontrolliajanjaksona (engl. *baseline*) käytettiin aikaväliä -200 – 2000 ms. Näiden epokkien yli laskettiin jokaiselle tutkittavalle kullekin kolmelle tavuparityypille erikseen keskiarvo kunkin MEG-kanavan osalta. Keskiarvoista jätettiin pois epokit, joissa MEG-signaali ylitti gradiometrien osalta 3000 fT/cm. Tämän jälkeen jokaiselle tutkittavalle laskettiin kullekin tavuparityypille erikseen kanavakeskiarvot oikean ja vasemman ohimolohkon osalta. Näillä alueilla kuuloaivokuoren synnyttämät herätevasteet näkyvät voimakkaimmin. Kanavakeskiarvojen laskeminen toteutettiin laskemalla ohimolohkon sensorelementtien gradiometrien vektorisummista keskiarvo erikseen molempien aivopuoliskojen osalta. Kunkin sensorelementin vektorisumma laskettiin siten, että sensorelementin kahden gradiometrin signaalien arvot korotettiin toiseen, saadut arvot summattiin yhteen ja saadusta summasta otettiin neliö. Tällä tavoin saatiin laskettua ohimolohkojen kanavien keskimääräisen aktivaation voimakkuus. Kanavakeskiarvojen laskutavan (summan neliöjuuri) myötä kanavakeskiarvot ovat aina positiivisia arvoja, eivätkä siten sisällä tietoa sähkövirran suunnasta (Bonte ym., 2006).

MEG-datan käsittelyn jälkeen jokaiselle tutkittavalle laskettiin Microsoft Excel -ohjelmalla edellä kuvatuista kanavakeskiarvoista keskimääräisen aktivaation voimakkuus N250-vasteen aikana sekä oikean että vasemman ohimolohkon osalta kullekin tavuparityypille erikseen. Aikaikkunana käytettiin aikaväliä 200–375 ms tavuparin jälkimmäisen tavun esittämisestä eli 1400–1575 ms tavuparin ensimmäisen tavun esittämisestä (ks. Kuvio 2). Kyseinen aikaikkuna määritettiin

tarkastelemalla kaikista tutkittavista muodostettuja kanavakeskiarvojen keskiarvokäyriä. Tilastollisissa analyyseissä tarkasteltiin ainoastaan tavuparin jälkimmäisen tavun aikaansaamaa N250-vastetta sen vuoksi, että kyseinen ääni oli jokaisessa tavuparityypissä sama niin fonologiselta kategorialtaan kuin akustisestikin. Näin kontrolloitiin se, että mikäli eri tavuparityyppien välillä havaittaisiin eroja N250-vasteessa, eivät erot olisi seurausta tavun akustisista ominaisuuksista, vaan siitä, miten samanlaiseksi jälkimmäinen tavu mielletäisiin edeltävään tavuun verrattuna. Tilastollisissa analyyseissä käytettiin edellä kuvattuja ohimolohkojen kanavakeskiarvojen arvoja, mutta N250-vasteen tuottaman sähkövirran suunta osoitettiin tarkastelemalla kanavien 242 (vasen ohimolohko) ja 1332 (oikea ohimolohko) kaikista tutkittavista muodostettuja keskiarvokäyriä. Kyseisissä kanavissa kuuloaivokuoren MEG-signaali on yleensä voimakkaimmillaan.

## 2.5 Tilastolliset analyysit

Tutkimuksen ensimmäisenä tavoitteena oli selvittää, eroaako N250-vasteen voimakkuus lapsilla kuulluille tavuille sen mukaan, edeltääkö tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Tätä tutkittiin toistomittausten varianssianalyysillä, jossa yksilönsisäisinä (engl. *within-subjects*) selittävinä muuttujina olivat tavuparityyppi ja aivopuolisko ja selitettävänä muuttujana N250-vasteen voimakkuus. Analyyseihin sisällytettiin lasten aineisto ( $n = 32$ ). Mikäli N250-vasteiden voimakkuuksien havaittiin eroavan eri tavuparityyppien välillä, parivertailuiden avulla tarkasteltiin, minkä tavuparityyppien osalta vasteet erosivat toisistaan ja keskiarvoja tarkastelemalla, mikä oli erojen suunta.

Toisena tutkimuskysymyksenä haluttiin selvittää, vaikuttaako lapsen ikä fonologisten kategorioiden prosessointiin N250-vasteen osalta. Tätä tutkimuskysymystä tutkittiin tarkastelemalla, eroaako N250-vasteen voimakkuus kuullulle tavulle eri ikäisillä lapsilla eri tavoin sen mukaan, edeltääkö tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Tämä toteutettiin toistomittausten varianssianalyysillä lasten aineistosta ( $n = 32$ ). Yksilönsisäisinä selittävinä muuttujina olivat edellisen tutkimuskysymyksen tavoin tavuparityyppi sekä aivopuolisko ja lisäksi yksioidenvälisenä (engl. *between-subjects*) selitettävänä muuttujana lapsen ikäryhmä (ryhmä A, B tai C). Selitettävänä muuttujana oli edellisen tutkimuskysymyksen tavoin N250-vasteen voimakkuus. Mikäli varianssianalyysissä havaittiin merkitseviä efektejä, Bonferroni-korjatun riippumattomien otosten t-testin sekä keskiarvotarkasteluiden avulla tarkasteltiin sitä, mitkä ikäryhmät erosivat toisistaan ja minkä tavuparityyppien osalta eroavaisuutta oli havaittavissa.

Tutkimuksen kolmantena tavoitteena oli selvittää, eroavatko lapset aikuisista fonologisten kategorioiden prosessoinnin suhteen N250-osalta. Tämä toteutettiin tarkastelemalla, eroaako N250-vasteen voimakkuus kuullulle tavulle aikuisilla ja lapsilla eri tavoin sen mukaan, edeltääkö sitä samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Analyysihin otettiin lasten aineiston ( $n = 32$ ) lisäksi myös aikuiset tutkittavat (ryhmä D,  $n = 11$ ). Lasten ikäryhmää tarkasteltiin tämän tutkimuskysymyksen osalta yhtenä ryhmänä yhdistämällä edellisessä tutkimuskysymyksessä käytetyt ikäryhmät A, B ja C yhdeksi kaikki lapset kattavaksi ikäryhmäksi ( $n = 32$ ). Tutkimuskysymystä tarkasteltiin toistomittausten varianssianalyysillä, jossa yksilönsisäisinä selittävinä muuttujina olivat tavuparityyppi ja aivopuolisko ja yksilöidenvälisinä selittävänä muuttujana ikävaihe eli se, oliko tutkittava aikuinen vai lapsi. Selitettävänä muuttujana analyysissä oli edellisten tutkimuskysymysten tavoin N250-vasteen voimakkuus. Mikäli merkitseviä efektejä havaittiin, parivertailuiden sekä keskiarvotarkasteluiden avulla tarkasteltiin, miten ikävaiheet erosivat toisistaan ja minkä tavuparityyppien osalta eroavaisuutta oli havaittavissa.

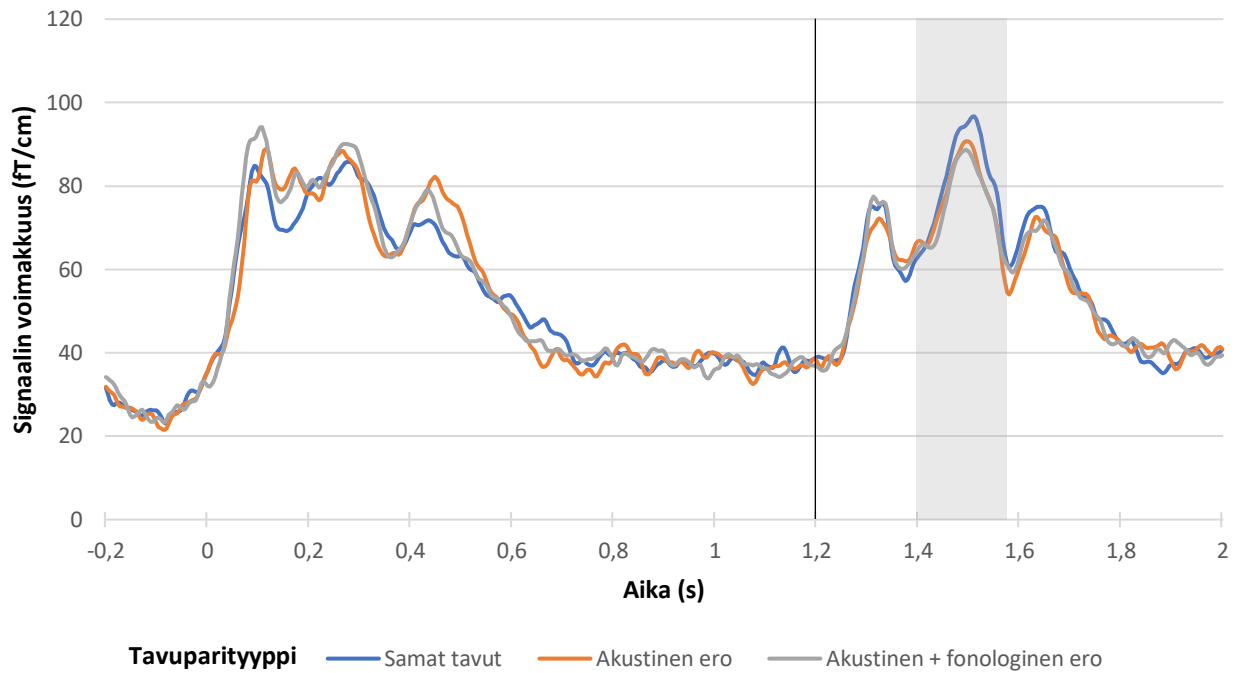
Tilastolliset analyysit suoritettiin IBM SPSS Statistics 28.0 -ohjelmalla. Ennen analyysien toteuttamista selitettävien muuttujien normaalisuutta tarkasteltiin graafisesti tutkimalla N250-vasteen voimakkuuksien keskiarvoista muodostettuja histogrammeja eri ikäryhmien osalta. Lasten ikäryhmissä N250-vasteen voimakkuus oli suhteellisen normaalisti jakautunut kaikkien tavuparityyppien osalta molemmissa aivopuoliskoissa. Aikuisten ikäryhmässä oli sen sijaan havaittavissa vinoutta eri tavuparityyppien osalta N250-vasteen voimakkuudessa vasemman aivopuoliskon osalta. Yhden aikuisen tutkittavan N250-vasteen voimakkuus vasemmassa aivopuoliskossa tavuparityyppien ”akustinen ero” sekä ”akustinen + fonologinen ero” osalta oli selkeästi poikkeava muihin tutkittaviin verrattuna, joten näiden arvot muokattiin lähemmäksi jakauman häntää. Mauchlyn testin perusteella kaikkien kolmen toistomittausten varianssianalyysin osalta sfäärisysoletus täyttyi, joten tulokset luettiin Tests of Within-Subjects Effects -taulukon riviltä Sphericity Assumed.

### **3. TULOKSET**

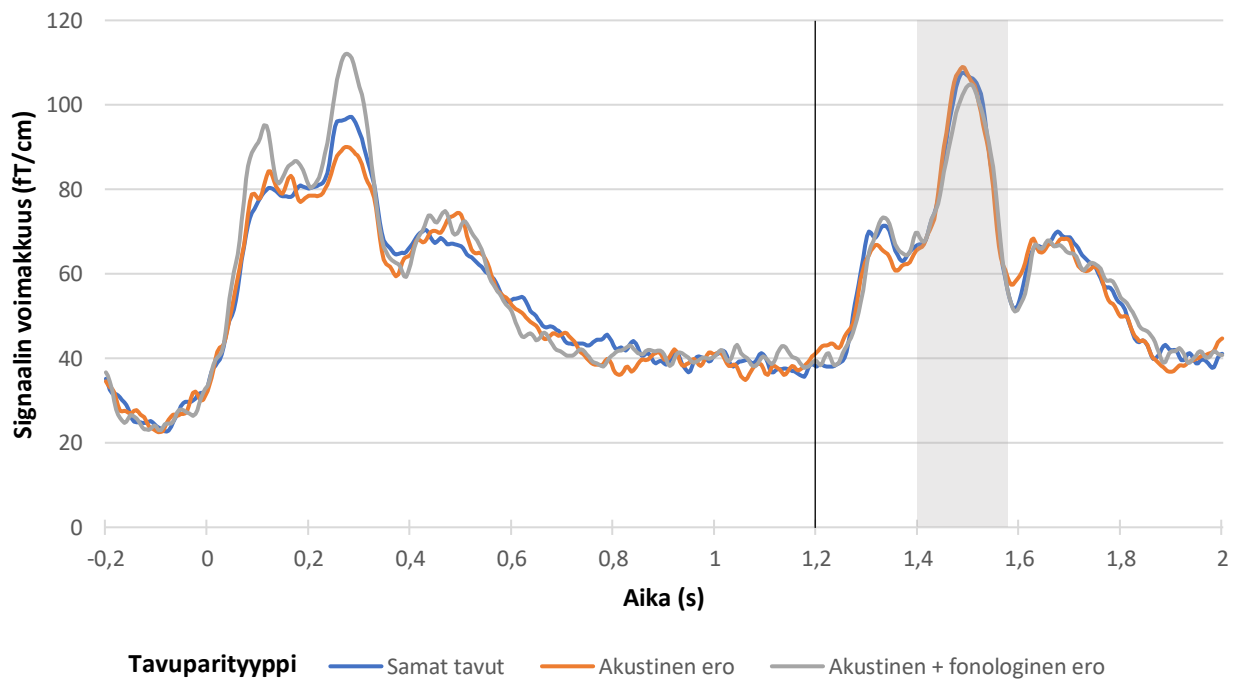
#### **3.1 Aktivaatiokuvion tarkastelu**

Aluksi tarkasteltiin kaikkien tutkittavien lasten yli muodostettuja ohimolohkojen kanavakeskiarvojen keskiarvokäyriä. Tässä tarkastelussa havaittiin, että kaikkien tavuparityyppien kohdalla sekä parin ensimmäinen että jälkimmäinen tavu aikaansaivat lapsilla selkeän N250-vasteen oikeassa ja vasemmassa aivopuoliskossa (ks. Kuvio 2). Koska tilastollisissa analyyseissä oltiin kiinnostuneita nimenomaan jälkimmäisen tavun aikaansaaman N250-vasteen voimakkuudesta, tarkasteltiin tämän jälkeen kanavakeskiarvojen ikäryhmittäin muodostettuja keskiarvokäyriä tavuparin jälkimmäisen tavun osalta (ks. Kuvio 3). Näitä keskiarvokäyriä graafisesti tarkastelemalla havaittiin, että kaikissa lasten ikäryhmissä (ryhmät A, B ja C) jälkimmäinen tavu aikaansai selkeän N250-vasteen niin vasemmassa kuin oikeassakin aivopuoliskossa kaikkien tavuparityyppien kohdalla. Aikuisilla (ryhmä D) ei sen sijaan ollut havaittavissa yhtä selkeää N250-vastetta minkään tavuparityypin osalta kummassakaan aivopuoliskossa.

a)

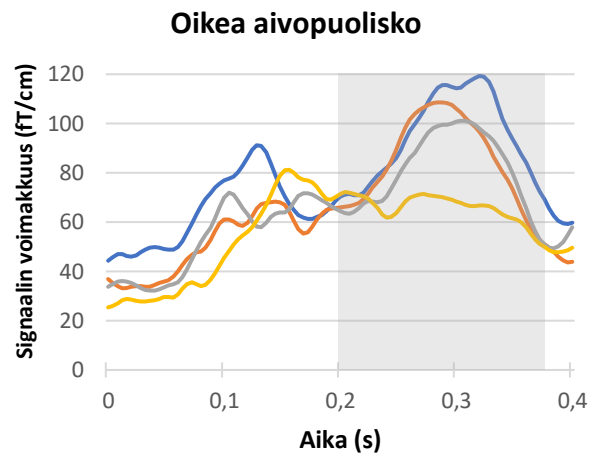
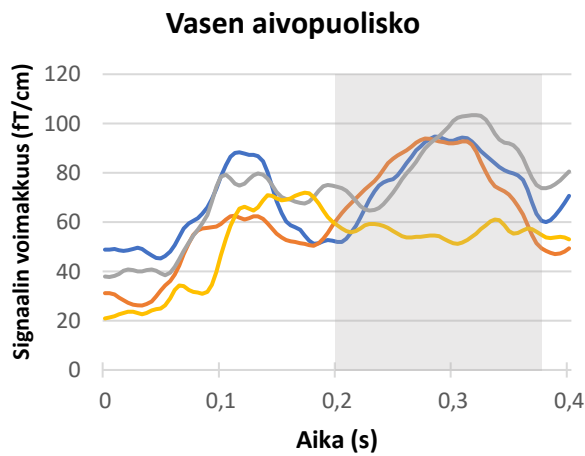


b)

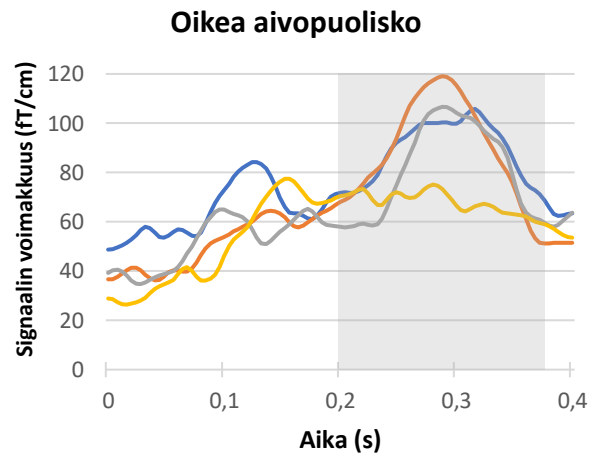
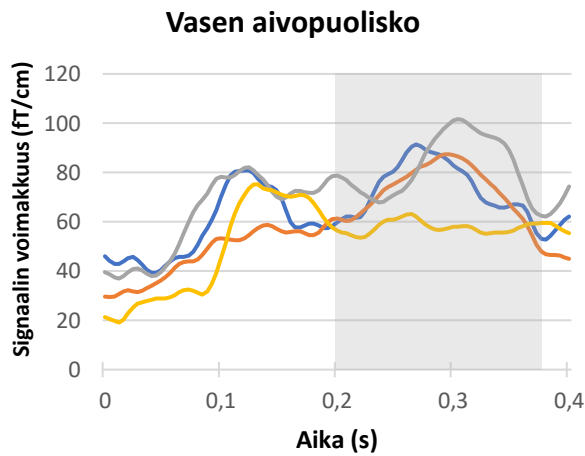


KUVIO 2. Kaikkien tutkittavien lasten yli muodostetut kuuloherätevästeiden keskiarvokäyrät eri tavuparityypeille vasemmassa (a) ja oikeassa (b) aivopuoliskossa. N250-vasteen aikaikkuna korostettu.

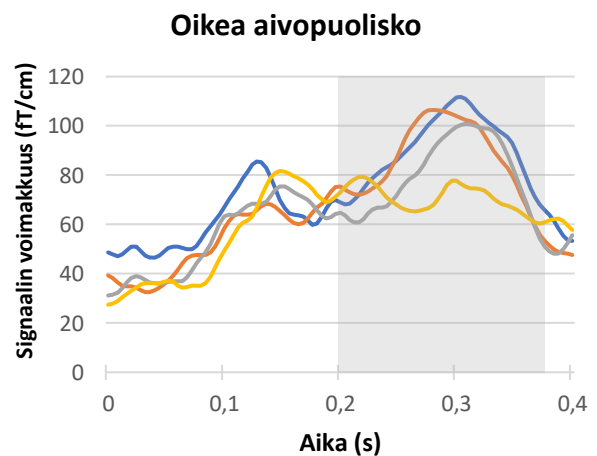
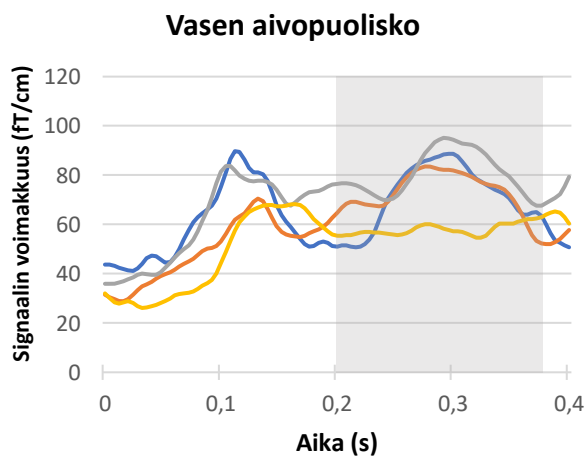
a)



b)



c)



Ikäryhmä — A — B — C — D

KUVIO 3. Kuuloherätevasteiden keskiarvokäyrät eri ikäryhmissä tavuparityyppien ”samat tavut” (a), ”akustinen ero” (b) ja ”akustinen + fonologinen ero” (c) jälkimmäisen tavun esittämisen mukaisesti vasemmassa ja oikeassa aivopuoliskossa. N250-vasteen aikaikkuna korostettu.

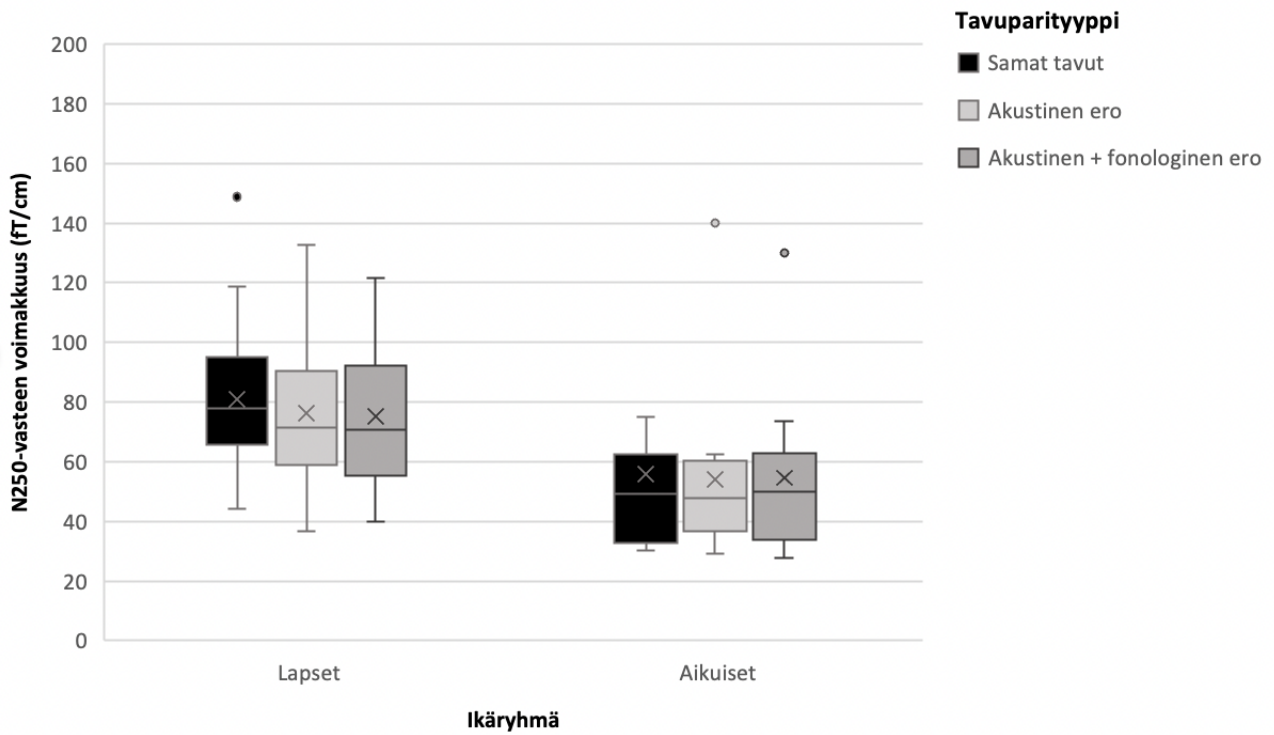
### 3.2 Fonologisten kategorioiden prosessointi lasten aivoissa

Tilastollisessa testauksessa tarkasteltiin aluksi sitä, eroaako N250-vasteen voimakkuus kuulluille tavuille lapsilla sen mukaan, edeltääkö tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu (ks. Kuvio 4). Toistomittausten varianssianalyyysissä havaittiin, että tavuparityypillä ja aivopuoliskolla ei ollut tilastollisesti merkitsevää kaksisuuntaista yhdysvaikutusta ( $F(2, 62) = 1.959$ ,  $p = .150$ ,  $\eta^2p = .059$ ), eli N250-vasteen voimakkuus ei muuttunut vasemmassa ja oikeassa aivopuoliskossa tilastollisesti merkitsevästi eri tavalla sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Tavuparityypillä ei myöskään havaittu tilastollisesti merkitsevää päävaikutusta ( $F(2, 62) = 2.419$ ,  $p = .097$ ,  $\eta^2p = .072$ ), eli N250-vasteen voimakkuus ei ollut tilastollisesti merkitsevästi erisuuruinen riippuen siitä, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. N250-vasteen voimakkuus ei myöskään eronnut tilastollisesti merkitsevästi eri aivopuoliskojen osalta ( $F(1, 31) = 2.249$ ,  $p = .144$ ,  $\eta^2p = .068$ ). N250-vasteen voimakkuuden keskiarvot ja keskihajonnat lapsilla eri tavuparityyppien osalta vasemmassa ja oikeassa aivopuoliskossa on esitetty Taulukossa 1.

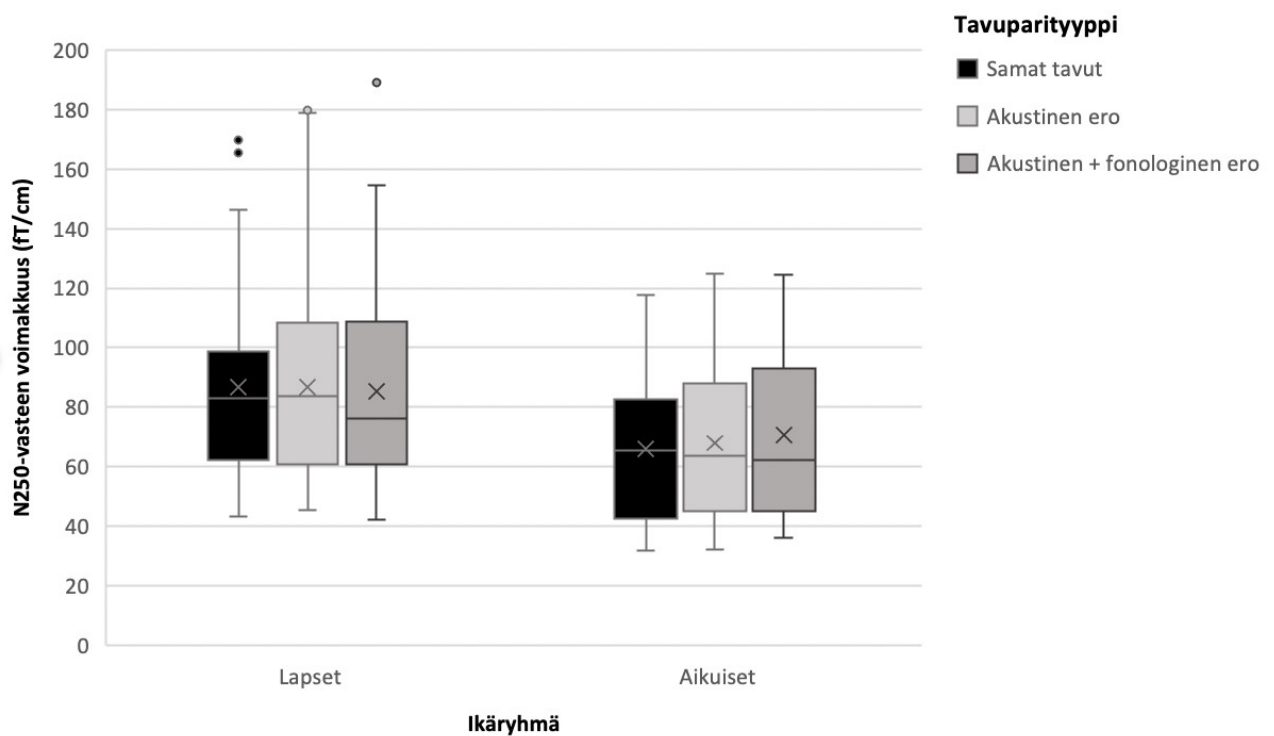
TAULUKKO 1. N250-vasteen voimakkuuden (fT/cm) keskiarvot (KA) ja keskihajonnat (KH) lapsilla ja aikuisilla eri tavuparityyppien jälkimmäisen tavun osalta vasemmassa ja oikeassa aivopuoliskossa.

	Samat tavut		Akustinen ero		Akustinen + fonologinen ero	
	<i>Vasen</i> (KA/KH)	<i>Oikea</i> (KA/KH)	<i>Vasen</i> (KA/KH)	<i>Oikea</i> (KA/KH)	<i>Vasen</i> (KA/KH)	<i>Oikea</i> (KA/KH)
Lapset ( $n = 32$ )	81.0/21.6	86.8/33.2	76.4/24.8	86.6/33.7	75.3/22.2	85.3/33.9
Aikuiset ( $n = 11$ )	56.0/34.4	65.8/26.8	54.2/30.7	67.9/27.8	54.6/28.8	70.7/28.6

a)



b)



KUVIO 4. N250-vasteen voimakkuus eri tavuparityyppien jälkimmäiselle tavulle lapsilla ja aikuisilla vasemmassa (a) ja oikeassa (b) aivopuoliskossa.



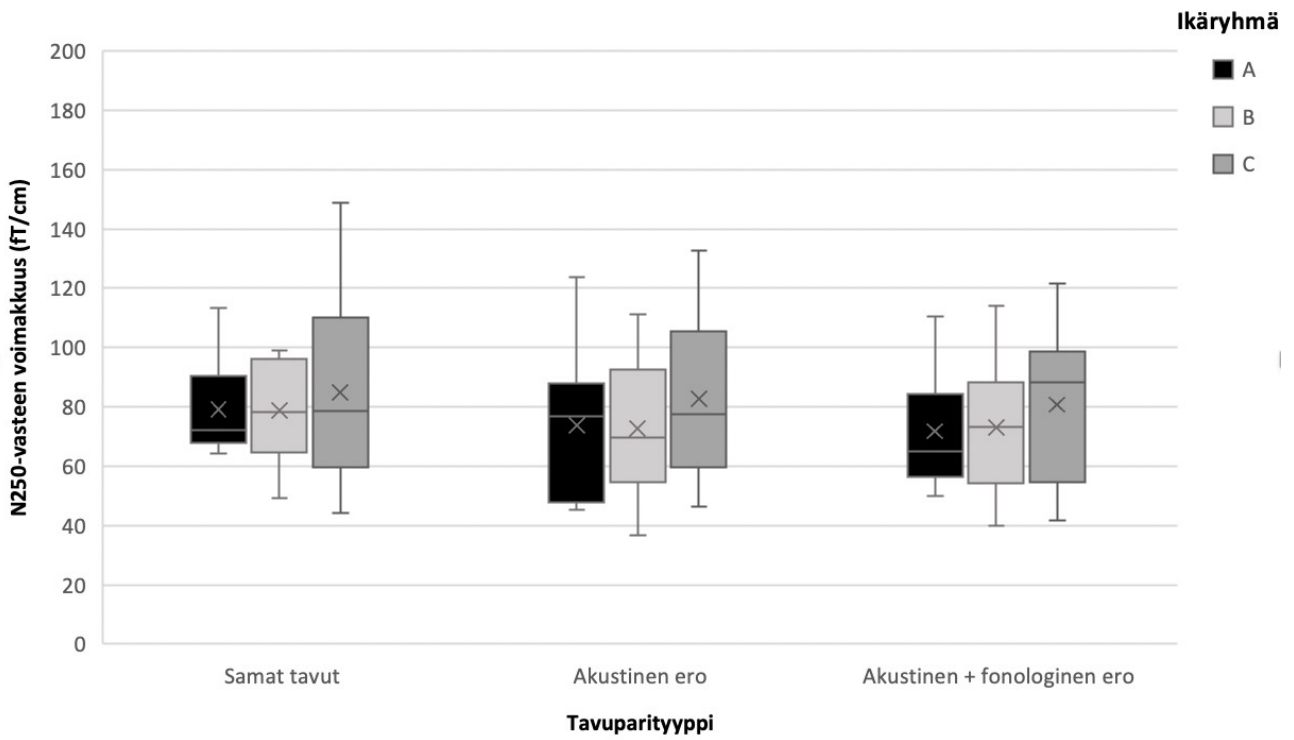
### 3.3 Lapsen iän vaikutus fonologisten kategorioiden prosessointiin

Kun toistomittausten varianssianalyysillä tarkasteltiin lapsen iän vaikutusta N250-vasteen voimakkuuteen eri tavuparityypeille lisäämällä yksilöidenväliseksi selittäväksi muuttujaksi lapsen ikäryhmä, havaittiin, että tavuparityypillä, aivopuoliskolla ja lapsen ikäryhmällä ei ollut merkitsevää kolmisuuntaista yhdysvaikutusta ( $F(4, 58) = .891, p = .475, \eta^2p = .058$ ). Eri ikäisillä lapsilla tavuparityypin ja aivopuoliskon yhdysvaikutus ei siis ollut tilastollisesti merkitsevästi erilainen. Lapsen ikäryhmällä ja tavuparityypillä ei myöskään ollut kaksisuuntaista yhdysvaikutusta ( $F(4, 58) = .496, p = .739, \eta^2p = .033$ ), eli N250-vasteen voimakkuus ei muuttunut eri ikäisillä lapsilla eri tavoin sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Myöskään tavuparityypin ja aivopuoliskon ( $F(2, 58) = 1.857, p = .165, \eta^2p = .060$ ) tai aivopuoliskon ja lapsen ikäryhmän ( $F(2, 29) = .914, p = .412, \eta^2p = .059$ ) osalta ei havaittu tilastollisesti merkitsevää kaksisuuntaista yhdysvaikutusta. Tavuparityypin ( $F(2, 58) = 2.452, p = .095, \eta^2p = .078$ ) tai aivopuoliskon ( $F(1, 29) = 2.355, p = .136, \eta^2p = .075$ ) päävaikutukset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä. Myöskään lapsen ikäryhmän päävaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevä ( $F(2, 29) = .023, p = .978, \eta^2p = .002$ ), eli N250-vasteen voimakkuus ei eronnut eri ikäisten lasten välillä. N250-vasteen voimakkuuden keskiarvot ja keskihajonnat eri tavuparityypeille lasten eri ikäryhmissä vasemman ja oikean aivopuoliskon osalta on esitetty Taulukossa 2, ja vasteen voimakkuutta eri ikäryhmissä on havainnollistettu Kuviossa 5.

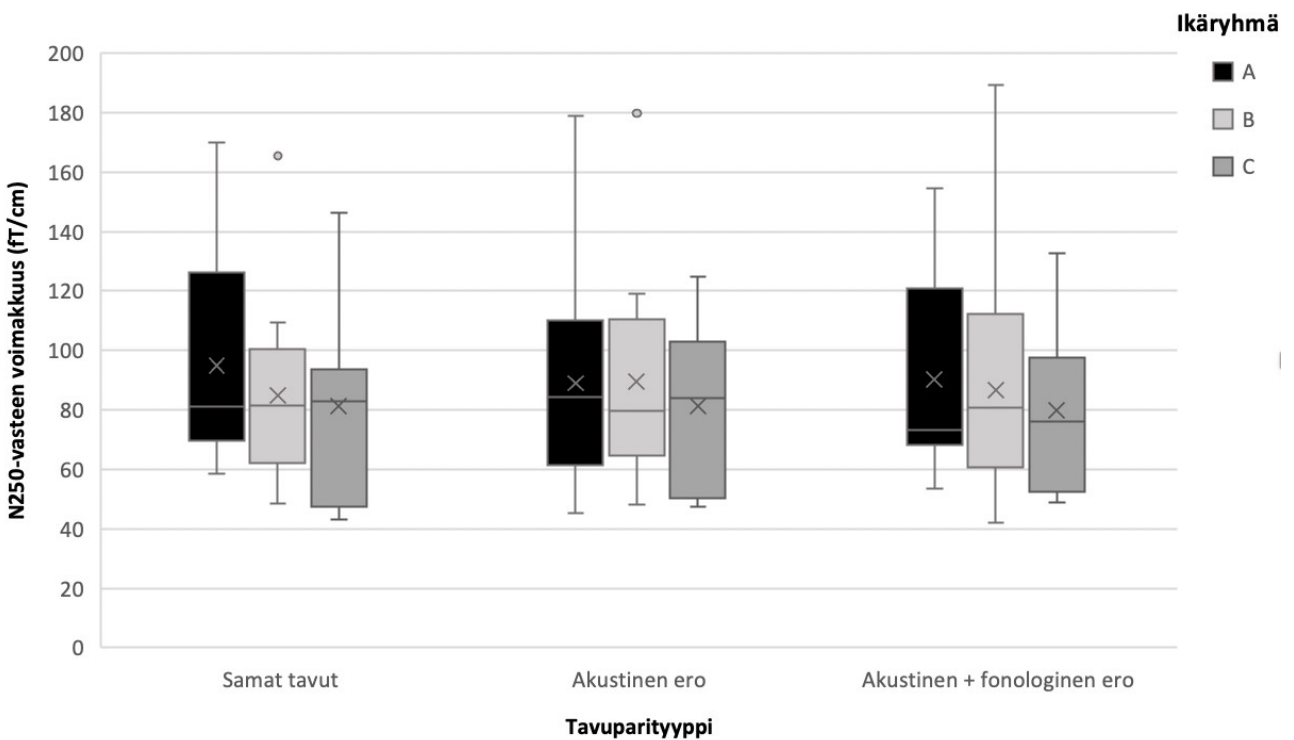
TAULUKKO 2. N250-voimakkuuden (fT/cm) keskiarvot (KA) ja keskihajonnat (KH) lasten eri ikäryhmissä eri tavuparityyppien jälkimmäisen tavun osalta vasemmassa ja oikeassa aivopuoliskossa.

	Samat tavut		Akustinen ero		Akustinen + fonologinen ero	
	<i>Vasen</i> (KA/KH)	<i>Oikea</i> (KA/KH)	<i>Vasen</i> (KA/KH)	<i>Oikea</i> (KA/KH)	<i>Vasen</i> (KA/KH)	<i>Oikea</i> (KA/KH)
Ryhmä A ( <i>n</i> = 10)	79.3/16.5	94.8/36.4	73.7/25.0	89.0/38.2	71.8/19.1	90.1/33.6
Ryhmä B ( <i>n</i> = 11)	78.8/15.9	84.9/32.2	72.7/22.7	89.6/36.9	73.1/21.4	86.5/41.5
Ryhmä C ( <i>n</i> = 11)	84.8/30.4	81.3/32.9	82.6/27.7	81.4/28.3	80.8/26.3	79.8/27.5

a)



b)



KUVIO 5. N250-vasteen voimakkuus eri tavuparityyppien jälkimmäiselle tavulle lasten eri ikäryhmissä vasemmassa (a) ja oikeassa (b) aivopuoliskossa.

### 3.4 Lasten ja aikuisten väliset erot fonologisten kategorioiden prosessoinnissa

Vertaamalla toistomittausten varianssianalyysillä aikuisten ja lasten N250-vasteiden voimakkuuksia eri tavuparityyppien osalta havaittiin, että tavuparityypillä, aivopuoliskolla ja sillä, oliko tutkittava aikuinen vai lapsi, ei ollut tilastollisesti merkitsevää kolmisuuntaista yhdysvaikutusta ( $F(2, 82) = .163, p = .850, \eta^2p = .004$ ). Tavuparityypin ja aivopuoliskon yhdysvaikutus ei siis ollut lapsilla tilastollisesti merkitsevästi erilainen aikuisiin verrattuna. Myöskään tavuparityypillä ja sillä, oliko tutkittava aikuinen vai lapsi, ei ollut tilastollisesti merkitsevää kaksisuuntaista yhdysvaikutusta ( $F(2, 82) = 1.599, p = .208, \eta^2p = .038$ ), eli N250-vasteen voimakkuus ei muuttunut lapsilla ja aikuisilla eri tavoin sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Kaksisuuntaista yhdysvaikutusta ei havaittu myöskään tavuparityypin ja aivopuoliskon ( $F(2, 82) = 2.748, p = .070, \eta^2p = .063$ ) tai aivopuoliskon ja ikävaiheen ( $F(1, 41) = .165, p = .686, \eta^2p = .004$ ) osalta. Tavuparityypillä ( $F(2, 82) = .323, p = .725, \eta^2p = .008$ ) ja aivopuoliskolla ( $F(1, 41) = 3.830, p = .057, \eta^2p = .085$ ) ei ollut tilastollisesti merkitseviä päävaikutuksia. Sen sijaan ikävaiheen päävaikutus oli tilastollisesti merkitsevä ( $F(1, 41) = 6.234, p = .017, \eta^2p = .132$ ), eli N250-vasteen voimakkuus oli lapsilla erisuuruinen kuin aikuisilla. Keskiarvoja tarkasteltaessa havaittiin, että N250-vaste oli lapsilla aikuisia voimakkaampi (ks. Taulukko 1 ja Kuvio 4).

## 4. POHDINTA

### 4.1 Kieliympäristön yhteydet fonologisen tiedon prosessointiin N250-vasteen osalta

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kieliympäristön roolia lasten aivojen fonologisen tiedon prosessoinnissa tarkastelemalla kieliympäristön pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden yhteyksiä kuulohäteasteisiin. Lisäksi tutkimuksessa haluttiin selvittää iän vaikutusta fonologisen tiedon prosessointiin aivoissa. Tarkastelun kohteena oli N250-kuulohäteaste. Tutkimuksessa havaittiin, että N250-vasteen voimakkuus ei eronnut englanninkielisillä lapsilla kummassakaan aivopuoliskossa sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Tämä ei tukenut hypoteesia siitä, että N250-vaste olisi lapsilla voimakkaampi silloin, kun kuultua tavua edeltää eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Lapsen iän ei myöskään havaittu

olevan yhteydessä tähän prosessointiin: N250-vasteen taso ei ollut lasten eri ikäryhmissä eri suuruinen eikä N250-vaste muuttunut eri ikäisillä lapsilla eri tavoin sen mukaan, kuuluiko kuultua tavua edeltävä tavu samaan vai eri fonologiseen kategoriaan. Tämä ei tukenut hypoteesia siitä, että N250-vaste olisi voimakkaimmillaan noin kymmenvuotiailla lapsilla ja että sen voimakkuus eroaisi vanhemmilla lapsilla nuorempia voimakkaammin sen mukaan, edeltäkö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. N250-vasteen havaittiin sen sijaan hypoteesioletuksen mukaisesti olevan lapsilla aikuisia voimakkaampi. N250-vaste ei kuitenkaan muuttunut aikuisilla lapsiin verrattuna eri tavoin sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Tämä ei tukenut hypoteesia siitä, että N250-vasteen voimakkuus eroaisi aikuisilla lapsia voimakkaammin sen mukaan, edeltäkö kuultua tavua saman vai eri fonologisen kategorian tavu.

Aikaisemmissa tutkimuksissa aivokuoren lyhytaikaisista muistijäljistä kertovan poikkeavuusnegatiivisuusvasteen on havaittu heijastavan natiivikielen piirteitä ja näiden pohjalta muodostuneita fonologisia kategorioita (Cheour ym., 1998; Garcia-Sierra ym., 2016; Rivera-Gaxiola ym., 2005). Tämän tutkimuksen ensimmäisen tutkimuskysymyksen tulokset viittaavat sen sijaan siihen, että lasten merkittävin obligatorinen tapahtumasidonnainen kuuloherätevaste, N250-vaste, ei ole herkkä kuvaamaan kieliympäristön ominaisuuksien pohjalta kehittyviä fonologisia kategorioita. Aikaisemmissa tutkimuksissa samansuuntaisia tuloksia on saatu aikuisten obligatoristen tapahtumasidonnaisten kuuloherätevasteiden osalta (Elangovan & Stuart, 2011; Hoonhorst ym., 2009; Sharma & Dorman, 2000). Esimerkiksi englanninkielisillä ja hindinkielisillä aikuisilla N1-vasteet kuulluille tavuille eivät eronneet, vaikka hindinkieliset mielsivät kyseessä olleet tavut eri fonologisiin kategorioihin kuuluviksi ja englanninkieliset puolestaan samaan fonologiseen kategoriaan kuuluviksi (Sharma & Dorman, 2000). Myöskään englannin- ja espanjankielisten aikuisten ei havaittu eroavan toisistaan P1, N1- ja P2-vasteiden osalta VOT-arvoltaan erilaisille ääniärsykkeille, vaikka kyseisissä kielissä kategoriarajat ovat eri kohdissa VOT-jatkumoa (Elangovan & Stuart, 2011). Tämän tutkimuksen tulosten sekä aikaisemman tutkimuksen valossa voikin olla mahdollista, etteivät aivojen tiedonkäsittelyketjusta kertovat obligatoriset tapahtumasidonnaiset kuuloherätevasteet muovaudu poikkeavuusnegatiivisuusvasteen tavoin vastaamaan kieliympäristön pohjalta muodostuvia fonologisia kategorioita, vaan ne heijastavat ennemmin esimerkiksi puheen akustisten piirteiden käsittelyä. N250-vasteen roolia akustisen tiedon käsittelyssä tukee myös aikaisempi tutkimustulos, jossa VOT-arvoltaan pitkät äänneet saivat lapsilla aikaan myöhäisemmän N250-vasteen (King ym., 2008).

Toisaalta on mahdollista, että ensimmäisen tutkimuskysymyksen tulosta selittävät myös tutkimusasetelmaan sekä N250-vasteen ominaisuuksiin liittyvät tekijät. Aikaisemmissa

tutkimuksissa N1-vasteen voimakkuuden on havaittu laskevan samanlaisia ääniärsykyitä toistettaessa (Fruhstorfer ym., 1970; Hari ym., 1982). N250-vasteen osalta tämänkaltaista suppressoitumista samaa ääniärsykettä toistettaessa ei kuitenkaan ole havaittu (Karhu ym., 1997). Sen sijaan N250-vasteen on havaittu jopa voimistuvan saman ärsykyteen toistuessa 1000 millisekunnin välein, mikä viittaa vasteen lähteenä olevien hermosolupopulaatioiden herkistymiseen (Karhu ym., 1997). Voikin olla mahdollista, että tässä tutkimuksessa käytetty 1200 millisekunnin viive kunkin tavuparin ensimmäisen ja toisen tavun esittämisen välillä on ollut liian lyhyt N250-vasteen palautumisen suhteen, eikä priming-efektiin perustuvalla koeasetelmalla siten ole saatu esiin kieliympäristön ja fonologisten kategorioiden mahdollisia vaikutuksia vasteen voimakkuuteen.

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen tulosta tulkittaessa on huomioitava myös se, että yksilölliset erot aivojen fonologisen tiedon prosessoinnissa lapsilla olivat tässä tutkimuksissa hyvin suuria (ks. Kuvio 4). Tämä voi osaltaan selittää sitä, miksei tilastollisissa testeissä havaittu merkitseviä tuloksia fonologisten kategorioiden yhteydestä N250-vasteeseen. Vaikka tavuparityypin päävaikutus ei lapsilla yltänytkaan merkitseväksi, oli kyseinen päävaikutus marginaalisesti merkitsevä ( $p = .095$ ). Tämä viittaa siihen, että N250-vasteen voimakkuudessa saattoi olla jonkinlaista eroavaisuutta sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu. Keskiarvojen perusteella kyseinen marginaalisesti merkitsevä tulos oli kuitenkin hypoteesioletuksen kanssa päinvastainen: N250-vasteen voimakkuus oli suuntaa antavasti alhaisemmalla tasolla silloin, kun kuultua tavua edelsi eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu kuin silloin, kun edeltävä tavu kuului samaan fonologiseen kategoriaan (joko sama tavu tai akustisesti eroava tavu) (ks. Taulukko 1). Tämä havainto voikin selittyä edellä kuvatulla N250-vasteen herkistymisellä samoja ääniärsykyitä toistettaessa.

Tutkimuskysymyksissä 2 ja 3 selvitettiin iän vaikutusta fonologisten kategorioiden prosessointiin N250-vasteen osalta. Lapsen iän ei havaittu olevan yhteydessä N250-vasteen voimakkuuteen, vaan vasteen voimakkuus oli samansuuruinen lasten kaikissa ikäryhmissä (tutkimuskysymys 2). Tämä tulos on ristiriidassa aikaisemman tutkimuksen kanssa siitä, että vasteen voimakkuus muuttuu lapsen iän myötä (ks. esim. Ponton ym., 2000). Eriävä tulos voi selittyä tähän tutkimukseen osallistuneiden lasten kapeahkolla ikähaarukalla (6–14.5 vuotta), jossa ikävaihtelu on mahdollisesti ollut liian pientä tuomaan esiin N250-vasteessa lapsen iän myötä tapahtuvia muutoksia. Aikaisemmassa tutkimuksessa, jossa lasten ikähaarukka oli suurin piirtein sama kuin tässä tutkimuksessa, ei lapsen iän havaittu olevan yhteydessä N250-vasteen voimakkuuteen (van Bijnen ym., 2022). N250-vasteen havaittiin kuitenkin tässä tutkimuksessa olevan lapsilla aikuisia voimakkaampi (tutkimuskysymys 3), mikä on linjassa aikaisempien tutkimustulosten kanssa (ks. esim. Čeponiene ym., 2002; Wunderlich ym., 2006).

Aikaisemmissa tutkimuksissa kuulonvaraisen havainnoinnin on havaittu kehittyvän natiivikielen piirteiden pohjalta vauvaiän jälkeen vielä myöhemmin lapsuudessa ja nuoruudessa (Burnham ym., 1991; Hazan & Barrett, 2000; Simon & Fourcin, 1978). Aikuisten on esimerkiksi havaittu luokittelevan fonologisia eroja lapsia johdonmukaisemmin ja 12-vuotiaiden taas 6-vuotiaita johdonmukaisemmin (Hazan & Barrett, 2000). Tämän kielispesifisen havaitsemisen kehityksen taustalla on esitetty olevan aivojen hermoverkkojen muovautuminen natiivikielen ominaisuuksien perusteella (Kuhl, 2004). Tässä tutkimuksessa lapsen iän ei kuitenkaan havaittu olevan yhteydessä siihen, miten aivot käsittelevät fonologista tietoa N250-vasteen muodossa (tutkimuskysymys 2). N250-vasteen voimakkuuden ei havaittu muuttuvan myöskään aikuisilla lapsiin verrattuna eri tavoin sen mukaan, edelsikö kuultua tavua samaan vai eri fonologiseen kategoriaan kuuluva tavu (tutkimuskysymys 3). Nämä tulokset eivät siten tue oletusta siitä, että N250-vaste heijastaisi edellä kuvattua puheen havaitsemisen kielispesifisyyden kehitystä aivotasolla. Tarkasteltaessa iän yhteyksiä fonologisen tiedon prosessointiin on kuitenkin erityisesti kolmannen tutkimuskysymyksen osalta huomioitava, että tässä tutkimuksessa tarkastelun kohteena ollut N250-vaste ei ole aikuisilla yhtä merkittävä kuuloherätevaste kuin lapsilla (Albrecht ym., 2000; Čeponiene ym., 2002; Ponton ym., 2000). Näin ollen on mahdollista, ettei kyseinen aikaikkuna ollut aikuisilla optimaalinen kieliympäristön ja aivojen fonologisen tiedon käsittelyn välisten yhteyksien tarkastelemiseen. Sitä on oltava varovainen tehtäessä tulosten perusteella johtopäätöksiä siitä, kuinka samankaltaista kategorioiden prosessointi lasten aivoissa on aikuisiin verrattuna.

Aivopuoliskojen väliset erot N250-vasteen voimakkuudessa eivät yltäneet tässä tutkimuksessa minkään tutkimuskysymyksen osalta merkitseviksi. Sekä aikuiset että lapset käsittäneen varianssianalyysin (tutkimuskysymys 3) kohdalla aivopuoliskojen väliset erot kuitenkin lähenivät merkitsevyyden rajaa aivopuoliskon päävaikutuksen ollessa marginaalisesti merkitsevä ( $p = .057$ ). Oikeassa aivopuoliskossa N250-vasteen voimakkuus vaikutti keskiarvoja tarkasteltaessa olevan hieman vasenta aivopuoliskoa korkeampaa (ks. Taulukko 1). Myös aikaisemmassa tutkimuksessa N250-aktiivisuuden on havaittu olevan sekä lapsilla että aikuisilla voimakkaampaa oikeassa aivopuoliskossa (Parviainen ym., 2019). Toisaalta tässä tutkimuksessa ainoastaan lasten aineistoa tarkastelleissa varianssianalyyseissä (tutkimuskysymykset 1 ja 2) aivopuoliskon päävaikutus ei ylittänyt marginaalisen merkitsevyyden raja-arvoa ( $p < 0.1$ ). Aikaisemmassa tutkimuksessa vasemman aivopuoliskon kuuloaivokuoren on esitetty kypsyvän oikeaa myöhemmin aikuistenkaltaisen N1-vasteen kehittyessä vasemmalla aivopuoliskossa oikeaa myöhemmällä iällä (Parviainen ym., 2019). Tämä voi selittää sitä, miksi aivopuoliskojen välinen ero ei yltänyt ainoastaan lasten aineistoa tarkasteltaessa marginaalisesti merkitseväksi. Tässä tutkimuksessa aivopuoliskojen välisten erojen tarkastelu ei kuitenkaan ollut keskiössä, eikä näiden erojen mahdollista merkitsevyyttä

siten tarkasteltu erikseen aikuisten osalta, joten aivopuoliskojen välisistä eroista fonologisen tiedon käsittelyn kehityksessä ei tämän tutkimuksen perusteella voida tehdä kovinkaan tarkkoja johtopäätöksiä.

Tutkimuksen tulosten perusteella ei siis voida varmuudella sanoa, mitä prosessoinnin tasoa N250-vaste lapsilla kuvaa. Tulosten valossa vaikuttaa kuitenkin siltä, että N250-vaste heijastaa fonologisen tiedon prosessoinnin sijaan kuulotiedon käsittelyn muita vaiheita esimerkiksi akustisen tiedon prosessoinnin muodossa. N250-vasteen on havaittu olevan lapsilla voimakkaampi puheäänteille kuin muille äänille, mikä viittaa siihen, että vaste heijastaa äänen piirteiden korkeamman tason prosessointia esimerkiksi akustisen informaation yhdistelemisen muodossa (Čeponienė ym., 2005). Mikäli N250-vaste ei tämän tutkimuksen tulosten mukaisesti heijasta äänteiden fonologisten piirteiden käsittelyä, on siis todennäköistä, että kyseisessä aikaikkunassa lasten aivot prosessoivat yksinkertaisten akustisten piirteiden sijaan jo äänen monimutkaisempia piirteitä. Toisaalta aikaisemmassa tutkimuksessa on havaittu, että puheen akustisia ja fonologisia piirteitä käsitellään aivoissa myös rinnakkaisesti (Winkler ym., 1999), joten akustisen tiedon käsittelyä voi siten olla haastava erottaa täysin fonologisten piirteiden käsittelystä. Tämän tutkimuksen tulokset viittaavat kuitenkin siihen, että samat äänet aiheuttavat samansuuruisen N250-vasteen riippumatta siitä, missä kontekstissa ne esitetään. Tätä tukee myös aikaisempi tutkimustulos, jossa kognitiivisen tehtävän tyypillä ei ollut vaikutusta N250-vasteen voimakkuuteen (van Bijnen ym. 2022).

Vaikka tässä tutkimuksessa N250-vaste ei heijastanut kieliympäristön pohjalta muodostuneita fonologisia kategorioita, voi olla mahdollista, että eri natiivikielten edustajat eroavat toisistaan N250-vasteen osalta esimerkiksi kuultujen tavujen akustisten piirteiden prosessoinnissa. Aikaisemmassa tutkimuksessa kieliympäristön on esimerkiksi havaittu vaikuttavan jopa yksinkertaisten siniäänien käsittelyyn aivoissa saksan- ja suomenkielisten miesten kuuloherätevasteiden poiketessa toisistaan näiden äänien osalta (Salmelin ym., 1999). Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan vertailtu äidinkieleltään erikielisiä lapsia tai aikuisia, joten tutkimuksen perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä siitä, onko N250-vaste mahdollisesti muovautunut nimenomaan englanninkielisen ympäristön perusteella käsittelemään esimerkiksi tavujen akustisia ominaisuuksia.

N250-vasteella on aikaisemmin esitetty olevan merkittävä rooli kuulonvaraisten, kuten kielen vastaanottamiseen liittyvien, taitojen kehityksessä (Čeponienė ym., 2005). Tässä tutkimuksessa N250-vasteen roolia fonologisen tiedon käsittelyssä ei kuitenkaan verrattu suoriutumiseen fonologisen prosessoinnin tehtävissä. Siten tämän tutkimusten tulosten perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä vasteen merkityksestä fonologisten taitojen kehityksen kannalta. Tutkimuksen tulos tukee kuitenkin edellä kuvatusti aikaisempia tutkimustuloksia siitä, että N250-vaste heikkenee



merkittävästi lapsuudesta aikuisuuteen (Čeponiene ym., 2002; Wunderlich ym., 2006), mikä viittaa siihen, että vasteella on kuulonvaraisten taitojen kannalta merkitystä nimenomaan lapsuudessa aivojen muovautuessa. Aikaisemmassa tutkimuksessa N250-aktivaation on havaittu selittävän lapsilla suoriutumista esimerkiksi lukunopeutta, inhibitiota ja fonologista prosessointia mittaavissa tehtävissä (Parviainen ym., 2011; van Bijnen ym., 2019; van Bijnen ym., 2022), ja vasteen on esitetty heijastavan lapsilla neuraalisten resurssien joustavan käytön mahdollistavia prosesseja (van Bijnen ym., 2022). N250-vasteen voidaankin tässä tutkimuksessa lapsuudesta aikuisuuteen havaittujen muutosten sekä aikaisemman tutkimuksen valossa esittää heijastavan kuuloaivokuoren plastisuuden tasoa. Koska N250-vaste havaittiin tässä tutkimuksessa aikaisempien tutkimusten tavoin selkeästi nuoruusiässäkin, vaikuttaa siltä, että kuuloaivokuori muovautuu vielä pitkälle toisenkin elinvuosikymmenennen aikana.

#### **4.2 Tutkimuksen vahvuudet, heikkoudet sekä jatkotutkimusmahdollisuudet**

Tutkimuksen ansiona oli sen uutuusarvo, sillä aikaisemmissa tutkimuksissa ei tiedettävästi oltu tarkasteltu kieliympäristön pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden yhteyksiä nimenomaan N250-vasteeseen normaalin kuulon omaavilla kouluikäisillä lapsilla. Vahvuutena oli myös MEG:llä mitattu aineisto, sillä aikaisempi tutkimus kuulojärjestelmän kehityksen ja N250-vasteen osalta on keskittynyt paljolti EEG-mittauksiin. MEG:n etuna on sen parempi paikallinen tarkkuus EEG:hen verrattuna (Hämäläinen, 1992). Tutkimuksen vahvuutena voidaan pitää myös sitä, että ääniärsykkeiden akustisten ominaisuuksien mahdollinen vaikutus N250-vasteen voimakkuuteen kontrolloitiin tutkimuksessa vertailemalla kuuloherätevasteita tavuparin jälkimmäisen tavun osalta. Kyseinen tavu oli kaikissa tavuparityypeissä sama, joten tämän tavun akustiset ominaisuudet eivät eronneet eri tavuparityyppien välillä. Eri tavuparityyppien väliset akustiset erot oli kontrolloitu myös sen osalta, että akustisen eroavaisuuden suuruus tavuparin kahden tavun välillä oli sama sekä fonologisen ja akustisen eron että pelkän akustisen eron omaavassa tavuparissa.

Tutkimusasetelma asetti toisaalta myös rajoituksia tulosten tulkinnalle. Tutkimusasetelmassa käytetty priming-efekti perustuu havaintoon vähentyneestä neuraalisesta aktivaatiosta saman ärsykkeen toistuessa (Grill-Spector ym., 2006). N250-vasteen on kuitenkin edellä kuvatusti havaittu aikaisemmissa tutkimuksissa jopa voimistuvan saman ärsykkeen toistuessa (Karhu ym., 1997). Siten voi olla mahdollista, että priming-efektiin perustuva koeasetelma on peittänyt alleen fonologisten kategorioiden mahdollisia vaikutuksia N250-vasteen voimakkuuteen, mikä voi heikentää

tutkimuksen tulosten luotettavuutta. Tutkimuksen heikkoutena oli myös sen pieni otoskoko, mikä voi sekä heikentää tutkimuksen tulosten yleistettävyyttä että vaikuttaa tilastollisten testien herkkyyteen. Lisäksi tutkimuksen rajoituksena oli se, että vaikka kaikkien tutkittavien äidinkieli oli englanti, osalla tutkittavista oli arkielämässään säännöllistä altistusta myös muille kielille. Koska eri kielissä ääniärsykkeiden kategoriarajat sijaitsevat eri kohdissa VOT-jatkumoa (Oron ym., 2019; Sharma & Dorman, 2000), on mahdollista, että säännöllinen altistus muille kielille on muovannut osalla tutkittavista fonologisten kategorioiden muodostumista eri tavoin kuin ainoastaan englanninkielinen kieliympäristö.

Tutkimuksen rajoituksena oli lisäksi valitun aikaikkunan (N250) mahdollinen heikko soveltuvuus aikuisten ikäryhmän osalta. Tässä tutkimuksessa sekä aikuisilla että lapsilla tarkasteltiin samaa aikaikkunaa, vaikka aikuisten ja lasten kortikaaliset kuuloherätevasteet ilmenevätkin hyvin eriaikaisesti (Albrecht ym., 2000; Čeponiene ym., 2002; Ponton ym., 2000). Saman aikaikkunan sijaan toisena vaihtoehtona olisi ollut tarkastella samankaltaiset spatiaaliset ominaisuudet omaavia kuuloherätevasteita (Parviainen ym., 2019), mutta tässä tutkimuksessa MEG-datalle ei tehty lähdemallinnusta, joka olisi mahdollistanut tämänkaltaisen vertailun. Koska N250-vaste ei ole aikuisilla yhtä merkittävä kuuloherätevaste kuin lapsilla, voi olla, että tutkimusasetelmalla ei sen vuoksi saatu esiin mahdollista eroavaisuutta aikuisten ja lasten fonologisten kategorioiden käsittelyssä aivotasolla.

Jatkossa tutkimusta olisi syytä kohdistaa englanninkielisten lasten lisäksi myös muunkielisiin lapsiin. Tämä mahdollistaisi eri kielijärjestelmien vertailun keskenään, jolloin esimerkiksi N250-vasteen herkistymiseen liittyvät rajoitteet olisi helpompi kontrolloida. Erikielisiä lapsia vertailemalla olisi mahdollista tutkia myös kieliympäristön mahdollisia vaikutuksia äänen akustisten piirteiden käsittelyyn. Aikaisemmissa tutkimuksissa eri natiivikieliä edustavien aikuisten on havaittu poikkeavan toisistaan jopa yksinkertaisten siniäänien aivotason prosessoinnin suhteen (Salmelin ym., 1999). Tutkimuksissa olisi mielekästä tarkastella myös kieliympäristön mahdollisia vaikutuksia aivopuoliskojen välisiin eroihin, sillä aikaisemmassa tutkimuksessa eri äidinkieliä edustaneiden aikuisten on havaittu poikkeavan toisistaan kuulotiedon käsittelyssä nimenomaan vasemman aivopuoliskon osalta (Salmelin ym., 1999). Myös tämä tutkimus antoi marginaalisesti merkitsevän tuloksen muodossa viitettä aivopuoliskojen mahdollisista eroista puheäänien prosessoinnissa N250-vasteen voimakkuuden osalta. Jatkotutkimuksessa olisi lisäksi mielekästä toteuttaa MEG-dataan liittyvä lähdemallinnus, joka mahdollistaisi edellä kuvatusti lasten ja aikuisten välisten eroavaisuuksien tarkemman selvittämisen. Toisaalta tutkimusta tulisi suunnata lapsilla N250-vasteen lisäksi myös muiden aikaikkunoiden merkitykseen fonologisten kategorioiden käsittelyssä, sillä aikaisempaa tutkimusta aiheesta on lapsilla pääasiassa poikkeavuusnegatiivisuusvasteen osalta.

### 4.3 Johtopäätökset

Tämä tutkimus toi alustavaa tietoa kieliympäristön yhteydestä fonologisen tiedon käsittelyyn aivoissa N250-vasteen osalta. Kieliympäristön ja kuuloherätevasteiden välisten yhteyksien tutkiminen on merkityksellistä sen vuoksi, että aivokuoren plastisuus mahdollistaa fonologisen prosessoinnin kehityksen ja kielen oppimisen (Zhang & Wang, 2007). Fonologinen prosessointi puolestaan on tärkeässä roolissa muun muassa lukutaidon kehityksessä (Anthony & Francis, 2005; Melby-Lervåg ym., 2012). Tässä tutkimuksessa kieliympäristön ominaisuuksien pohjalta muodostuneiden fonologisten kategorioiden ei havaittu olevan yhteydessä aivojen kuulotiedon prosessointiin N250-vasteen osalta. Tulosten valossa vaikuttaakin siltä, että N250-vaste heijastaa fonologisen tiedon käsittelyn sijaan aivokuoren reaktiivisuutta äänille ja samat äänet aiheuttavat samanlaisen N250-vasteen riippumatta kontekstista, jossa ne esitetään. Aikaisempaan tutkimukseen verrattuna vaikuttaa myös siltä, että kieliympäristön mahdolliset vaikutukset aivojen tiedonkäsittelyketjusta kertoviin obligatorisiin kuuloherätevasteisiin ovat erilaisia kuin aivokuoren lyhytaikaisista muistijäljistä kertovaan poikkeavuusnegatiivisuusvasteeseen. N250-vaste on kuitenkin tämän ja aikaisemman tutkimuksen valossa merkittävä herätevaste nimenomaan lasten kuulotiedon käsittelyssä, ja jatkossa siihen kohdistuva tutkimus voikin tuoda lisäymmärrystä aivojen herkkyykskausista esimerkiksi kielen oppimisen suhteen.

## LÄHTEET

- Albrecht, R., Suchodoletz, W., & Uwer, R. (2000). The development of auditory evoked dipole source activity from childhood to adulthood. *Clinical Neurophysiology*, *111*(12), 2268–2276.
- American Psychological Association. (2009). *APA concise dictionary of psychology*. American Psychological Association.
- Anthony, J., & Francis, D. (2005). Development of Phonological Awareness. *Current Directions in Psychological Science*, *14*, 255–259.
- Anthony, J., Lonigan, C., Driscoll, K., Phillips, B., & Burgess, S. (2003). Phonological sensitivity: A quasi-parallel progression of word structure units and cognitive operations. *Reading Research Quarterly*, *38*(4), 470–487.
- Barbour, D. (2009). Auditory Cortex Structure and Circuitry. Teoksessa L. R. Squire (toim.), *Encyclopedia of Neuroscience* (s. 701–707). Oxford: Academic Press.
- Barron, H. C. (2021). Neural inhibition for continual learning and memory. *Neurobiology of Learning and Plasticity*, *67*, 85–94.
- Bonte, M., Parviainen, T., Hytönen, K., & Salmelin, R. (2006). Time Course of Top-down and Bottom-up Influences on Syllable Processing in the Auditory Cortex. *Cerebral Cortex*, *16*(1), 115–123.
- Buonomano, D. V., & Merzenich, M. M. (1998). Cortical plasticity: From Synapses to Maps. *Annual Review of Neuroscience*, *21*(1), 149–186.
- Burnham, D. K., Earnshaw, L. J., & Clark, J. E. (1991). Development of categorical identification of native and non-native bilabial stops: Infants, children and adults. *Journal of Child Language*, *18*(2), 231–260.
- Čeponienė, R., Alku, P., Westerfield, M., Torki, M., & Townsend, J. (2005). ERPs differentiate syllable and nonphonetic sound processing in children and adults. *Psychophysiology*, *42*(4), 391–406.
- Čeponienė, R., Rinne, T., & Näätänen, R. (2002). Maturation of cortical sound processing as indexed by event-related potentials. *Clinical Neurophysiology*, *113*(6), 870–882.
- Cheour, M., Čeponienė, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K., & Näätänen, R. (1998). Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature Neuroscience*, *1*, 351–353.
- Chobert, J., François, C., Velay, J.-L., & Besson, M. (2012). Twelve Months of Active Musical Training in 8- to 10-Year-Old Children Enhances the Preattentive Processing of Syllabic Duration and Voice Onset Time. *Cerebral Cortex*, *24*(4), 956–967.
- Eimas, P. D., Siqueland, E. R., Jusczyk, P., & Vigorito, J. (1971). Speech Perception in Infants. *Science*, *171*(3968), 303–306.
- Elangovan, S., & Stuart, A. (2011). A cross-linguistic examination of cortical auditory evoked potentials for a categorical voicing contrast. *Neuroscience Letters*, *490*(2), 140–144.

- Forster, K. I., & Davis, C. (1984). Repetition priming and frequency attenuation in lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *10*, 680–698.
- Friederici, A. D., & Brauer, J. (2019). Neural basis of language acquisition. Teoksessa J. S. Horst & J. von Koss Torkildsen (toim.), *International handbook of language acquisition* (s. 20–32). Lontoo: Routledge.
- Friederici, A. D., & Wessels, J. M. I. (1993). Phonotactic knowledge of word boundaries and its use in infant speech perception. *Perception & Psychophysics*, *54*(3), 287–295.
- Fruhstorfer, H., Soveri, P., & Järvillehto, T. (1970). Short-term habituation of the auditory evoked response in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *28*(2), 153–161.
- Fujimura, O., & Erickson, D. (1997). Acoustic phonetics. Teoksessa W. J. Hardcastle & J. Laver (toim.), *The handbook of phonetic sciences* (s. 65–115). Oxford: Blackwell.
- Garcia-Sierra, A., Ramírez-Esparza, N., & Kuhl, P. K. (2016). Relationships between quantity of language input and brain responses in bilingual and monolingual infants. *International Journal of Psychophysiology*, *110*, 1–17.
- Goldstone, R. L., & Hendrickson, A. T. (2010). Categorical perception. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, *1*(1), 69–78.
- Grill-Spector, K., Henson, R. N. A., & Martin, A. (2006). Repetition and the brain: Neural models of stimulus-specific effects. *Trends in Cognitive Sciences*, *10*, 14–23.
- Hari, R. (1990). The neuromagnetic method in the study of the human auditory cortex. Teoksessa F. Grandori, M. Hoke, & G. L. Romani (toim.), *Auditory Evoked Magnetic Fields and Potentials* (s. 222–282). Basel: Karger.
- Hari, R., Aittoniemi, K., Järvinen, M.-L., Katila, T., & Varpula, T. (1980). Auditory evoked transient and sustained magnetic fields of the human brain localization of neural generators. *Experimental Brain Research*, *40*(2), 237–240.
- Hari, R., Kaila, K., Katila, T., Tuomisto, T., & Varpula, T. (1982). Interstimulus interval dependence of the auditory vertex response and its magnetic counterpart: Implications for their neural generation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *54*(5), 561–569.
- Hari, R., Parkkonen, L., & Nangini, C. (2010). The brain in time: Insights from neuromagnetic recordings. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1191*, 89–109.
- Hari, R., & Puce, A. (2017). *MEG-EEG Primer*. New York, NY: Oxford University Press.
- Harley, T. A. (2008). *The psychology of language: From data to theory* (3. painos). Hove: Psychology Press.
- Hauser, I. (2019). *Effects of phonological contrast on within-category phonetic variation* (väitöskirja, University of Massachusetts Amherst).
- Hazan, V., & Barrett, S. (2000). The development of phonemic categorization in children aged 6–12. *Journal of Phonetics*, *28*(4), 377–396.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behavior; a neuropsychological theory*. Oxford: Wiley.

- Heinilä, E., & Parviainen, T. (2022). Meggie – easy-to-use graphical user interface for M/EEG analysis based on MNE-python. *bioRxiv*.
- Hoonhorst, I., Serniclaes, W., Collet, G., Colin, C., Markessis, E., Radeau, M., & Deltenre, P. (2009). N1b and Na subcomponents of the N100 long latency auditory evoked-potential: Neurophysiological correlates of voicing in French-speaking subjects. *Clinical Neurophysiology*, *120*(5), 897–903.
- Hyvärinen, A., & Oja, E. (2000). Independent component analysis: Algorithms and applications. *Neural Networks*, *13*(4–5), 411–430.
- Hämäläinen, M. (1992). Magnetoencephalography: A tool for functional brain imaging. *Brain Topography*, *5*(2), 95–102.
- Hämäläinen, M., Hari, R., Ilmoniemi, R. J., Knuutila, J., & Lounasmaa, O. V. (1993). Magnetoencephalography – Theory, instrumentation, and applications to noninvasive studies of the working human brain. *Reviews of Modern Physics*, *65*(2), 413–497.
- Iverson, P., & Kuhl, P. K. (1995). Mapping the perceptual magnet effect for speech using signal detection theory and multidimensional scaling. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *97*(1), 553–562.
- Jusczyk, P. W. (1997). *The discovery of spoken language*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Jusczyk, P. W., & Luce, P. A. (2002). Speech Perception and Spoken Word Recognition: Past and Present. *Ear and Hearing*, *23*(1), 2–40.
- Jusczyk, P. W., Luce, P. A., & Charles-Luce, J. (1994). Infants' Sensitivity to Phonotactic Patterns in the Native Language. *Journal of Memory and Language*, *33*(5), 630–645.
- Karhu, J., Herrgård, E., Pääkkönen, A., Luoma, L., Airaksinen, E., & Partanen, J. (1997). Dual cerebral processing of elementary auditory input in children. *NeuroReport*, *8*(6), 1327–1330.
- Kelley, H. M., & Lambert, M. C. (2011). Phonological Development. Teoksessa S. Goldstein & J. A. Naglieri (toim.), *Encyclopedia of Child Behavior and Development* (s. 1094–1095). Boston, Massachusetts: Springer US.
- King, K. A., Campbell, J., Sharma, A., Martin, K., Dorman, M., & Langran, J. (2008). The representation of voice onset time in the cortical auditory evoked potentials of young children. *Clinical Neurophysiology*, *119*(12), 2855–2861.
- Kong, E. J., & Edwards, J. (2016). Individual differences in categorical perception of speech: Cue weighting and executive function. *Journal of Phonetics*, *59*, 40–57.
- Kral, A., Hartmann, R., Tillein, J., Heid, S., & Klinke, R. (2001). Delayed Maturation and Sensitive Periods in the Auditory Cortex. *Audiology and Neurotology*, *6*, 346–362.
- Kuhl, P. K. (1991). Human adults and human infants show a “perceptual magnet effect” for the prototypes of speech categories, monkeys do not. *Perception & Psychophysics*, *50*, 93–107.
- Kuhl, P. K. (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nature Reviews Neuroscience*, *5*(11), 831–843.

- Kuhl, P. K., Stevens, E., Hayashi, A., Deguchi, T., Kiritani, S., & Iverson, P. (2006). Infants show a facilitation effect for native language phonetic perception between 6 and 12 months. *Developmental Science*, *9*(2), F13–F21.
- Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Stevens, K. N., & Lindblom, B. (1992). Linguistic Experience Alters Phonetic Perception in Infants by 6 Months of Age. *Science*, *255*(5044), 606–608.
- Kushnerenko, E., Čeponienė, R., Balan, P., Fellman, V., Huotilainen, M., & Näätänen, R. (2002). Maturation of the auditory event-related potentials during the first year of life. *NeuroReport*, *13*, 47–51.
- Liberman, A. M., Cooper, F. S., Shankweiler, D., & Studdert-Kennedy, M. (1967). Perception of the Speech Code. *Psychological Review*, *74*, 431–461.
- Liberman, A. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, *54*, 358–368.
- Lisker, L., & Abramson, A. S. (1964). A Cross-Language Study of Voicing in Initial Stops: Acoustical Measurements. *Word*, *20*(3), 384–422.
- Luck, S. J. (2014). *An introduction to the event-related potential technique* (2. painos). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- McFayden, T. C., Baskin, P., Stephens, J. D. W., & He, S. (2020). Cortical Auditory Event-Related Potentials and Categorical Perception of Voice Onset Time in Children with an Auditory Neuropathy Spectrum Disorder. *Frontiers in Human Neuroscience*, *14*.
- Melby-Lervåg, M., Lyster, S.-A. H., & Hulme, C. (2012). Phonological skills and their role in learning to read: A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, *138*(2), 322–352.
- Miller, G. A., & Taylor, W. G. (1948). The perception of repeated bursts of noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, *20*, 171–182.
- Molfese, D. L. (1978). Neuroelectrical correlates of categorical speech perception in adults. *Brain and Language*, *5*(1), 25–35.
- Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale, New Jersey: Erlbaum.
- Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., Huotilainen, M., Iivonen, A., Vainio, M., Alku, P., Ilmoniemi, R. J., Luuk, A., Allik, J., Sinkkonen, J., & Alho, K. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, *385*, 432–434.
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology*, *118*(12), 2544–2590.
- Ohala, J. J. (1993). Coarticulation and Phonology. *Language and Speech*, *36*(2–3), 155–170.
- Oron, A., Szlag, E., Nowak, K., Dacewicz, A., & Szymaszek, A. (2019). Age-related differences in Voice-Onset-Time in Polish language users: An ERP study. *Acta Psychologica*, *193*, 18–29.
- Parviainen, T. (2007). *Cortical correlates of language perception: Neuromagnetic studies in adults and children* (väitöskirja: Jyväskylän yliopisto).

- Parviainen, T., Helenius, P., Poskiparta, E., Niemi, P., & Salmelin, R. (2011). Speech perception in the child brain: Cortical timing and its relevance to literacy acquisition. *Human Brain Mapping, 32*(12), 2193–2206.
- Parviainen, T., Helenius, P., & Salmelin, R. (2019). Children show hemispheric differences in the basic auditory response properties. *Human Brain Mapping, 40*, 2699–2710.
- Ponton, C., Eggermont, J., Kwong, B., & Don, M. (2000). Maturation of human central auditory system activity: Evidence from multi-channel evoked potentials. *Clinical neurophysiology, 111*(2), 220–236.
- Rauschecker, J. P. (1999). Auditory cortical plasticity: A comparison with other sensory systems. *Trends in Neurosciences, 22*(2), 74–80.
- Rivera-Gaxiola, M., Silva-Pereyra, J., & Kuhl, P. K. (2005). Brain potentials to native and non-native speech contrasts in 7- and 11-month-old American infants. *Developmental Science, 8*(2), 162–172.
- Saffran, J. R., & Graf Estes, K. (2006). Mapping sound to meaning: Connections between learning about sounds and learning about words. Teoksessa R. V. Kail (toim.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vsk. 34, s. 1–38). JAI.
- Salmelin, R., Schnitzler, A., Parkkonen, L., Biermann, K., Helenius, P., Kiviniemi, K., Kuukka, K., Schmitz, F., & Freund, H.-J. (1999). Native language, gender, and functional organization of the auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 96*(18), 10460–10465.
- Shamma, S. A., & Fritz, J. B. (2009). Auditory Cortex: Models. Teoksessa L. R. Squire (toim.), *Encyclopedia of Neuroscience* (s. 709–714). Oxford: Academic Press.
- Sharma, A., & Dorman, M. (2000). Neurophysiologic correlates of cross-language phonetic perception. *The Journal of the Acoustical Society of America, 107*, 2697–2703.
- Sharma, A., & Dorman, M. F. (1999). Cortical auditory evoked potential correlates of categorical perception of voice-onset time. *Journal of the Acoustical Society of America, 106*, 1078–1083.
- Sharma, A., Dorman, M., & Spahr, T. (2002). A sensitive period for the development of the central auditory system in children with cochlear implants: Implications of age of implantation. *Ear and Hearing, 23*(6), 532–539.
- Siiskonen, T., Ahonen, T., & Määttä, S. (2019). Kielenkehityksen vaikeudet. Teoksessa T. Ahonen, M. Aro, T. Aro, M.-K. Lerkkänen, & T. Siiskonen (toim.), *Oppimisen vaikeudet* (s. 224–251). Jyväskylä: Niilo Mäki Instituutti.
- Simon, C., & Fourcin, A. (1978). Cross-language study of speech-pattern learning. *Acoustical Society of America Journal, 63*, 925–935.
- Simos, P. G., Diehl, R. L., Breier, J. I., Molis, M. R., Zouridakis, G., & Papanicolaou, A. C. (1998). MEG correlates of categorical perception of a voice onset time continuum in humans. *Cognitive Brain Research, 7*(2), 215–219.
- Streeter, L. (1976). Language perception of 2-month-old infants shows effects of both innate mechanisms and experience. *Nature, 259*, 39–41.
- Taulu, S., & Kajola, M. (2005). Presentation of electromagnetic multichannel data: The signal space separation method. *Journal of Applied Physics, 97*(12).



- Taulu, S., & Simola, J. (2006). Spatiotemporal signal space separation method for rejecting nearby interference in MEG measurements. *Physics in medicine and biology*, *51*, 1759–1768.
- Taulu, S., Simola, J., & Kajola, M. (2005). Applications of the Signal Space Separation Method. *IEEE Transactions on Signal Processing*, *53*, 3359–3372.
- Trainor, L. J. (2007). Event-Related Potential (ERP) Measures in Auditory Development Research. Teoksessa L. A. Schmidt & S. J. Segalowitz (toim.), *Developmental Psychophysiology: Theory, Systems, and Methods* (s. 69–102). Cambridge: Cambridge University Press.
- Trehub, S. (1976). The Discrimination of Foreign Speech Contrasts by Infants and Adults. *Child Development*, *47*(2), 466–472.
- van Bijnen, S., Kärkkäinen, S., Helenius, P., & Parviainen, T. (2019). Left hemisphere enhancement of auditory activation in language impaired children. *Scientific Reports*, *9*(1).
- van Bijnen, S., Parkkonen, L., & Parviainen, T. (2022). Activity level in left auditory cortex predicts behavioral performance in inhibition tasks in children. *NeuroImage*, *258*.
- Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills. *Psychological Bulletin*, *101*(2), 192–212.
- Werker, J. F., & Lalonde, C. (1988). Cross-Language Speech Perception: Initial Capabilities and Developmental Change. *Developmental Psychology*, *24*, 672–683.
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (1984). Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development*, *7*(1), 49–63.
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (2005). Speech perception as a window for understanding plasticity and commitment in language systems of the brain. *Developmental Psychobiology*, *46*, 233–251.
- Winkler, I., Denham, S., & Escera, C. (2013). Auditory Event-related Potentials. Teoksessa D. Jaeger & R. Jung (Toim.), *Encyclopedia of Computational Neuroscience* (s. 1–29). New York, NY: Springer.
- Winkler, I., Lehtokoski, A., Alku, P., Vainio, M., Czigler, I., Csépe, V., Aaltonen, O., Raimo, I., Alho, K., Lang, H., Iivonen, A., & Näätänen, R. (1999). Pre-attentive detection of vowel contrasts utilizes both phonetic and auditory memory representations. *Cognitive Brain Research*, *7*(3), 357–369.
- Wunderlich, J. L., Cone-Wesson, B. K., & Shepherd, R. (2006). Maturation of the cortical auditory evoked potential in infants and young children. *Hearing Research*, *212*(1), 185–202.
- Zhang, Y., & Wang, Y. (2007). Neural plasticity in speech acquisition and learning. *Bilingualism: Language and Cognition*, *10*(2), 147–160.
- Ziemann, U., Muellbacher, W., Hallett, M., & Cohen, L. G. (2001). Modulation of practice-dependent plasticity in human motor cortex. *Brain*, *124*(6), 1171–1181.