

**Lukumäärän muutoksen havaitseminen vastasyntyneenä ja
kuuden kuukauden iässä**

Laura Olkkonen
Maisa Ruohonen
Pro gradu -tutkielma
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto
Heinäkuu 2024

OLKKONEN, LAURA & RUOHONEN, MAISA: Lukumäärän muutoksen havaitseminen vastasyntyneenä ja kuuden kuukauden iässä

Pro gradu –tutkielma, 32 s.

Ohjaaja: Kaisa Lohvansuu

Psykologia

Heinäkuu 2024

TIIVISTELMÄ

Matemaattisten taitojen oppiminen on hierarkkista, ja sen pohjana toimii lukumääräisyyden taju. Vaikeudet lukumääräisyyden tajussa voivat hankaloittaa myöhempien matemaattisten taitojen oppimista. Vauvojen kyvystä havaita lukumäärän muutosta tiedetään vasta vähän, ja aikaisempi tutkimus on painottunut suurten lukumäärien muutoksen havaitsemiseen sekä visuaalisten koeasetelmien käyttöön. Pyrimme ensimmäisessä tutkimuskysymyksessä selvittämään, havaitsevatko vastasyntyneet ja kuuden kuukauden ikäiset eroa lukumäärien kaksi ja yksi sekä kaksi ja kolme välillä. Toisen tutkimuskysymyksen tavoitteena oli tutkia, millaisia latenssimuutoksia lukumäärän muutoksen havaitsemisesta syntyvissä aivovasteissa tapahtuu vastasyntyneen ja kuuden kuukauden iän välillä.

Tutkielma on osa EarlyMath - Vauvan ensiaskeleet matematiikkaan -hanketta. Tutkimukseen osallistui yhteensä 55 vauvaa, joista 31 oli osallistunut sekä vastasyntyneen että kuuden kuukauden mittaukseen. Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastattiin käyttäen dataa 47 vastasyntyneeltä ja 39 puolivuotiaalta, ja toiseen tutkimuskysymykseen dataa 31:ltä molempiin tutkimuskertoihin osallistuneelta vauvalta. EEG:tä mitattiin 2–3 viikkoa lasketun ajan jälkeen sekä kuuden kuukauden ikäisenä. Lukumäärän eron havaitsemista analysoitiin toistettujen mittausten varianssianalyysin avulla erikseen seitsemällä noin 100 ms aikavälillä kanavilla P3 ja P4. Iän vaikutusta analysoitiin käyttäen toistettujen mittausten varianssianalyysiä sekä Pearsonin korrelaatiota.

Vain vastasyntyneiden vasteet 2-osaiseen standardiärsykkeeseen ja 1-osaiseen devianttiärsykkeeseen erosivat tilastollisesti merkitsevästi. Kuuden kuukauden ikäisillä ei ollut tilastollisesti merkitsevää eroa ärsykkeiden välillä. Vastasyntyneillä yksiosaisesta ärsykkeestä syntynyttä poikkeavuusvastetta hallitsi hidas positiivinen aalto, kun taas kuuden kuukauden iässä poikkeavuusvaste alkoi muistuttamaan aikuismaista MMN-vastetta. Vastasyntyneiden kolmiosaisen ärsykkeiden myöhäiset aikavälit korreloivat positiivisesti kuuden kuukauden aikaisten aikavälien kanssa kanavalla P3.

Vastasyntyneet havaitsivat eron lukumäärien kaksi ja yksi välillä, mutta eivät lukumäärien kaksi ja kolme välillä. Tilastollisesti merkitsevien tulosten puute kuuden kuukauden ikäisten osalta voi johtua monesta eri syystä. Vastasyntyneillä esiintyvää MMR-vastetta ei esiinny enää kuuden kuukauden ikäisillä, ja muutoksen havaitsemisessa tapahtuu latenssimuutosta. Vauvojen pienten lukumäärien muutoksen havaitsemista täytyy tutkia tulevaisuudessa enemmän käyttäen hyväksi niin visuaalisia kuin auditiivisia koeasetelmia.

Avainsanat: EEG, herätevaste, poikkeavuusvaste, lukumääräisyyden taju

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ
Department of Psychology

OLKKONEN, LAURA & RUOHONEN, MAISA: Detecting a change in quantity at newborn and six months of age

Master's thesis, 32 pp.

Supervisor: Kaisa Lohvansuu

Psychology

July 2024

ABSTRACT

Learning mathematical skills is hierarchical, and the number sense serves as its basis. Difficulties with number sense can make it much more difficult to learn mathematical skills. Little is known about babies' ability to detect change in quantity. Previous research has focused on babies' ability to detect changes in large quantities and in visual experimental designs. The first aim of the thesis was to find out whether newborns and six-month-olds detect change in quantity between numbers two and one as well as two and three. The second aim of the thesis was to investigate what latency changes occur in the brain responses arising from detection of change in quantity during the first six months of person's life.

This thesis is part of the EarlyMath project's Baby sample. A total of 55 babies participated in the study of which 31 had participated in both newborn and six-month measurements. For the first research question, data from 47 newborns and 39 half-year-olds were used. For the second research question, data from 31 babies who participated in both research sessions were utilized. EEG was measured 2–3 weeks after the due date and at six months of age. Change detection for a quantity was analyzed using repeated measures ANOVA which was done separately for seven approximately 100 msec intervals on channels P3 and P4. The age effect was analyzed using repeated measures ANOVA and Pearson's correlation.

Only newborns' responses to the 2-part standard stimulus and the 1-part deviant stimulus differed statistically significantly. Six-month-olds showed no statistically significant differences between the stimuli. In newborns, the deviant response arising from a 1-part stimulus was dominated by a slow positive wave. At six months of age, the MMR response began to resemble the adult-like MMN response. Late time frames for 3-part stimulus in newborns were positively correlated with early time frames at six months of age on channel P3.

Newborns detected the change between the numbers two and one, but not between the numbers two and three. The lack of statistically significant results for six-month-olds may be due to several reasons. The MMR response that occurs in newborns no longer occurs in six-month-olds, and the latency of change detection shifts earlier. Babies' ability to detect change in small quantities must be studied more in the future with as diverse experimental designs as possible.

Keywords: EEG, event-related potential, mismatch response, number sense

SISÄLLYS

1. JOHDANTO	1
1.1 Lukumääräisyyden tajun kehittyminen	2
1.2 Herätevasteet aikuisilla ja vauvoilla.....	3
1.3 Poikkeavuusvasteet aikuisilla ja vauvoilla	4
1.3.1 Poikkeavuusvasteen kehittyminen ensimmäisten elinkuukausien aikana	6
1.4 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	8
2. AINEISTO JA MENETELMÄT	10
2.1 Tutkittavat	10
2.2 Menetelmät ja muuttujat.....	11
2.2.1 Aivosähkökäyrätutkimus EEG	11
2.2.2. Multi-feature oddball paradigma	12
2.2.3 Muuttujat	13
2.3 Aineiston analysointi.....	13
3. TULOKSET	15
3.1 Pienten lukumäärien muutosten havaitseminen vastasyntyneenä ja kuuden kuukauden iässä	16
3.2 Iän vaikutus pienten lukumäärien muutosten havaitsemiseen vastasyntyneen ja kuuden kuukauden iässä.....	17
4. POHDINTA	22
4.1 Lukumäärän muutoksen havaitseminen	22
4.2 Iän vaikutus lukumäärän muutoksen havaitsemiseen	23
4.3 Tutkimuksen vahvuudet ja rajoitteet	24
4.4 Yleistettävyyys ja jatkotutkimusehdotukset.....	26
4.5 Johtopäätökset	26
LÄHTEET	28

1. JOHDANTO

Matemaattisten taitojen oppiminen on hierarkkista (Xu ym., 2023), ja kaiken pohjana toimii lukumääräisyyden taju (Koponen ym., 2023). Tämän takia vaikeudet lukumääräisyyden tajussa voivat hankaloittaa myöhempien matemaattisten taitojen oppimista (Koponen ym., 2023). Matemaattisten vaikeuksien kehittymiseen täytyisi ehtiä puuttumaan, ennen kuin matematiikka ehtii aiheuttamaan ahdistusta ja välttämiskäyttäytymistä. Jotta tukea voidaan tarjota riittävän aikaisin ja kohdentaa tarkoituksenmukaisesti, tarvitaan tietoa lapsen taidoista ja oppimiseen liittyvistä tekijöistä (Koponen ym., 2023). Ennen kielellisen vuorovaikutuksen kehittymistä matemaattisten vaikeuksien riskiä voi tutkia käyttämällä esimerkiksi aivokuvantamismenetelmiä.

Hans Berger kehitti aivosähkökäyrätutkimuksen eli elektroenkefalografian (EEG) jo sata vuotta sitten (Schirmann, 2014), mutta vastasyntyneitä ja pieniä vauvoja on tutkittu hyvin vähän verrattuna lapsiin ja aikuisiin. Ihmisen aivot kehittyvät valtavasti ensimmäisten elinkuukausien ja -vuosien aikana (Dubois ym., 2014; Gao ym., 2014; Gilmore ym., 2007; Li ym., 2015), ja aivovasteet voivat muuttua paljon lyhyessä ajassa (He ym., 2007; Zhang ym., 2017). Hyvä kokonaiskuva aivovasteiden kehityksestä auttaa tunnistamaan mahdollisia poikkeamia, jotka voivat johtua esimerkiksi matemaattisesta oppimisvaikeudesta (Ruusuvirta ym., 2009), dysleksiasta (Hämäläinen ym., 2015; Kailaheimo-Lönnqvist ym., 2020) tai kehityshäiriöstä (Zhang ym., 2022). Poikkeamien varhainen tunnistaminen antaisi mahdollisuuden riskilapsien auttamiseen ja tukemiseen jo ennen kouluikää.

Aikaisemmat tutkimukset vauvojen lukumääräisyyden tajusta ovat käyttäneet usein hyväkseen visuaalisia koeasetelmia (Dehaene, 2011a; Feigenson ym., 2004; Xu ym., 2005), ja ne ovat keskittyneet tutkimaan suurempien lukumäärien erottelukykä (Cohen Kadosh ym., 2008; Gennari ym., 2023). Meidän tutkielmassamme lukumäärän muutoksen havaitsemista tutkitaan sen sijaan auditiivisella koeasetelmalla. Käyttämässämme multi-feature oddball paradigmassa (Lovio ym., 2009; Näätänen ym., 2004; Partanen ym., 2013) ääniärsykejonossa tapahtuu satunnaisesti kaksiosaisen standardiärsykkeen muuttuminen yksi- tai kolmeosaiseksi. Tämä mahdollistaa sen tarkastelun, erottaako vastasyntynyt tai kuuden kuukauden ikäinen vauva lukumäärää yksi ja kolme lukumäärästä kaksi. Yksilöiden väliset erot lukumääräisyyden hahmotuskyvyn ”tarkkuudessa” voisivat selittää vaikeimpien matemaattisten oppimisvaikeuksien kehittymistä (LukiMat, ei pvm.). Ymmärrys matemaattisten taitojen hermostollisesta taustasta voisi myös vähentää niin matemaattisista vaikeuksista kärsivien ihmisten epävarmuuksia, kuin myös stigmaa matemaattisten vaikeuksien ympärillä. Tämän takia lukumääräisyyden tajun kehittymisen tutkiminen on erittäin tärkeää.

1.1 Lukumääräisyyden tajun kehittyminen

Matematiikan taitojen perusta alkaa kehittymään hyvin varhain, ja osa näistä kyvyistä on synnynnäisiä (Koponen ym., 2023). Aivoissa on jo varhaislapsuudessa lukumäärän prosessointiin erikoistunut mekanismi (Edwards ym., 2016). Lukumäärille ja ei-numeerisille määrille on olemassa joko yhteiset tai erilliset aivoedustukset jo vastasyntyneenä (Cohen Kadosh ym., 2008). Lapsen kasvaessa hänen aivoissaan kehitty numeeriselle tiedolle ominaisia hermoverkkoja, joissa symboliset numeeriset edustukset ja kielen rooli vahvistuvat (Carey, 2004).

Lukumäärien prosessoinnin taustalla toimii kaksi toisistaan erillistä järjestelmää: pienten lukumäärien tarkan erottamisen järjestelmä (parallel individuation system) ja suurten lukumäärien likimääräisen hahmottamisen järjestelmä (approximate number system) (Hyde, 2011; Hyde & Spelke, 2011; Hyde ym., 2017). Suurten lukumäärien likimääräinen erottaminen pohjautuu lukumäärien väliseen suhteeseen, kun pienten lukujen erottaminen taas absoluuttiseen lukumäärään. Järjestelmät vastaavat ihmisen numeerisia perusinstituutioita, ja ne toimivat perustana kehittyneemmille numeerisille käsitteille, jotka ovat juuri ihmisille ominaisia (Feigenson ym., 2004). Numeerisen ydinkognition ja varhaisen symbolisen numerokonseptin kehittymisellä on yhteys, sillä pienten lukumäärien tarkan erottamisen järjestelmässä ilmenevät yksilölliset erot ja esikouluikäisten lasten laskentakyvyssä esiintyvät yksilölliset erot korreloivat keskenään (Hyde ym., 2017). Pienten lukumäärien tarkkaa erottamista on kuitenkin vauvoilta tutkittu suurten lukumäärien likimääräistä hahmottamista vähemmän. Tässä tutkimuksessa keskitymmekin tarkastelemaan juuri pienten lukumäärien tarkan erottamisen järjestelmää.

Ihmiset kykenevät havaitsemaan pienten lukumäärien muutosta jo vauvana: Vastasyntyneet kykenevät erottelemaan lukumäärät kaksi ja kolme toisistaan visuaalisessa koetilanteessa vain muutama päivä syntymän jälkeen (Dehaene, 2011a). Kuuden kuukauden iässä vauvat erottavat lukumäärät kaksi ja kolme toisistaan (Dehaene, 2011a), mutta eivät välttämättä lukumääriä yksi ja kaksi (Xu ym., 2005). Kyky erottaa kaikki pienet lukumäärät, eli yksi, kaksi ja kolme, toisistaan kehittyä 10–14 kuukauden ikään mennessä (Feigenson ym., 2004). Jos kyky erottaa pienet lukumäärät toisistaan on heikko, se voitaisiin periaatteessa havaita jo vuoden iässä tai aikaisemmin aivokuvantamismenetelmien avulla.

1.2 Herätevasteet aikuisilla ja vauvoilla

Hermosolujen toimintaa heijastava ajassa vaihteleva jännitesignaali (aivosähkökäyrä, EEG) syntyy, kun pään pinnalle haluttuun kohtaan asetetun elektrodin ja suhteellisen neutraaliin kohtaan asetetun vertailuelektrodin välillä syntyy jännite-ero suhteessa kiinnostavaan aivotoimintaan (Trainor, 2008). Tapahtumasidonnaiseksi herätepotentiaaliksi (event-related brain potential, ERP) kutsutaan aivoaktiivisuutta, joka heijastaa tietyn ärsyketapahtuman käsittelyä (Trainor, 2008). ERP-aallolla tarkoitetaan pään pinnalta mitattuja ärsykkeen aiheuttamia jännitteen muutoksia, jotka heijastelevat sensorisia, kognitiivisia, affektiivisia ja motorisia prosesseja (Kappenman & Luck, 2012). ERP-huipulla viitataan luotettavaan ja paikalliseen positiiviseen tai negatiiviseen maksimiarvoon, joka voidaan havaita ERP-aallossa (Kappenman & Luck, 2012). ERP-komponentille on vaikeahkoa löytää yksinkertaista ja laajasti hyväksyttyä määritelmää (Kappenman & Luck, 2012), mutta niitä voidaan kutsua ERP-aallon tyypillisiksi osiksi, jotka ovat yhteydessä tiettyyn psykologiseen prosessiin (Banich & Compton, 2018).

Aikuisten kuuloherätevasteet (auditory evoked potentials) sisältävät ärsykkeen alkamisesta ensimmäisten 10 ms:n aikana mitatut kuulohermon ja aivorungon vasteet (auditory brainstem responses, ARB), 10–60 ms ärsykkeen alkamisesta mitatut keskilatenssin aiheuttamat vasteet (middle-latency responses, MLR) sekä 60–200 ms ärsykkeen alkamisesta mitatut pitkän latenssin komponentit (Pratt, 2012). Viimeisimmät ovat pitkiä verrattuna aiemmin ilmeneviin sensorisiin komponentteihin, mutta lyhyempiä kuin ERP:n kognitiiviset komponentit, kuten P300 (Pratt, 2012). Pitkän latenssin kuulo-ERP:n komponentteihin kuuluvat noin 50 millisekunin kohdalla ensimmäinen positiivinen huippu (P50) ja sitä seuraava noin 100 millisekunin kohdalla näkyvä merkittävä negatiivinen huippu (N100) (Pratt, 2012). Näitä seuraavat sarja vuorottelevia positiivisia ja negatiivisia huippuja, jotka eivät kuitenkaan ole spesifejä juuri kuuloärsykkeille, vaan heijastelevat aistihavainnon ulkopuolista prosessointia (Pratt, 2012).

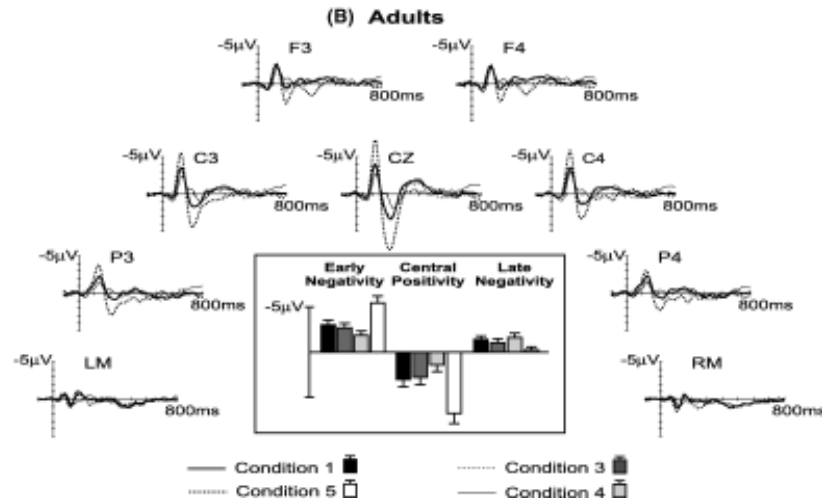
Vastasyntyneillä kuuloärsykkeen seurauksena heränneen vasteen on tyypillisesti havaittu koostuvan positiivisesta aallosta (P2), jonka huippu on noin 250 ms kohdalla, sekä negatiivisesta aallosta (N2), jonka huippu on noin 400–500 ms kohdalla (Wunderlich ym., 2006). Aikuisilla esiintyvää klassista monivaiheista vastetta (P1-N1-P2-N2) ei siis tyypillisesti esiinny vielä vauvoilla, vaan vaste monimutkaistuu ikääntymisen myötä (Wunderlich ym., 2006). Jo kuuden kuukauden jälkeen syntymästä on siis mahdollista huomata muutosta herätevasteissa verrattuna vastasyntyneenä tehtyihin mittauksiin.

1.3 Poikkeavuusvasteet aikuisilla ja vauvoilla

Auditiivinen poikkeavuusnegatiivisuusvaste (mismatch negativity, MMN; esim. Näätänen ym., 2007) on kuulo-ERP:n muutosspesifinen komponentti, joka voidaan havaita ilman tarkkaavaisuuden kohdentamista, ja jota voidaan käyttää objektiivisena mittarina tutkittaessa äänen erottelutarkkuutta ja kuuloaistimuistia (Näätänen & Kreegipuu, 2012). Jo vastasyntyneet kykenevät havaitsemaan ääniärsykejonossa esiintyvää säännönmukaisuutta ja poikkeuksia säännönmukaisuudessa (Háden ym., 2015; Stefanics ym., 2009). Ennustavan äänenkäsittelyn käsitteellä viitataan siihen, että kuulojärjestelmä valmistautuu tuleviin ääniin, kun se on havainnut säännöllisiä piirteitä ääniärsykkeiden sarjassa (Háden ym., 2015). Kun näitä säännöllisiä piirteitä rikotaan poikkeavalla ääniärsykkeellä, vastasyntyneen aivosähkökäyrässä on havaittavissa muutokseen reagoiva poikkeavuusvaste (mismatch response, MMR) (Háden ym., 2015; Kushnerenko ym., 2007; Stefanics ym., 2009).

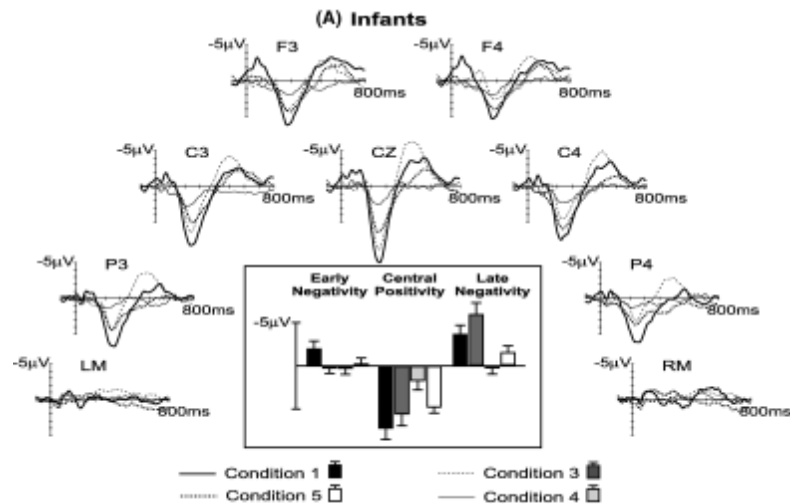
Aikuisilla poikkeavasta ääniärsykkeestä syntyvä vaste on muodoltaan erilainen kuin standardiärsykkeestä syntyvä vaste. Muutos ääniärsykejonossa aiheuttaa aikaisen negatiivisen huipun noin 100–150 millisekuntia ääniärsykkeen toistamisen jälkeen (Kushnerenko ym., 2007). Sitä seuraa suuri positiivinen huippu noin 250–350 millisekuntia ärsykkeen alkamisen jälkeen, ja tämän jälkeen tulee vielä toinen negatiivinen huippu noin 350–400 millisekuntia ärsykkeen alkamisesta (Kushnerenko ym., 2007). Ensimmäinen negatiivinen huippu on N1/MMN-vaste, sentraalialuella ilmenevä positiivinen huippu on P3a-vaste ja viimeinen negatiivinen huippu on LDN-vaste (late discriminative negativity) (Kushnerenko ym., 2007).

MMN on herkkä ärsykkeen äkilliselle alkamiselle ja muutokselle ääniärsykejonossa (Näätänen & Kreegipuu, 2012). P3a sen sijaan liittyy suuntautumisrefleksiin eli tahattomaan huomion siirtymiseen kohti tulevaa ärsykettä (Escera ym., 2000). LDN ilmaantuu aikuisilla silloin kun tehtävän kannalta epäoleellinen tai uusi ärsyke aiheuttaa häiriötekijän jostain ensisijaisesta tehtävästä (Schröger & Wolff, 1998). Sen oletetaan heijastelevan prosesseja, jotka ohjaavat huomion takaisin tehtävään (Schröger & Wolff, 1998). Muutoksen havaitsemisen aallonmuodossa on siis havaittavissa kolme huippua, joista ensimmäinen ja viimeinen ovat negatiivisia ja keskimäinen positiivinen (Kuva 1).



Kuva 1. Aikuisten poikkeavuusvasteet eri kanavilla (lähde: Kushnerenko ym., 2007)

Vastasyntyneillä poikkeavuusvasteiden aallon muoto ei kuitenkaan muistuta aikuisten muutoksen havaitsemisvasteiden aallonmuotoa. MMR-vaste ilmenee pitkänä hitaana positiivisena aaltona (Háden ym., 2016). Laajan positiivisuuden aiheuttaa useimmat poikkeamat ääniärsykejonossa, mutta myös ärsykkeen voimakkuus heijastuu positiivisen aallon amplitudin suuruuteen (Kushnerenko ym., 2007). Tämän lisäksi MMR-aallossa voi esiintyä myöhäistä negatiivisuutta, joka ilmenee, kun ärsykkeissä tapahtuu kategorisia poikkeamia, kuten ärsykkeen pituuden tai äänenvoimakkuuden muuttumista (Kushnerenko ym., 2007). Kaikki aikuismaisen muutoksen havaitsemisaallon komponentit eivät kuitenkaan esiinny MMR-aallossa, vaan siitä puuttuu varhainen negatiivisuus (Ponton ym., 2000). Kolmiaaltoisen muodon sijaan vastasyntyneiden MMR-vaste muistuttaa siis enemmän muodoltaan yhtä hidasta positiivista aaltoa, jota saattaa seurata myöhäinen negatiivinen huippu (Kuva 2).



Kuva 2. Vastasyntyneiden poikkeavuusvasteet eri kanavilla (lähde: Kushnerenko ym., 2007)

Vauvojen MMR-vasteiden voimakkuus auditivisissa koetilanteissa on suurinta frontaalaisella aivokuorella, kun referenssikanava on mastoidikanavilla, ja vallitsevaa oikealla aivopuoliskolla (Čeponiene ym., 2002; Cheour-Luhtanen ym., 1996). Visuaalisesta lukumäärän muutoksesta syntyvät vasteet sijaitsevat sen sijaan vauvoilla usein parietaalisella aivokuorella (Edwards ym., 2016; Hyde ym., 2010; Izard ym., 2008). Auditivisesta lukumäärän muutoksen havaitsemisesta on tehty hyvin vähän tutkimuksia, eikä täten voida vielä olla täysin varmoja, millä aivoalueilla poikkeavuusvasteet ovat voimakkaimmat. Aikuisilla lukumäärän muutoksesta seuraavia poikkeavuusvasteita esiintyy myös vasemmalla aivopuoliskolla, ja lukumäärään erikoistuneet aivomekanismit alkavat aktivoitua bilateraalisesti myöhemmällä iällä (Cantalón ym., 2006; Cohen Kadosh ym., 2008).

1.3.1 Poikkeavuusvasteen kehittyminen ensimmäisten elinkuukausien aikana

Vastasyntyneiden kyky havaita poikkeavuutta ärsykejonossa kehittyy huomattavasti ensimmäisten elinkuukausien aikana. Toistuviin, ja täten ennustettavissa oleviin, standardiärsykkeisiin liittyvät aiovasteet eroavat satunnaisten ääniärsykkeiden aiheuttamista poikkeavuusvasteista (He ym., 2007; Tóth ym., 2023). Kahdentyyppistä poikkeavuusvastetta esiintyy samanaikaisesti ERP-aallossa. Kahden kuukauden iässä poikkeavuusvasteen muoto muistuttaa hidasta positiivista aaltoa eli MMR-vastetta suurimmalla osalla vauvoista (He ym., 2007). Lisäksi joillakin vauvoilla esiintyy nopeampaa aikuismaista MMN-vastetta, ja tämän poikkeavuusvasteen esiintyvyys yleistyy vauvan ikääntyessä (He ym., 2007).

Poikkeavat äänet saavat aikaan merkittävän poikkeavuusvasteen vain silloin, kun ne rikkovat toistuvaa äänikuviota (Tóth ym., 2023). Aikuiset kykenevät erottamaan toistuvien ja satunnaisten ääniärsykkeiden järjestyksen jonkin verran nopeammin kuin vastasyntyneet, mutta kyky skannata kuuloympäristöä ja havaita siinä toistuvia äänikuvioita on kuitenkin synnynnäistä (Tóth ym., 2023). Sen sijaan prosessit, jotka johtavat kaavan tunnistamiseen muuttuvat tai säätyvät aivojen kypsymisen aikana (Tóth ym., 2023). Vaikka jotkut kyvyt ovat synnynnäisiä, niissä voi tapahtua paljon muutosta, varsinkin ensimmäisten elinkuukausien aikana.

Aikuismaista MMN-vastetta esiintyy muutamilla vauvoilla kolmen kuukauden iässä (31 %), neljän kuukauden iässä vielä useammalla (58 %) ja kuuden kuukauden iässä jo suurimmalla osalla vauvoista (Trainor ym., 2003). Poikkeavuusvasteen muoto siis muistuttaa hidasta positiivista aaltoa siihen asti, kunnes vauvan aivot kykenevät tuottamaan nopeampaa aikuismaista MMN-vastetta (Trainor ym., 2003). MMR-vastetta ei kuitenkaan esiinny enää myöhemmällä iällä (He ym., 2007; Trainor ym., 2003). Sen esiintyvyys on yleistä vielä kolmen kuukauden ikäisillä, mutta neljän kuukauden ikään mentäessä se häviää lähes kokonaan (He ym., 2007). Lukumäärän muutoksen havaitsemisesta syntyvät poikkeavuusvasteet voivat siis erota toisistaan vastasyntyneenä ja kuuden kuukauden iässä. Vaikka kahden kuukauden ikäisillä ei synny lainkaan aikuismaista MMN-vastetta, MMR-vasteen aallon voimakkuus kasvaa poikkeavien ärsykkeiden jälkeen. (Trainor ym., 2003). Tämä tarkoittaa sitä, että MMR-vaste voi, kuten MMN-vastekin, liittyä muutoksen havaitsemiseen (Trainor ym., 2003).

Kahden tyyppisen poikkeavuusvasteen rinnakkaiselo ja dissosiaatio viittaavat niiden erilaisiin taustalla oleviin neuromekanismeihin (He ym., 2007). Aikuismainen MMN-vaste ilmaantuu aikaisemmin vauvan kuullessa muutoksen äänenkorkeudessa verrattuna muihin ääniominaisuuksien muutoksiin (He ym., 2007). Poikkeavuusvasteiden tuottamiseen osallistuvilla hermopiireillä on täten erilaiset kypsymisaikataulut eri ääniominaisuuksille (He ym., 2007). Sävelkorkeuden muutoksesta seuraava poikkeavuusvaste alkaa muistuttamaan aikuismaista MMN-vastetta 2–4 kuukauden iässä, kun taas tauko ärsykejonossa aiheuttaa kyseisen vasteen vasta 4–6 kuukauden iässä (He ym., 2007). Erilaiset kypsymisaikataulut vahvistavat käsitystä siitä, että MMN-vasteiden kehittyminen on eri aikaista eri äänen piirteille (He ym., 2007).

Lukumäärän muutoksen havaitseminen muuttuu aivovasteiden kehittymisen myötä nopeammaksi. Lukumäärien suhteesta riippuvainen komponentti (P500) ja absoluuttisesta arvosta riippuva komponentti (P400) ilmaantuvat vastasyntyneillä noin 250 ms myöhemmin kuin vastaavat komponentit P2p (noin 250 ms ärsykkeen jälkeen) ja N1 (noin 150 ms ärsykkeen jälkeen) aikuisilla (Hyde & Spelke, 2011). Vastasyntyneet ovat siis aikuisia hitaampia havaitsemaan lukumäärän muutosta. Vastasyntyneiden ja aikuisten poikkeavuusvasteiden erot voisivat kertoa siitä, että

aikuisen aivot käsittelevät lukumääriä nopeammin kuin vastasyntyneen aivot (Hyde & Spelke, 2011). Jos vastasyntyneillä esiintyy MMR-vaste ja kuuden kuukauden ikäisillä aikuismainen MMN-vaste lukumäärän muutoksen jälkeen, tämä voisi olla merkki lukumäärän muutoksen havaitsemisen nopeutumisesta.

1.4 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkielman tavoitteena on lisätä tietoa lukumääräisyyden tajusta pienillä vauvoilla ja sen kehityksestä ihmisen ensimmäisten elinkuukausien aikana. Pyrimme vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Havaitsevatko vastasyntyneet ja kuuden kuukauden ikäiset vauvat eron standardiärsykkeen ja devianttiärsykkeiden välillä auditiivisessa koetilanteessa?

Ihminen kykenee havaitsemaan lukumääriä niin visuaalisista kuin auditiivisista kohteista, summaamaan niitä yhteen ja vertailemaan niiden lukumäärää (Dehaene, 2011b), joten oletamme vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten pystyvän havaitsemaan muutosta myös auditiivisessa koetilanteessa. Vaikka aivovasteiden tarkat ajoitukset muuttuvat myöhemmin iän myötä, auditiivisen muutoksen havaitsemisesta syntyvät vasteet voidaan identifioida jo vastasyntyneillä (esim. Leppänen ym., 2010). Hypotesimme on, että sekä vastasyntyneet että kuuden kuukauden ikäiset havaitsevat lukumäärän muutosta, koska jo vauvana aivoissa on lukumäärään erikoistunut aivomekanismi (Edwards ym., 2016) ja osa matemaattisista taidoista on täten ihmisille synnynnäisiä (Koponen ym., 2023). Tämänhetkinen tutkimus osoittaa, että jo pienillä vauvoilla on kyky erottaa lukumääriä yksi, kaksi ja kolme toisistaan (esim. Cordes & Brannon, 2009; Koponen ym., 2023).

2. Tapahtuuko muutoksen havaitseminen ajallisesti eri aikaan vastasyntyneenä ja kuuden kuukauden iässä eli muuttuvatko muutoksen havaitsemiseen liittyvät aivojen vasteet ajallisesti?

Poikkeavien ärsykkeiden havaitsemisessa tapahtuu paljon muutoksia ensimmäisten elinkuukausien aikana. Vastasyntyneellä syntyy positiivinen hidas MMR-vaste reaktiona poikkeavaan ärsykkeeseen, mutta jo muutaman kuukauden iässä voi poikkeavuusvaste alkaa muistuttamaan aikuismaista MMN-vastetta (He ym., 2007, Trainor ym., 2003). Aikuisten aivot käsittelevät vastasyntyneitä nopeammin lukumääriä (Hyde & Spelke, 2011), jolloin poikkeavuusvasteen syntyminen aikaistuu.

Poikkeavuusvasteen kehityskulkuun pohjautuen hypoteesimme on, että muutoksen havaitsemisesta seuraava vaste aikaistuu kahden mittauskerran välillä.

2. AINEISTO JA MENETELMÄT

2.1 Tutkittavat

Tämä tutkielma kuuluu EarlyMath –hankkeeseen, jossa matemaattisten taitojen, motivaation ja tunteiden varhaisia kehityspolkuja tutkitaan syntymästä kouluikään asti. Hanke koostuu kolmesta osahankkeesta: Vauvan ensiaskeleet matematiikkaan, Taaperon ensiaskeleet matematiikkaan ja Koululaisen ensiaskeleet matematiikkaan. Tutkielmamme on osa Vauvan ensiaskeleet matematiikkaan –osahanketta. Euroopan tutkimusneuvosto (ERC) on myöntänyt rahoituksen EarlyMath–hankkeelle osana EU:n Horisontti 2020 -ohjelmaa (sopimusnumero 101002966). Hanke on saanut hyväksynnän Jyväskylän yliopiston eettiseltä toimikunnalta sekä Euroopan komissiolta.

Tutkimukseen osallistui 55 vauvaa enimmäkseen Jyväskylän alueelta ja sen lähikunnista. 31 vauvaa oli tutkielman kirjoitushetkellä osallistunut sekä vastasyntyneen että kuuden kuukauden mittaukseen, 16 vain vastasyntyneen mittaukseen ja 8 vain kuuden kuukauden mittaukseen. Ensimmäisessä tutkimuskysymykseen käytettiin kaikilta tutkituilta saatu data, jolloin vastasyntyneiden määrä oli 47 ja kuuden kuukauden ikäisten määrä oli 39 (Taulukko 1). Toiseen tutkimuskysymykseen käytettiin vain niiden koehenkilöiden dataa, jotka olivat osallistuneet molempiin tutkimuskertoihin, jolloin tutkittavien määräksi tuli 31. Vastasyntyneiden mittaus suoritettiin kahdesta kolmeen viikkoa lasketun ajan jälkeen. Kuuden kuukauden mittaus taas pyrittiin suorittamaan mahdollisimman lähellä tutkittavan kuuden kuukauden ikää. Tämän takia tutkittavien ikä 1. mittauskerralla vaihteli enemmän kuin tutkittavien ikä 2. mittauskerralla.

Taulukko 1. Tutkittavien lukumäärä sekä syntymästä lasketun iän keskiarvo, keskihajonta ja ääriarvot päivinä

	1. tutkimuskysymys		2. tutkimuskysymys	
	Vastasyntyneet	6 kuukauden ikäiset	Vastasyntyneet	6 kuukauden ikäiset
Lukumäärä	47	39	31	31
Keskiarvo	20.64	187.23	19.77	187.35
Keskihajonta	8.30	5.31	7.88	5.62
Minimiarvo	4	182	4	182
Maksimiarvo	44	209	37	209

Osallistujat rekrytoitiin mukaan pääosin äitiysneuvoloiden kautta. Rekrytointiprosessi pohjautui aikaisempiin toimiin, jotka kehitettiin Jyväskylä Longitudinal Study of Dyslexia –hankkeen aikana

(esim. Lohvansuu ym., 2021; Lyytinen ym., 2015), joka on samankaltainen perheriskitutkimus lukivaikeudesta. Tutkimuksen ulkopuolelle rajattiin koehenkilöt, joilla oli esimerkiksi synnytyksessä aiheutunut vamma, heidän sikiöikänsä oli hyvin alhainen, tai jos heillä oli heikentynyt kuulo tai muita sellaisia ongelmia, jotka voisivat vaikuttaa aivovasteisiin.

2.2 Menetelmät ja muuttujat

2.2.1 Aivosähkökäyrätutkimus EEG

Tutkimuksessa mitattiin aivojen sähköistä toimintaa aivosähkökäyrätutkimuksen (EEG) avulla. EEG:n tärkein etu on siinä, että sitä voidaan käyttää heti syntymän jälkeen, koska se ei vaadi tutkittavalta aktiivista huomiota esiintyviin ärsykkeisiin. Etuna voidaan pitää myös ei-invasiivisuutta, sillä EEG:n käyttö ei vaadi suurta magneettikenttää tai radioaktiivista ainetta (Trainor, 2008). EEG-koeasetelma pystyy paljastamaan ne automaattiset aivoprosessit, jotka liittyvät numeeristen ja ei-numeeristen suuruuksien käsittelyyn. Se näyttää ajallisesti peräkkäisiä prosessointivaiheita millisekunnin tarkkuudella. Ensimmäinen mittaus tehtiin 2–3 viikkoa arvioidun syntymäajan jälkeen ja toinen mittaus kuuden kuukauden iässä. EEG-mittaukset suoritettiin akustisesti ja sähköisesti suojatussa huoneessa. Jatkuvaa EEG:tä tallennettiin näytteenottotaajuudella 500 Hz langatonta LiveAmp-vahvistinta ja BrainVision Recorder 1.24 -ohjelmistoa (<https://www.brainproducts.com/solutions/liveamp/>) apuna käyttäen. Mittauksen aikana käytettiin 0–131 Hz kaistanpäästösuodatinta.

Vastasyntyneiden EEG-mittauksessa vauvat nukkuivat pinnasängyssä tai vanhemman sylissä katossa olevan kaiuttimen alla. Mittaus keskeytettiin, jos lapsi oli kovin itkuinen eikä nukahtanut. EEG-dataa mitattiin unen aikana, sillä vauvan aivot prosessoivat erittäin aktiivisesti ääniä myös hiljaisen unen aikana (Gilley ym., 2017). Mittauksessa käytettiin EasyCap-merkkistä aktiivielektrodimyssyä, johon oli kiinnitetty 19 EEG-kanavaa (elektrodit: Fp1, Fz, F3, F7, C3, T7, Pz, P3, P7, O1, O2, P4, P8, Cz, C4, T8, F4, F8, Fp2; ActiCAP slim/snap, EasyCap, GmbH, Saksa). Referenssielektrodi sijaitsi kanavapaikalla AFz ja maadoituselektrodi sijaitsi kanavapaikalla TP10. Kaikkien elektrodien impedanssit pyrittiin pitämään alle 20 k Ω .

Puolivuotiaiden EEG-mittauksessa vauvat istuivat vanhemman sylissä katossa olevan kaiuttimen alla ja heitä viihdytettiin lelujen avulla. Mittauksessa käytettiin EasyCap-merkkistä aktiivielektrodimyssyä, johon oli kiinnitetty 31 EEG-kanavaa (elektrodit: Fp1, Fz, F3, F7, FT9, FC5, FC1, C3, T7, TP9, CP5, CP1, Pz, P3, P7, O1, Oz, O2, P4, P8, CP6, CP2, Cz, C4, T8, FT10, FC6,

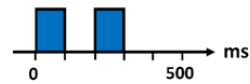
FC2, F4, F8, Fp2; ActiCAP slim/snap, EasyCap, GmbH, Saksa). Referenssielektrodi sijaitsi kanavapaikalla AFz ja maadoituselektrodi sijaitsi kanavapaikalla TP10. Kaikkien elektrodien impedanssit pyrittiin pitämään alle 20 k Ω .

2.2.2. Multi-feature oddball paradigma

Molemmilla mittauskerroilla käytettiin hyvin dokumentoitua multi-feature oddball paradigmaa (optimaalinen oddball paradigma), jossa vaihtelee viisi sinimuotoista ääntä satunnaisessa järjestyksessä (Lovio ym., 2009; Näätänen ym., 2004; Partanen ym., 2013). Piippausäänet, joiden taajuus oli 493.33 Hz, luotiin Audacity-ohjelmalla (Audacity® versio 3.4; <https://www.audacityteam.org/>). Äänet esitettiin Presentation-ohjelmistolla (versio 20.2) äänenvoimakkuudella 75 dBA katossa olevan kaiuttimen avulla. Ärsykkeet olivat kestoltaan 100–500 ms. Standardiärsyke koostui 2-osaisesta siniäänestä, jota toistettiin 750 kertaa. Tämän lisäksi soitettiin viisi devianttiärsykettä, joissa joko tauko lyhenyi, taajuus muuttui, intensiteetti muuttui tai lukumäärä muuttui (1- tai 3-osaiseksi). Jokainen devianttiärsyke toistui 150 kertaa. Aika ärsykkeen alkamisesta seuraavan ärsykkeen alkuun oli 500–700 ms. Multi-feature –asetelman (Kuva 1) kesto oli noin 25 minuuttia. Koeasetelmassa tutkittiin sitä, missä määrin aivojen reaktiot numeerisen ja ei-numeerisen suuruuden muutoksiin, jotka heijastuvat eri ääniominaisuuksissa. Mittauksessa käytettiin lisäksi kahta kontrollikoeasetelmaa, joista toisessa soitettiin 1-osaista siniääntä ja toisessa 3-osaista siniääntä yksinään. Näiden avulla kontrolloitiin kontekstin vaikutus, eli sen vaikutus esiintykö ärsyke yksinään tai muiden joukossa. Kontrollikoeasetelmien kesto oli noin 3 minuuttia, ja ärsykkeet toistuiivat niissä 150 kertaa. Koeasetelmien järjestys arvottiin ja ne soitettiin satunnaistetussa järjestyksessä.

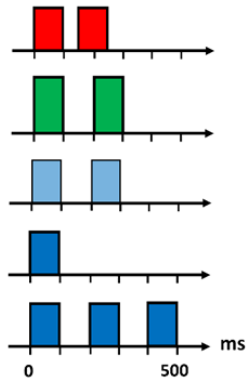
Multi-feature koasetelma, kesto noin 25 min

Toistuva ärsyke (750 toistoa): 2-osainen siniääni



5 poikkeavaa ärsykettä (150 toistoa/ääni):

- Tauon lyhentyminen (100ms → 50ms)
- Taajuusmuutos 493.33Hz → 554Hz
- Intensiiteettimuutos 75dB → 65dB
- 1-osainen ääni
- 3-osainen ääni



Kuva 3. Multi-feature -koasetelma ja sen äänten ominaisuudet. Tässä tutkielmassa keskityimme analyseissä tummemman sinisellä kuvattuihin eli lukumäärään liittyviin ärsykkeisiin.

2.2.3 Muuttujat

Lukumäärän muutoksesta seuraavien vasteiden on havaittu olevan vahvimmillaan oikealla parietaalilohkolla (Edwards ym., 2016; Hyde ym., 2010; Izard ym., 2008), minkä takia valitsimme tarkasteluun parietaalialueen kanavat P3 ja P4. Tutkielmamme eksploratiivisen luonteen takia tarkastelimme aikaväliä 100–798 millisekuntia ärsykkeen soittamisen jälkeen. Tämä aikaväli jaettiin seitsemään noin 100 ms mittaiseen aikaväliin. Mielenkiintomme kohteena oli EEG-vasteen amplitudien suuruudet niin standardi- kuin devianttiärsykkeiden soittamisen jälkeen näillä aikaväleillä. Standardi- ja devianttiärsykkeistä muodostettiin myös erotusmuuttujat jokaiselle 100 ms mittaiselle aikavälille.

2.3 Aineiston analysointi

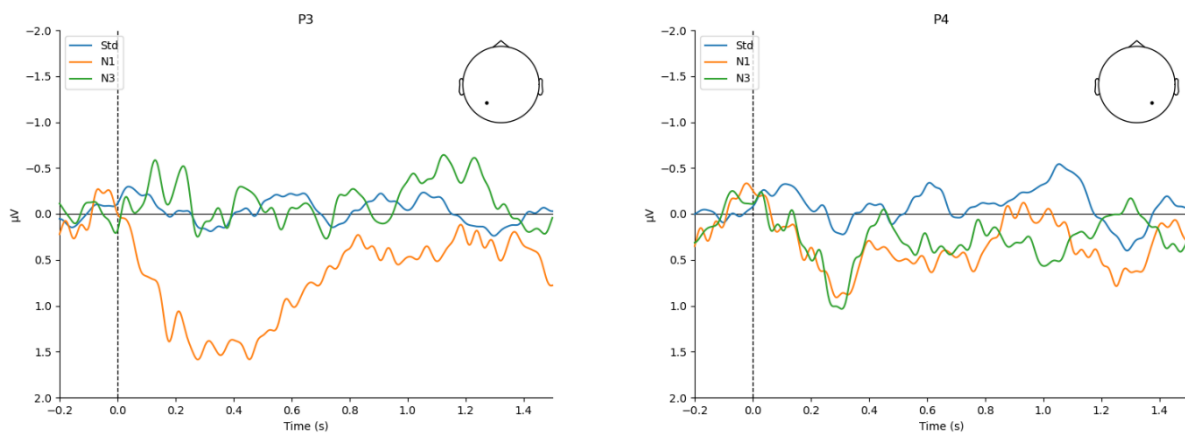
Tilastolliset analyysit suoritettiin IBM SPSS Statistics 28 ohjelmistolla. EEG-vasteiden amplitudit standardi- ja devianttiärsykkeisiin kanavilta P3 ja P4 keskiarvostettiin aikaväleiltä 100–198, 200–298, 300–398, 400–498, 500–598, 600–698 ja 700–798 ms ärsykkeen jälkeen. Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastattiin käyttämällä toistettujen mittauksen varianssianalyysijä, joissa vertailtiin standardiärsykkeestä seuraavaa vastetta 1- ja 3-osaisten devianttiärsykkeiden tuottamiin vasteisiin. Analyysi tehtiin erikseen jokaiselle aikavälille kanavilla P3 ja P4. Analyysiin valittiin

mukaan kaikilta tutkituilta saatu data, jolloin vastasyntyneiden määrä oli 47 ja kuuden kuukauden ikäisten määrä oli 39.

Toiseen tutkimuskysymykseen otettiin huomioon vain ne tutkittavat, jotka olivat osallistuneet niin vastasyntyneenä kuin kuuden kuukauden iässä mittauksiin. Tutkittavien määräksi tuli tällöin 31. Käytimme tutkimuskysymyksen vastaamiseen toistettujen mittausten varianssianalyysiä, jonka avulla tarkastelimme iän vaikutusta lukumäärän muutoksen havaitsemiseen eri aikaväleillä. Tätä varten muodostimme standardi- ja devianttiärsykkeistä erotusmuuttujat. Muuttujat muodostettiin erottamalla jokaisen aikavälin standardiärsykkeestä vastaavan aikavälin 1-osainen devianttiärsyke tai 3-osainen devianttiärsyke. Lisäksi käytimme apunamme Pearsonin korrelaatiota, jossa eri aikavälien erotusmuuttujia vertailtiin vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten välillä.

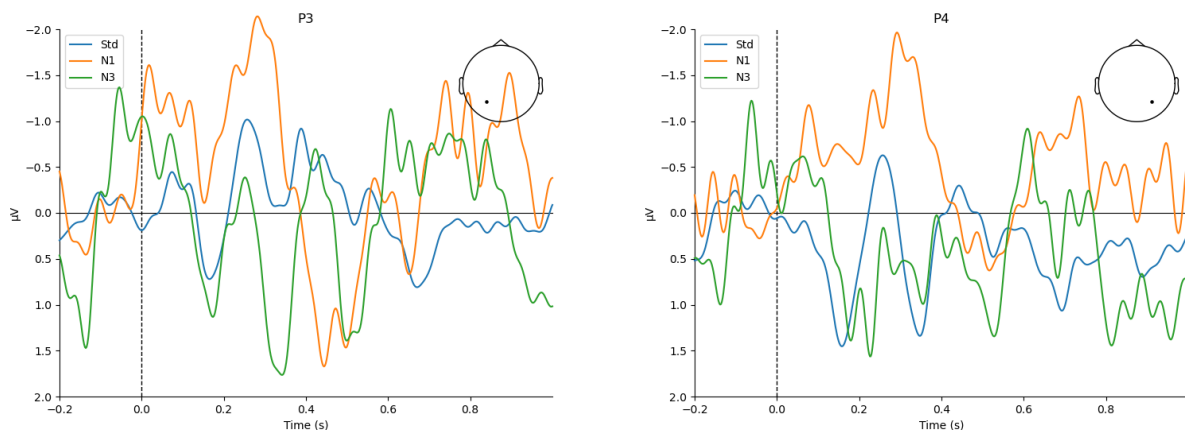
3. TULOKSET

Ennen tutkimuskysymyksiin vastaamista tarkasteltiin ERP-aallon komponentteja ja muotoa vastasyntyneenä ja kuuden kuukauden iässä kanavilta P3 ja P4. Kanavalla P3 1-osaisen devianttiärsykkeen tuottaman vasteen muoto muistuttaa pitkää positiivista aaltoa (Kuva 3). Vasteen maksimiarvo on tarkastellulla aikavälillä noin 1.5 mikrovoltia (μV). 3-osaisen devianttiärsykkeen tuottaman vasteen muoto ei taas eroa standardiärsykkeen tuottaman vasteen muodosta. Kanavalla P4 devianttiärsykkeiden vasteiden arvot ovat lähes koko tarkastellun ajan positiivisia, mutta kummallakaan devianttiärsykkeellä ei ole havaittavissa niin selkeää poikkeavuusvastetta kuin 1-osaisella devianttiärsykkeellä kanavalla P3. Molempien devianttiärsykkeiden tuottamien vasteiden maksimiarvo on noin $1.0 \mu\text{V}$.



Kuva 4. Vastasyntyneiden ERP-vasteet standardiärsykkeeseen sekä devianttiärsykkeisiin parietaalikanavilla P3 ja P4.

Kuuden kuukauden iässä ärsykkeiden tuottamien vasteiden amplitudit vaihtelevat huomattavasti tarkastellun ajan sisällä positiivisten ja negatiivisten arvojen välillä (Kuva 4). Esimerkiksi kanavalla P3 1-osaisen devianttiärsykkeen tuottaman vasteen amplitudin minimiarvo on noin $-2.0 \mu\text{V}$ ja maksimiarvo $1.7 \mu\text{V}$. Kummallakaan kanavalla ei esiinny vastasyntyneille tyypillisen poikkeavuusvasteen hidasta positiivista aaltoa, mutta 1-osaisen devianttiärsykkeen muoto noudattaa aikuismaisen MMN-vasteen muotoa (varhainen negatiivinen huippu, keskimäinen positiivinen huippu, myöhäinen negatiivinen huippu) kummallakin kanavalla.



Kuva 5. Kuuden kuukauden ikäisten ERP-vasteet standardiärsykkeeseen sekä devianttiärsykkeisiin parietaalikanavilla P3 ja P4.

3.1 Pienten lukumäärien muutosten havaitseminen vastasyntyneenä ja kuuden kuukauden iässä

Tutkielmamme ensimmäinen tavoite oli selvittää, havaitsevatko vastasyntyneet ja kuuden kuukauden ikäiset lukumäärän muutosta, kun auditiivisen 2-osaisen standardiärsykkeen jälkeen soitetaan 1- tai 3-osainen devianttiärsyke. Toistettujen mittausten varianssianalyysin tulokset osoittavat, että vastasyntyneet ($N = 47$) havaitsevat eron lukumäärien 2 ja 1 välillä, mutta eivät havaitse lukumäärien 2 ja 3 eroa millään tarkastellulla aikavälillä (Taulukko 2). Standardiärsykkeen ja 1-osaisen devianttiärsykkeen ero oli tilastollisesti merkitsevä aikaväleillä 100–198 ms, 200–298 ms, 300–398, 400–498 ms, 500–598 ms ja 600–698 ms ärsykkeen alkamisen jälkeen.

Taulukko 2. Vastasyntyneiden lukumäärän muutoksen havaitseminen

Aika	Lukumäärän muutos					
	2 vs. 1			2 vs. 3		
	F	p	η_p^2	F	p	η_p^2
100–198 ms	4.424	.041	.088	.194	.662	.004
200–298 ms	10.131	.003	.180	.115	.736	.002
300–398 ms	8.015	.007	.148	.740	.394	.016
400–498 ms	6.463	.014	.123	1.258	.268	.027
500–598 ms	7.001	.011	.132	.000	.985	.000
600–698 ms	7.880	.007	.146	.004	.949	.000
700–798 ms	.911	.345	.019	.677	.415	.015

Kuuden kuukauden ikäisille ($N = 39$) tehdyissä toistettujen mittausten varianssianalyyseissä ero standardiärsykkeiden ja devianttiärsykkeiden välillä ei ole tilastollisesti merkitsevä millään

tarkastellulla aikavälillä (Taulukko 3). Efektikoot ovat kuitenkin kohtalaisen suuria standardi- ja 1-osaisen devianttiärsykkeen välillä aikavälillä 700–798 ms, ja standardi- ja 3-osaisen devianttiärsykkeen aikavälillä 200–298 ms ärsykkeen alkamisen jälkeen.

Taulukko 3. *Kuuden kuukauden ikäisten lukumäärän muutoksen havaitseminen*

Aika	Lukumäärän muutos					
	2 vs. 1			2 vs. 3		
	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2
100–198 ms	2.252	.142	.056	.001	.973	.000
200–298 ms	.884	.353	.023	3.566	.067	.086
300–398 ms	.711	.404	.018	1.325	.257	.034
400–498 ms	1.876	.179	.047	.973	.330	.025
500–598 ms	.347	.560	.009	.678	.415	.018
600–698 ms	1.767	.192	.044	1.257	.269	.032
700–798 ms	3.080	.087	.076	.716	.403	.019

3.2 Iän vaikutus pienten lukumäärien muutosten havaitsemiseen vastasyntyneen ja kuuden kuukauden iässä

Tutkimamme toinen tavoite oli selvittää, tapahtuuko muutoksen havaitsemisessa muutoksia verrattaessa vastasyntyneitä ja kuuden kuukauden ikäisiä. Huomioon otettiin kaikki ne tutkittavat, jotka olivat osallistuneet molempiin mittauskertoihin ($N = 31$). Analyysia varten muodostettiin erotusmuuttujat jokaiselle aikavälille vähentämällä standardiärsykkeestä 1-osainen devianttiärsyke tai 3-osainen devianttiärsyke. Aluksi tarkasteltiin toistettujen mittausten varianssianalyysillä, onko iällä tilastollisesti merkitsevää vaikutusta lukumäärän muutoksesta seuraaviin aivovasteisiin. Vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten erotusmuuttujien suuruuden ero oli tilastollisesti merkitsevä aikavälillä 700–798 ms ärsykkeen alkamisen jälkeen, kun kyseessä oli standardiärsykkeestä ja 1-osaisesta devianttiärsykkeestä muodostetut erotusmuuttujat (Taulukko 4). Vastasyntyneille ja kuuden kuukauden ikäisille muodostetut erotusmuuttujat standardiärsykkeestä ja 3-osaisesta devianttiärsykkeestä eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi millään tarkastellulla aikavälillä. Efektikoon suuruus oli kuitenkin kohtalainen kaikilla muilla aikaväleillä paitsi 100–198 ms ja 500–598 ms ärsykkeen alkamisen jälkeen.

Taulukko 4. *Iän vaikutus lukumäärän muutoksen havaitsemiseen*

Aika	Iän vaikutus					
	2 vs. 1			2 vs. 3		
	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2	<i>F</i>	<i>p</i>	η_p^2
100–198 ms	1.660	.207	.052	.039	.844	.001
200–298 ms	.556	.463	.018	2.248	.144	.070
300–398 ms	.278	.602	.009	2.131	.155	.066
400–498 ms	2.388	.133	.074	4.119	.051	.121
500–598 ms	.014	.907	.000	.018	.895	.001
600–698 ms	3.004	.093	.091	3.454	.073	.103
700–798 ms	5.974	.021	.166	2.223	.146	.069

Tämän jälkeen tarkasteltiin eri aivovasteiden samankaltaisuutta vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten aikavälien välillä. Tarkastelut tehtiin erikseen kanaville P3 ja P4. Tähän käytettiin hyväksi Pearsonin korrelaatiota. Standardiärsykkeistä ja 1-osaisista devianttiärsykkeistä muodostettujen erotusmuuttujien korrelaatiot vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten välillä eivät olleet tilastollisesti merkitseviä kanavalla P3 (Taulukko 5).

Taulukko 5. *Korrelaatiot standardiärsykkeistä ja 1-osaisista devianttiärsykkeistä muodostettujen erotusmuuttujien välillä kanavalla P3.*

	0 kk 100– 198 ms	0 kk 200– 298 ms	0 kk 300– 398 ms	0 kk 400– 498 ms	0 kk 500– 598 ms	0 kk 600– 698 ms	0 kk 700– 798 ms
6 kk 100– 198 ms	-.007	-.024	-.006	-.023	-.205	-.184	.085
6 kk 200– 298 ms	.023	.031	.050	.015	-.215	-.242	.069
6 kk 300– 398 ms	.094	.039	.036	.079	-.110	-.121	.089
6 kk 400– 498 ms	.306	.310	.247	.125	-.051	.047	.045
6 kk 500– 598 ms	.074	.071	-.039	-.204	-.325	-.082	.175
6 kk 600– 698 ms	.107	.152	.031	-.104	-.106	.063	-.006
6 kk 700– 798 ms	.049	-.005	-.133	-.083	-.079	-.016	.017

Kanavalla P4 standardiärsykkeistä ja 1-osaisista devianttiärsykkeistä muodostetut erotusmuuttajat korreloivat vain vastasyntyneiden aikavälin 400–498 ms ja kuuden kuukauden ikäisten aikavälin 300–398 ms välillä (Taulukko 6).

Taulukko 6. Korrelaatiot standardiärsykkeistä ja 1-osaisista devianttiärsykkeistä muodostettujen erotusmuuttajien välillä kanavalla P4

	0 kk 100– 198 ms	0 kk 200– 298 ms	0 kk 300– 398 ms	0 kk 400– 498 ms	0 kk 500– 598 ms	0 kk 600– 698 ms	0 kk 700– 798 ms
6 kk 100– 198 ms	-.002	-.120	-.345	-.100	.093	.144	.107
6 kk 200– 298 ms	.050	-.113	-.107	.149	.142	.190	.238
6 kk 300– 398 ms	.091	.089	.164	.380*	.315	.173	.126
6 kk 400– 498 ms	.094	.135	.132	.285	.228	.085	.102
6 kk 500– 598 ms	.003	-.097	-.025	.174	.116	.002	.083
6 kk 600– 698 ms	.047	.045	-.030	.197	.158	.149	.054
6 kk 700– 798 ms	.083	-.031	-.242	-.218	-.211	-.008	-.095

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Kanavan P3 standardiärsykkeistä ja 3-osaisista devianttiärsykkeistä muodostettujen erotusmuuttajien kohdalla vastasyntyneiden myöhäisemmät aikavälit korreloivat positiivisesti kuuden kuukauden ikäisten aikaisempien aikavälien kanssa (Taulukko 7). Lisäksi vastasyntyneiden aikaisemmat aikavälit korreloivat positiivisesti kuuden kuukauden ikäisten aikavälin 700–798 ms kanssa.

Taulukko 7. Korrelaatiot standardiärsykkeistä ja 3-osaisista devianttiärsykkeistä muodostettujen erotusmuuttujien välillä kanavalla P3

	0 kk 100– 198 ms	0 kk 200– 298 ms	0 kk 300– 398 ms	0 kk 400– 498 ms	0 kk 500– 598 ms	0 kk 600– 698 ms	0 kk 700– 798 ms
6 kk 100– 198 ms	.034	.203	.388	.716***	.551**	.454*	.441*
6 kk 200– 298 ms	.231	.382*	.379*	.616***	.328	.178	.359*
6 kk 300– 398 ms	.034	.253	.402*	.563***	.382*	.057	.188
6 kk 400– 498 ms	.020	.238	.375*	.559**	.311	.003	.112
6 kk 500– 598 ms	-.003	.223	.333	.550**	.262	-.051	.052
6 kk 600– 698 ms	.232	.323	.273	.362*	.099	-.161	.043
6 kk 700– 798 ms	.377*	.394*	.234	.322	.168	.065	.115

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

Kanavalla P4 standardiärsykkeistä ja 3-osaisista devianttiärsykkeistä muodostetut erotusmuuttujat korreloivat negatiivisesti vastasyntyneiden aikavälin 300–398 ms ja kuuden kuukauden ikäisten aikavälin 500–598 ms välillä sekä vastasyntyneiden aikavälillä 600–698 ms ja kuuden kuukauden ikäisten aikavälin 700–798 ms välillä (Taulukko 8).

Taulukko 8. Korrelaatiot standardiärsykkeistä ja 3-osaisista devianttiärsykkeistä muodostettujen erotusmuuttujien välillä kanavalla P4

	0 kk 100– 198 ms	0 kk 200– 298 ms	0 kk 300– 398 ms	0 kk 400– 498 ms	0 kk 500– 598 ms	0 kk 600– 698 ms	0 kk 700– 798 ms
6 kk 100– 198 ms	-.015	-.038	-.043	.016	.134	.243	.135
6 kk 200– 298 ms	.072	.110	.000	-.021	.051	.018	.007
6 kk 300– 398 ms	.074	.083	-.062	-.171	-.123	-.239	-.177
6 kk 400– 498 ms	-.098	-.065	-.218	-.295	-.310	-.300	-.114
6 kk 500– 598 ms	-.175	-.272	-.397*	-.248	-.184	-.207	-.164
6 kk 600– 698 ms	.031	-.039	-.193	-.202	-.170	-.308	-.179
6 kk 700– 798 ms	-.025	-.118	-.296	-.177	-.221	-.358*	-.193

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

4. POHDINTA

4.1 Lukumäärän muutoksen havaitseminen

Tutkimuksessa haluttiin selvittää vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten pienten lukujen lukumäärän muutoksen havaitsemista. ERP-vasteiden tarkastelussa vastasyntyneillä kanavalla P3 havaittiin 1-osaisen devianttiärsykkeen kohdalla hidaskomponentti, mikä viittaisi siihen, että vastasyntyneet havaitsevat muutoksen lukumäärien yksi ja kaksi välillä. 3-osainen devianttiärsyke ei taas näyttänyt tuottavan samanlaista MMR-vastetta. Kanavalla P4 ei vastasyntyneiden ERP-vasteissa ollut havaittavissa pitkää hidaskomponenttia kummankaan devianttiärsykkeen kohdalla. Kuuden kuukauden iässä ERP-vasteet muistuttivat molemmilla kanavilla hyvin paljon toisiaan, mikä viittaisi siihen, ettei muutoksen havaitsemisessa esiinny suuria eroja eri aivopuoliskojen välillä. MMR-vasteet ovat aikaisemman tutkimuksen mukaan vahvimmillaan oikealla aivopuoliskolla (Čeponiene ym., 2002; Cheour-Luhtanen ym., 1996; Edwards ym., 2016; Hyde ym., 2010; Izard ym., 2008), mutta meidän tutkimuksessamme ei tällaista havaittu. EEG ei kuitenkaan ole paras metodi vasteiden lähteiden tarkan sijainnin paikantamiseen, koska rajatunkin aivorakenteen aiheuttama sähkökenttä leviää pään kudoksissa laajoina aaltoina, minkä takia sen lähdettä ei voida suoraan päätellä EEG-vasteista ilman erityistä lähteenpaikannusanalyysiä.

Oletimme, että niin vastasyntyneet kuin kuuden kuukauden ikäiset kykenisivät erottamaan lukumäärät yksi ja kolme lukumäärästä kaksi. Tulostemme mukaan näyttäisi kuitenkin siltä, että vastasyntyneet havaitsevat muutoksen lukumäärien yksi ja kaksi välillä, mutta eivät lukumäärien kaksi ja kolme välillä. Tämä on ristiriidassa aikaisempaan tutkimukseen, joka puoltaa vastasyntyneiden kykyä erottaa myös lukumäärät kaksi ja kolme toisistaan (Dehaene, 2011a; Koponen ym., 2023). Tuloksemme voi johtua esimerkiksi siitä, että aikaisemmat tutkimukset ovat käyttäneet hyväksi visuaalisia koeasetelmia, kun taas meidän koeasetelmamme oli auditiivinen. Aivovasteiden herkkyys visuaalisiin ja auditiivisiin ärsykkeisiin voi olla erilaisia (Ding ym., 2021), ja tämän takia lukumäärän muutoksen havaitsemisesta seuraavat vasteet voivat olla voimakkaampia yhdessä koeasetelmassa ja heikompia toisessa.

Kuuden kuukauden ikäiset sen sijaan eivät meidän tulosten perusteella havaitse eroa lukumäärien yksi ja kaksi tai kaksi ja kolme välillä. Emme kuitenkaan usko, että lukumäärän muutoksen havaitseminen häviäisi minnekään vauvan aivojen kehittymisen myötä. Saadullemme tulokselle voi olla monta eri selitystä. Tulokset voivat selittyä osin sillä, että kuuden kuukauden ikäisiä tutkittavia oli vähemmän, jolloin testien tilastollinen voima tunnistaa eroja on heikompi. Myös

koetilanteen erilaisuus voi selittää sitä, ettei kuuden kuukauden ikäisiltä saatu merkitseviä tuloksia. Mittaus suoritettiin vastasyntyneiltä nukkuessa, kun kuuden kuukauden ikäiset taas olivat hereillä, katselivat leluja ja saattoivat liikkua mittauksen aikana, jolloin huomion kiinnittyminen ääniin ainakin ajoittain ja muusta toiminnasta tulleet häiriöt saattoivat heikentää lukumäärän erottamisen vasteiden näkymistä. Tähän tulee kiinnittää huomiota jatkossa puolivuotiaiden aineiston käsittelyssä.

Vauvojen aivot ja tätä myöten myös aivovasteet kehittyvät myös eri tahtiin, ja kuuden kuukauden iässä osan tutkittavista vasteet voivat muistuttaa enemmän joko vastasyntyneille tyypillistä pitkää hidasta aaltoa tai aikuismaista MMN-vastetta (Trainor ym., 2003). Yksilöerot vastasyntyneinä voivat olla vähäisempiä kuin kuuden kuukauden iässä, koska ympäristöllä on ollut enemmän aikaa vaikuttaa vauvan kehitykseen ja täten aloittaa erilaisten kehityspolkujen suunnat. EEG-datan kohina, vauvojen kehitykselliset erot ja ympäristön vaikutus kehitykseen voivat olla syynä siihen, että emme saaneetkaan tilastollisesti merkitseviä tuloksia kuuden kuukauden ikäisten osalta. Tämän takia emme voi sanoa, että he eivät havaitsisi pienten lukumäärien muutosta lainkaan.

4.2 Iän vaikutus lukumäärän muutoksen havaitsemiseen

Halusimme myös selvittää, tapahtuuko pienten lukumäärien muutoksen havaitsemisessa muutosta vastasyntyneen ja kuuden kuukauden ikäisen välillä. ERP-vasteiden tarkastelussa havaittiin, että vastasyntyneillä kanavalla P3 1-osaisen devianttiärsykkeen tuottama vaste muistutti aiemmassa tutkimuksessa havaittua, vastasyntyneillä muutoksen havaitsemisesta tyypillisesti syntyvää pitkää hidasta positiivista vastetta. Kuuden kuukauden iässä ERP-vasteissa ei ollut enää havaittavissa tällaista hidasta positiivista aaltoa, vaan 1-osaisen devianttiärsykkeen muoto muistutti jo enemmän aikuisilla esiintyvän MMN-vasteen muotoa. Poikkeavuusvasteiden komponentit (varhainen negatiivisuus, keskeinen positiivisuus ja myöhäinen negatiivisuus) esiintyivät kuitenkin huomattavasti hitaammin kuin aiemmissa tutkimuksissa havaitut aikuisten MMN-vasteen komponentit. Auditivisen lukumäärän havaitsemisen synnyttämät poikkeavuusvasteet näyttäisivät ERP-vasteiden tarkastelun perusteella muuttuvan huomattavasti ensimmäisten kuuden elinkuukauden aikana, mutta poikkeavuusvasteet eivät puolen vuoden iässä ole vielä täysin samanlaisia kuin aikuisten MMN-vasteet.

Oletimme, että muutoksesta seuraava vaste aikaistuisi näiden kahden mittauskerran välillä, ja että vaste alkaisi muistuttaa vastasyntyneen pitkän hitaan positiivisen aallon sijasta aikuismaista MMN-vastetta. Iällä näyttäisi tulostemme pohjalta olevan tilastollisesti merkitsevää vaikutusta 700–798 ms ärsykkeen jälkeen, kun ero on lukumäärien kaksi ja yksi välillä. Iällä ei ollut tilastollista

merkitsevyyttä lukumäärien kaksi ja kolme eron havaitsemisessa, mutta efektikokoon suuruus oli kuitenkin kohtalaista kaikilla muilla aikaväleillä paitsi 100–198 ms ja 500–598 ms ärsykkeen jälkeen. Koska tutkimuksemme otoskoko oli toiseen tutkimuskysymykseen vastatessamme vain 31, tilastollisesti merkitsevien tulosten puute voi johtua esimerkiksi tutkittavien vähäisestä määrästä. Aikaisemmin jo mainitut EEG-datan kohina, vauvojen kehitykselliset erot ja ympäristön vaikutus kehitykseen voivat myös voineet vaikeuttaa vertailua vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten välillä. Iän vaikutus myöhäisellä aikavälillä ärsykkeen jälkeen kuitenkin tukee hypoteesiamme siitä, että kuuden kuukauden iässä muutoksen havaitsemisvaste aikaistuu verrattuna vastasyntyneeseen.

Korrelaatiotarkasteluissa nousi esille se, että yksiosaiset muuttujat eivät näyttäisi korreloivan minkään aikavälin välillä keskenään, kun vertaillaan vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisiä vauvoja. Sen sijaan kanavalla P3 vastasyntyneiden kolmiosaisen ärsykkeiden myöhäiset aikavälit korreloivat positiivisesti kuuden kuukauden aikaisten aikavälien kanssa. Tulosten pohjalta voisi olettaa, että näissä ajankohdissa on samanlaista prosessointia, ja kanavalla P3 muutoksen havaitsemisvaste muuttuu iän myötä aikaisemmaksi kolmiosaisen ärsykkeen osalta. Kanavan P4 kolmiosaiset ärsykkeet sen sijaan poikkeavat muista korrelaatiotuloksista sillä, että lähes kaikki korrelaatiot eri ikäisten aikavälien välillä olivat negatiivisia. Tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita oli kuitenkin vain kahden aikaväliä välillä. On hyvä kuitenkin muistaa, että korrelaatioissa yksittäiset tulokset voivat johtua sattumasta, ja korrelaatioiden löytyminen tai puuttuminen voi johtua monesta eri syystä. Yksittäiset poikkeavat havaintoarvot voivat vaikuttaa suuresti korrelaatiokertoimen arvoon, ja näitä voi olla erityisesti kuuden kuukauden ikäisten herätevasteissa niiden luonteen vuoksi.

4.3 Tutkimuksen vahvuudet ja rajoitteet

Vaikka vastasyntyneet ja kuuden kuukauden ikäiset yrittävät parhaansa kommunikoida ymmärrettävästi muiden ihmisten kanssa, ilman aivokuvantamismenetelmiä olisi mahdotonta tutkia esimerkiksi heidän kykyään erotella lukumääriä toisistansa. EEG:n käyttäminen siis mahdollistaa pienten vauvojen tutkimisen, eikä siitä aiheudu tutkittavalle muuta epämukavuutta kuin EEG-myssyn pitäminen päässä menetelmän noninvasiivisen luonteen vuoksi. Samojen vauvojen tutkiminen niin vastasyntyneenä kuin kuuden kuukauden iässä mahdollistaa muutoksen tutkimisen, ja hankkeen jatkuessa myös meidän löydösten yhdistämisen tutkittavien matemaattisiin taitoihin esimerkiksi kahden vuoden iässä. Tutkimuksemme tarjoaa uutta tietoa, sillä aiempaa vauvoilla tehtyä EEG-tutkimusta koskien auditiivisten pienten lukumäärien erottelua on tehty hyvin vähän.

Multi-feature paradigmaa on käytetty paljon ääniärsykkeiden muutosvasteiden tutkimukseen (esim. Lovio ym., 2009; Näätänen ym., 2004; Partanen ym., 2013), joten sen toimivuudesta on vahvoja näyttöjä. Paradigman käyttö on todettu lupaavaksi vastasyntyneiden kuuloerottelukyvyn tutkimiseen (mm. lukihäiriöriskin omaavilla vauvoilla), sillä vastasyntyneiden on havaittu kykenevän erottamaan saman paradigman sisällä esiintyviä erilaisia poikkeamia (Sambeth ym., 2009). Esimerkiksi Lovio (2013) tutki multi-feature paradigman avulla puheäänissä tapahtuvien muutosten erottelua. Hänen käyttämässään paradigmoissa toistui standardiärsyke /pi:/ tai /te:/ sekä devianttiärsykkeet, joissa muuttui ärsykkeen keston, taajuuden tai voimakkuuden lisäksi tavussa käytetty vokaali (/pe:/ tai /ti:/) tai konsonantti (/ti:/ tai /pe:/). Tämä puoltaa meidän käyttämämme paradigman soveltuvuutta ja luotettavuutta lukumäärän muutoksen havaitsemisen tutkimiseen.

Vahvuutena tutkimuksessa on myös audittiivinen koetilanne, jonka ääniärsykkeistä syntyvät vasteet ilmenevät siitä huolimatta, siirtykö tutkittavan tarkkaavaisuus pois esimerkiksi visuaalisissa kokeissa käytetystä tietokoneen ruudusta. Koetilanteen käyttö lukumäärän muutoksen havaitsemisen tutkimiseen oli tutkielmassa tärkeää myös sen ainutlaatuisuuden vuoksi, mutta tämä voi herättää myös pohdintaa sen toimivuudesta. Tuloksemme olivat ristiriidassa aikaisemman tiedon kanssa, jonka mukaan jo vastasyntyneet kykenisivät erottelemaan lukumäärät kaksi ja kolme toisistaan (Dehaene, 2011a; Koponen ym., 2023). Visuaalisten ja audittiivisten ärsykkeiden erilaisuus voisi olla yksi syy eriävälle tuloksille, mutta audittiivisten tutkimuksien puutteen takia emme voi olla tästä varmoja. Audittiivisessa koetilanteessa ärsykkeet tulevat peräkkäin, mutta visuaalisessa koetilanteessa muutos on heti nähtävissä. Tällä on voinut olla vaikutusta siihen, miten hyvin vauva kykenee havaitsemaan lukumäärää. 1-osaisen ja 3-osaisen ärsykkeen tuottamaa vastetta voi siis olla vaikeaa vertailla ärsykkeiden erilaisten pituuksien takia. On myös mahdollista, että tutkielmassamme käsitellyt vasteet ovat syntyneet reaktiona jollekin muulle ääniärsykkeen ominaisuudelle kuin lukumäärälle. Varmojen johtopäätöksien tekemistä vaikeuttaa myös otoksen pieni koko ja sen mahdollinen vinoutuneisuus. On mahdollista, että ne perheet, joilla on matemaattisia vaikeuksia, eivät välttämättä uskalla osallistua tutkimukseen epäonnistumisen pelon takia.

Myös koetilanteen erilaisuus eri ikävaiheissa aiheutti rajoitteita johtopäätösten tekemiseen. Vastasyntyneenä mittaus suoritettiin nukkuessa, jolloin he eivät tietoisesti kiinnittäneet ääniin huomiota, eikä dataan aiheutunut heidän liikkeistään juurikaan häiriöitä. Puolivuotiaina vauvat taas olivat hereillä, he liikkuvat ja heitä viihdytettiin leluilla, jolloin he saattoivat ajoittain kiinnittää huomiota ääniin, ja liike aiheutti paljon häiriöitä EEG-dataan. Suuri liikehäiriön määrä heikentää vasteiden näkymistä kuuden kuukauden ikäisillä sekä vasteiden muuttuminen lyhyempikestoisiksi (vrt. 100ms analyysiaikavälit) vaikeutti vasteiden vertailua vastasyntyneen ja kuuden kuukauden iän välillä.

4.4 Yleistettävyyden ja jatkotutkimusehdotukset

Tutkimuksemme on onnistunut lisäämään teoretietoa hyvin vähän tutkittuun aiheeseen. Vaikka tulokset eivät olleetkaan täysin hypoteesimme mukaisia, niin löytömmme antavat mielenkiintoisen näkökulman pienen vauvan kehittyviin aivoihin. Lisäksi EarlyMath –hanke on yhä käynnissä, joten tuloksemme ja kohtaamamme haasteet voivat auttaa tulevien mittausten suunnittelussa ja antaa esimerkkejä siitä, mitä voisi muuttaa. Esimerkiksi EEG-dataa olisi hyvä saada siistittyä ennestään ja keksiä keinoja siihen, miten kuuden kuukauden ikäisiä voisi pitää paremmin paikallaan. Olemme myös ensimmäisten joukossa päässeet käyttämään multi-feature oddball paradigmaa lukumäärän muutoksen havaitsemisen tutkimukseen, ja antaneet näyttöä sen toimivuudesta.

Koska lukumäärän muutoksen havaitsemista auditivisessa koetilanteessa ja pienillä vauvoilla on tutkittu niin vähän, mahdollisuudet jatkotutkimuksille ovat runsaat. EarlyMathin Vauvan ensiaskeleet matematiikkaan –osahanke on yhä käynnissä ja tutkittavia tulee jatkuvasti lisää. Tämän takia voisi olla mielekästä tehdä tutkimukselle analyysit uudestaan isommalla ja täten luotettavammalla otoskoolla. Samojen vauvojen seuraaminen monen vuoden ajan mahdollistaisi myös sen tutkimisen, vaikuttaako vastasyntyneen kyky havaita lukumäärän muutosta myöhempään matemaattisiin taitoihin. Tähän liittyen olisi myös mielenkiintoista selvittää, pystyykö vauva-ajan aivovasteista ennustamaan matemaattisten vaikeuksien ilmenemistä tulevaisuudessa. Näiden avulla pystyttäisiin saada lisätietoa vielä paremmin matemaattisten vaikeuksien neuraalisesta pohjasta, ja suunnittelemaan tehokkaita ja varhaisia interventioita vaikeuksien helpottamiseksi jo ennen kouluikää.

Multi-feature paradigman käytön ansiosta olisi kiinnostavaa tutkia muiden äänenominaisuuden muutosten, kuten taajuus- tai intensiteetti muutoksen, ja lukumäärän muutoksen aiheuttaman aivovasteen yhteyksiä tai eroavaisuuksia. Tämä auttaisi varmistamaan, että vasteet syntyvät reaktiona juuri lukumäärän muutokseen. Lisäksi olisi mielenkiintoista tutkia auditivisissa ja visuaalisissa koeasetelmissa syntyneiden aivovasteita ja vertailla niitä toisiinsa. Molempien koeasetelmien käyttö mahdollistaisi paremman kokonaiskuvan luomisen muutoksen havaitsemisesta.

4.5 Johtopäätökset

Ihminen kykenee heti syntymän jälkeen havaitsemaan lukumäärän muutosta, ja muutoksesta seuraavat poikkeavuusvasteet muuttuvat jo ensimmäisten kuuden elinkuukauden aikana muistuttamaan enemmän aikuismaisia poikkeavuusvasteita. Vastasyntyneet havaitsevat lukumäärien muutoksen auditivisessa koetilanteessa lukujen kaksi ja yksi välillä, mutta eivät lukujen kaksi ja

kolme välillä. Kuuden kuukauden ikäisiltä ei saatu tilastollisesti merkitseviä tuloksia, johtuen mahdollisesti tutkittavien vähyydestä, EEG-datan kohinasta ja vasteiden kehitysasteiden erilaisuudesta. Iällä on merkitystä lukumäärän muutoksen havaitsemisessa vastasyntyneiden ja kuuden kuukauden ikäisten välillä. Vastasyntyneillä esiintyvää MMR-vastetta ei esiinny enää kuuden kuukauden iässä, vaan poikkeavuusvaste alkaa muistuttamaan aikuismaista MMN-vastetta 1-osaisen ärsykkeen kohdalla.

Lukumäärän muutoksen havaitsemista täytyy tutkia tulevaisuudessa vielä enemmän ja mahdollisimman monipuolisilla koeasetelmilla. Visuaalisen ja auditiivisen lukumäärän muutoksen havaitseminen voi olla erilaista ärsykkeiden erilaisten ominaisuuksien takia, joten niitä yhdistelevälle tutkimukselle on tarvetta. Erilaisten aivokuvantamismenetelmien käyttö mahdollistaa myös luomaan paremman kokonaiskuvan lukumäärän muutoksen havaitsemisesta, ja esimerkiksi ilmiön paikantamisen tiettyyn aivojen osaan. Tutkimuksemme kiinnostuksen kohteet kytkeytyvät laajemmin matemaattisten taitojen kehittymiseen ja antavat kuvaa niiden neuraalisesta pohjasta. Ymmärrys matemaattisten taitojen neuraalisesta pohjasta auttaa vähentämään stigmaa ja epävarmuutta matemaattisiin vaikeuksiin liittyen. Ongelmien varhainen tunnistaminen myös mahdollistaa tuen ja avun tarjoamisen varhaisessa vaiheessa, parhaassa tapauksessa jo ennen matematiikkaan liittyvän ahdistuneisuuden tai välttämiskäyttäytymisen ilmaantumista.

LÄHTEET

- Ahonen, T., Aro, M., Aro, T., Lerkkanen M-K., & Siiskonen, T. (toim.) (2023). *Oppimisen vaikeudet*. 4. Painos. Niilo Mäki Instituutti
- Banich, M., & Compton, R. (2018). *Cognitive Neuroscience* (4th ed.). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316664018
- Cantalon, J. F., Brannon, E. M., Carter E. J., & Pelphrey K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and four-year-old children. *PLoS Biology*, 4(5), 844–854. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040125>
- Carey, S. (2004). Bootstrapping & the Origin of Concepts. *Daedalus*, 133(1), 59–68. <http://www.jstor.org/stable/20027897>
- Čeponiene, R., Kushnerenko, E., Fellman, V., Renlund, M., Suominen, K., & Näätänen, R. (2002). Event-related potential features indexing central auditory discrimination by newborns. *Cognitive Brain Research*, 13(1), 101–113. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(01\)00093-3](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(01)00093-3)
- Cheour-Luhtanen, M., Alho, K., Sainio, K., Rinne, T., & Reinikainen, K. (1996). The ontogenetically earliest discriminative response of the human brain. *Psychophysiology*, 33(4), 478–481. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1996.tb01074.x>
- Cohen Kadosh, R., Lammertyn, J., & Izard, V. (2008). Are numbers special? An overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. *Progress in Neurobiology*, 84(2), 132–147. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2007.11.001>
- Cordes, S., & Brannon, E. M. (2009). Crossing the divide: Infants discriminate small from large numerosities. *Developmental Psychology*, 45(6), 1583–1594. <https://doi.org/10.1037/a0015666>
- Dehaene, S. (2011). *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics, Revised and Updated Edition*. Oxford University Press, Incorporated.
- Dehaene, S. (2011a). Babies Who Count. Kirjassa Dehaene, S. (2011). *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics, Revised and Updated Edition*. Oxford University Press, Incorporated. 30–52.
- Dehaene, S. (2011b). Talented and Gifted Animals. Kirjassa Dehaene, S. (2011). *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics, Revised and Updated Edition*. Oxford University Press, Incorporated. 3–29.
- Ding, Y., Wu, Y., & Zhang, T. (2021). Selecting Audio and Visual Stimuli: What Do We Prefer If They Happened Simultaneously? *Proceedings of the 2021 4th International Conference on Humanities Education and Social Sciences* (ICHESS 2021). 2126–2130. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.211220.366>
- Dubois, J., Dehaene-Lembert, G., Kulikova, S., Poupon, C., Hüppi, P. S., & Hertz-Pannier, L. (2014). The early development of brain white matter: A review of imaging studies in fetuses, newborns and infants. *Neuroscience*, 276, 48–71. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.12.044>
- Edwards, L. A., Wagner, J. B., Simon, C. E., & Hyde, D. C. (2016). Functional brain organization for number processing in pre-verbal infants. *Developmental Science*, 19(5), 757–769. <https://doi.org/10.1111/desc.12333>
- Escera, C., Alho, K., Schröger, E., & Winkler, I. (2000). Involuntary attention and distractibility as evaluated with event-related brain potentials. *Audiology & Neurotology*, 5(3–4), 151–166. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1159/000013877>
- Feigenson, L., Dehaene S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>

- Gao, W., Alcauter, S., Elton, A., Hernandez-Castillo, C. R., Smith, J. K., Ramirez, J., & Lin, W. (2014). Functional Network Development During the First Year: Relative Sequence and Socioeconomic Correlations. *Cerebral Cortex*, 25(9), 2919–2928, <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu088>
- Gennari, G., Dehaene, S., Valera, C., & Dehaene-Lambertz, G. (2023). Spontaneous supra-modal encoding of number in the infant brain. *Current Biology*, 33(10), 1906-1915.e6. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.03.062>
- Gilley, P. M., Uhler, K., Watson, K., & Yoshinaga-Itano, C. (2017). Spectral-temporal EEG dynamics of speech discrimination processing in infants during sleep. *BMC neuroscience*, 18, 1-17. <https://doi.org/10.1186/s12868-017-0353-4>
- Gilmore, J. H., Lin, W., Prastawa, M. W., Looney, C. B., Vetsa, Y. S. K., Knickmeyer, R. C., Evans, D. D., Smith, J. K., Hamer, R. M., Lieberman, J. A., & Gerig, G. (2007). Regional Gray Matter Growth, Sexual Dimorphism, and Cerebral Asymmetry in the Neonatal Brain. *The Journal of Neuroscience*, 27(6), 1255–1260. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3339-06.2007>
- Háden, G. P., Németh, R., Török, M., & Winkler, I. (2016). Mismatch response (MMR) in neonates: Beyond refractoriness. *Biological Psychology*, 117, 26–31. <https://doi.org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.biopsycho.2016.02.004>
- Háden, G. P., Németh, R., Török, M., & Winkler, I. (2015). Predictive processing of pitch trends in newborn infants. *Brain Research*, 1626, 14–20. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.02.048>
- He, C., Hotson, L., & Trainor, L. J. (2007) Mismatch Responses to Pitch Changes in Early Infancy. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(5), 878–892. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.5.878>
- Hyde, D. C. (2011). Two systems of non-symbolic numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, Article 150. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00150>
- Hyde, D. C., Boas, D. A., Blair, C., & Carey, S. (2010). Near-infrared spectroscopy shows right parietal specialization for number in pre-verbal infants. *NeuroImage*, 53(2), 647-652. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.030>
- Hyde, D. C., Simon, C. E., Berteletti, I., & Mou, Y. (2017). The relationship between non-verbal systems of number and counting development: A neural signatures approach. *Developmental Science*, 20(6), e12464. <https://doi.org/10.1111/desc.12464>
- Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2011). Neural signatures of number processing in human infants:evidence for two core systems underlying numerical cognition. *Developmental Science*, 14(2), 360–371. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00987.x>
- Hämäläinen, J. A., Lohvansuu, K., Ervast, L. & Leppänen, P. H.T. (2015). Event-related potentials to tones show differences between children with multiple risk factors for dyslexia and control children before the onset of formal reading instruction. *International Journal of Psychophysiology*, 95(2), 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2014.04.004>
- Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in 3-month-old infants. *PLOS Biology*, 6, 275-285. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060011>
- Kailaheimo-Lönnqvist, L., Virtala, P., Fandakova, Y., Partanen, E., Leppänen, P. H. T., Thiede, A., & Kujala, T. (2020). Infant event-related potentials to speech are associated with prelinguistic development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2020.100831>
- Kappenman, E. S., & Luck, S. J. (2012). ERP Components: The Ups and Downs of Brainwave Recordings. Teoksessa E. S. Kappenman & S. J. Luck (Toim.), *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. Oxford Library of Psychology. (2011; verkkoversio, Oxford Academic, 18. Syyskuuta 2012).

- <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0014>, viitattu 23. Marraskuuta 2023.
- Koponen, T., Salminen, J., & Sorvo, R. (2023). Matematiikan perustaitojen oppimisvaikeudet. Teoksessa Ahonen, T., Aro, M., Aro, T., Lerkkanen M-K., & Siiskonen, T. (toim.) (2023). *Oppimisen vaikeudet*. 4. Painos. Niilo Mäki Instituutti. 324–349.
- Kushnerenko, E., Winkler, I., Horváth, J., Näätänen, R., Pavlov, I., Fellman, V., & Huotilainen, M. (2007). Processing acoustic change and novelty in newborn infants. *European Journal of Neuroscience*, 26(1), 265–274. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1111/j.1460-9568.2007.05628.x>
- Leppänen, P. H.T., Hämäläinen, J. A., Salminen, H. K., Eklund, K. M., Guttorm, T. K., Lohvansuu, K., Puolakanaho, A., & Lyytinen, H. (2010). Newborn brain event-related potentials revealing atypical processing of sound frequency and the subsequent association with later literacy skills in children with familial dyslexia. *Cortex*, 46(10), 1362–1376. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.06.003>.
- Li, G., Liu, T., Ni, D., Lin, W., Gilmore, J. H., Shen, D. (2015). Spatiotemporal patterns of cortical fiber density in developing infants, and their relationship with cortical thickness. *Human Brain Mapping*, 36(12), 5183–5195. <https://doi.org/10.1002/hbm.23003>
- Lohvansuu, K., Torppa, M., Ahonen, T., Eklund, K., Hämäläinen, J. A., Leppänen, P. H. T., & Lyytinen, H. (2021). Unveiling the Mysteries of Dyslexia : Lessons Learned from the Prospective Jyväskylä Longitudinal Study of Dyslexia. *Brain Sciences*, 11(4), Artikkelin 427. <https://doi.org/10.3390/brainsci11040427>
- Lovio, R. (2013). Cortical multi-attribute auditory discrimination deficits and their amelioration in dyslexia [väitöskirja, Helsingin yliopisto]. HELDA-julkaisuarkisto. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-10-9023-3>
- Lovio, R., Pakarinen, S., Huotilainen, M., Alku, P., Silvennoinen, S., Näätänen, R., & Kujala, T. (2009). Auditory discrimination profiles of speech sound changes in 6-year-old children as determined with the multi-feature MMN paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 120(5), 916–921. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2009.03.010>
- LukiMat. (ei pvm.). *Lukumääräisyyden taju*. <http://www.lukimat.fi/matematiikka/tietopalvelu/taitojen-kehitys/lukumaaraisyyden-taju/lukumaaraisyyden-taju>. Katsottu 7.12.2023
- Lyytinen, H., Erskine, J., Hämäläinen, J., Torppa, M., Ronimus, M. (2015). Dyslexia: Early Identification and Prevention: Highlights from the Jyväskylä Longitudinal Study of Dyslexia. *Current Developmental Disorders Report*, 2, 330–338. <https://doi.org/10.1007/s40474-015-0067-1>
- Näätänen, R., & Kreegipuu, K. (2012). The Mismatch Negativity (MMN). Teoksessa E. S. Kappenman & S. J. Luck (Toim.), *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. Oxford Library of Psychology. (2011; verkkoversio, Oxford Academic, 18 syyskuuta 2012). <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0081>, viitattu 28. Marraskuuta 2023.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.026>
- Näätänen, R., Pakarinen, S., Rinne, T., & Takegata, R. (2004). The mismatch negativity (MMN): Towards the optimal paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 115(1), 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2003.04.001>
- Partanen, E., Pakarinen, S., Kujala, T., & Huotilainen, M. (2013). Infants’ brain responses for speech sound changes in fast multifeature MMN paradigm. *Clinical Neurophysiology*, 124(8), 1578–1585. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2013.02.014>

- Ponton, C. W., Eggermont, J. J., Don, M., Waring, M. D., Kwong, B., Cunningham, J., & Trautwein, P. (2000). Maturation of the mismatch negativity: Effects of profound deafness and cochlear implant use. *Audiology & Neurotology*, 5(3–4), 167–185. <https://doi.org.ezproxy.jyu.fi/10.1159/000013878>
- Pratt, H. (2012). Sensory ERP Components. Teoksessa E. S. Kappenman & S. J. Luck (Toim.), *The Oxford Handbook of Event-Related Potential Components*. Oxford Library of Psychology. (2011; verkkoversio, Oxford Academic, 18 syyskuuta 2012). <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195374148.013.0050>, viitattu 26. Marraskuuta 2023.
- Ruusuvirta, T., Huotilainen, M., Fellman, V., & Näätänen, R. (2009). Numerical discrimination in newborn infants as revealed by event-related potentials to tone sequences. *European Journal of Neuroscience*, 30(8), 1620–1624. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06938.x>
- Sambeth, A., Pakarinen, S., Ruohio, K., Fellman, V., van Zuijen, T. L., & Huotilainen, M. (2009). Change detection in newborns using a multiple deviant paradigm: A study using magnetoencephalography. *Clinical Neurophysiology*, 120(3), 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.12.0333>
- Schirmann, F. (2014). “The wondrous eyes of a new technology”—a history of the early electroencephalography (EEG) of psychopathy, delinquency, and immorality. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(232). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00232>
- Schröger, E., & Wolff, C. (1998). Attentional orienting and reorienting is indicated by human event-related brain potentials. *Neuroreport: An International Journal for the Rapid Communication of Research in Neuroscience*, 9(15), 3355–3358. <https://doi.org.ezproxy.jyu.fi/10.1097/00001756-199810260-00003>
- Stefanics, G., Háden, G. P., Sziller, I., Balázs, L., Beke, A., & Winkler, I. (2009). Newborn infants process pitch intervals. *Clinical Neurophysiology*, 120(2), 304–308. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.11.020>
- Tóth, B., Velösy, P. K., Kovács, P., Háden, G. P., Polver, S., Sziller, I., & Winkler, I. (2023). Auditory learning of recurrent tone sequences is present in the newborn's brain. *NeuroImage*, 281, 120384. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2023.120384>
- Trainor, L. J. (2008). Event-related potential (ERP) measures in auditory development research. Kirjassa Schmidt, L. A. & Segalowitz, S. J. (toim.). (2008) *Developmental psychophysiology: Theory, systems, and methods*. New York: Cambridge University Press. 69–102
- Trainor, L., McFadden, M., Hodgson, L., Darragh, L., Barlow, J., Matsos, L., & Sonnadara, R. (2003). Changes in auditory cortex and the development of mismatch negativity between 2 and 6 months of age. *International Journal of Psychophysiology*, 51(1), 5–15. [https://doi.org/10.1016/S0167-8760\(03\)00148-X](https://doi.org/10.1016/S0167-8760(03)00148-X)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2005.11.010>
- Xu, C., Di Lonardo Burr, S., & LeFevre, J.-A. (2023). The hierarchical relations among mathematical competencies: From fundamental numeracy to complex mathematical skills. *Canadian Journal of Experimental Psychology / Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 77(4), 284–295. <https://doi.org/10.1037/cep0000311>
- Xu, F., Spelke, E. S., & Goddard, S. (2005). Number sense in human infants. *Developmental Science*, 8(1), 88–101. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00395.x>
- Zhang, Q., Hu, Y., Dong, X., & Tu, W. (2022). Predictive value of electroencephalogram, event-related potential, and general movements quality assessment in neurodevelopmental

- outcome of high-risk infants. *Applied Neuropsychology: Child*, 11(3), 438–443. <https://doi.org/10.1080/21622965.2021.1879085>
- Zhang, Q., Li, H., Zheng, A., Dong, X., & Tu, W. (2017). Evaluation of auditory perception development in neonates by event-related potential technique. *Brain and Development*, 39(7), 564–572. <https://doi.org/10.1016/j.braindev.2017.02.004>