

**VASTASYNTYNEIDEN LUKUMÄÄRÄISYYDEN
HAVAITSEMINEN JA SEN YHTEYS VANHEMPIEN
MATEMAATTISIIN TAITOIHIN**

Vilma Koskela

Sara Lammi

Pro gradu –tutkielma

Psykologian laitos

Jyväskylän yliopisto

Toukokuu 2024

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Psykologian laitos

KOSKELA, VILMA & LAMMI, SARA: Vastasyntyneiden lukumääräisyyden havaitseminen ja sen yhteys vanhempien matemaattisiin taitoihin

Pro gradu –tutkielma, 39 s.

Ohjaaja: Kaisa Lohvansuu

Psykologia

Toukokuu 2024

Matemaattiset taidot ovat oleellinen osa tapaamme hahmottaa maailmaa, mutta niitä on tästä huolimatta tutkittu vain vähän verrattuna esimerkiksi kielellisiin taitoihin. Pro gradu -tutkielmamme tarkoituksena oli tutkia varhaisia matemaattisia taitoja tarkastelemalla vastasyntyneiden aivojen kykyä havaita eroja pienissä lukumäärissä auditorisessa äänisarjoja sisältävässä koeasetelmassa. Lisäksi tutkimme, ovatko vanhempien matemaattiset taidot yhteydessä vastasyntyneiden aivovasteisiin. Tutkimus on osa EarlyMath-tutkimushanketta, jonka tarkoituksena on selvittää varhaisten matemaattisten taitojen, tunteiden sekä motivaation kehitystä.

Otos koostui 41 vastasyntynyt-vanhempi-parista (16 äitiä, 25 isää) ja tutkimusaineisto kerättiin vuosien 2022–2024 aikana. Aineisto koostui vastasyntyneiden EEG-aineistosta, joka oli kerätty auditorisen pienten lukumäärien koeasetelman aikana vastasyntyneiden nukkuessa, sekä vanhempien matemaattisia taitoja arvioivasta testistöstä. Vanhempien symbolisia matemaattisia taitoja mitattiin yhteen-, vähennys-, kertolasku- ja artimetriikkatesteillä. Vanhempien ei-symbolisia matemaattisia taitoja mitattiin määrienvertailun testillä. Tutkimuskysymyksiin vastattiin toistettujen mittausten varianssianalyysillä, joissa käytettiin kovariaatteina vanhempien symbolisia ja ei-symbolisia matemaattisia taitoja. Teimme analyysin kullekin EEG-aineiston 100 ms pituiselle analyysivälille 100–1000 ms ärsykkeen alkamisesta.

Tulokset osoittivat vastasyntyneiden aivojen havaitsevan selvästi eron 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänen välillä aikavälillä 200–700 ms. 2-osaisen ja 3-osaisen äänen välillä tulos ei ollut yhtä selkeä, vaan se jäi yksittäisen analyysivälin 600–700 ms havainnoksi. Vastasyntyneiden päälakilohkojen välillä ei juuri havaittu eroja pienten lukumäärien havaitsemisessa. Vanhempien matemaattisilla taidoilla oli yhteys vastasyntyneiden kykyyn havaita pieniä lukumääriä, mutta havaitut yhteydet ilmenivät jälleen yksittäisillä analyysiväleillä, eivätkä kovinkaan johdonmukaisesti. Yksittäiset tulokset saattavat johtua tilastollisesta sattumasta tai esimerkiksi menetelmällisistä puutteista.

Tutkimuksemme on ensimmäinen laatuaan ja tukee teoriaa siitä, että lukumääräisyyden taju on varhain ilmenevä synnynnäinen ominaisuus. Tuloksemme antavat myös viitteitä siitä, että matemaattiset taidot olisivat perinnöllisiä ja että perinnöllisyyden vaikutus kykyyn erotella lukumääriä olisi havaittavissa jo vastasyntyneillä. Lisäksi tutkimuksemme perusteella voi sanoa EEG:n olevan sopiva menetelmä varhaisten matemaattisten taitojen tutkimuksessa. Toisaalta tuloksemme korostaa tarvetta lisätutkimukselle, jossa keskityttäisiin useamman tai kaikkien EEG-kanavien tarkasteluun sekä vanhempien mahdollisiin diagnosoituihin matematiikan oppimisvaikeuksiin.

Avainsanat: lukumääräisyyden taju, matemaattiset haasteet, perinnöllisyys, poikkeavuusnegatiivisuusvaste

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ

Department of Psychology

KOSKELA, VILMA & LAMMI, SARA: Newborns' ability to detect changes in small numerosity and its connection to the parents' mathematical skills

Master's Thesis, 39 pp.

Supervisor: Kaisa Lohvansuu

Psychology

May 2024

Mathematical capabilities are an essential part of our way to perceive the world around us, yet they are not too well studied. The aim of our master's thesis was to shed light on early mathematical capacities by exploring the abilities of the newborn brain to detect changes in small numerosity in auditory sound stream. We then further studied whether this ability is connected to the parents' mathematical skills. Our study was a part of the EarlyMath research project which addresses the connection between early mathematical skills, motivation, and feelings.

The sample consisted of 41 newborn-parent pairs (16 mothers, 25 fathers) and the data was collected between 2022 and 2024. The data included newborn EEG recordings and mathematical skill tests of the parents. Symbolic mathematical skills were assessed with basic addition, subtraction, multiplication and arithmetic tasks. Non-symbolic mathematical skills were assessed by visual quantity comparison task. Our research questions were answered using repeated measures ANOVAs where we used parents' symbolic skills and parents' non-symbolic skills as covariates. The newborn EEG data was analysed in 100 ms long time intervals in 100-1000 ms timeframe after the onset of the auditory stimulus.

The results showed that the newborn brain was able to detect change between 2 and 1 sounds between 200–700 ms. However, based on our analysis the newborns could detect change between 2 and 3 sounds only during 600–700 ms time interval. There was not significant difference between the brain hemispheres. We found a connection between the parents' mathematical skills and the newborns' abilities to detect changes in small numerosity during some time intervals, but the connections were inconsistent. The sparse connections may be a result of statistical coincidence or the inapplicability of our analysis intervals.

Our research is the first of its kind and supports the theory of number sense being an innate ability. The results also support the theory that mathematical skills are heritable and that the effect of heritability can already be seen in newborns. In addition, our research shows that EEG as a method is adequate when researching early mathematical abilities. However, our research highlights the need for more studies focusing on multiple or the whole topography of the EEG channels and paying more attention to parents' mathematical learning disabilities.

Key words: number sense, mathematic difficulties, heritability, MMN, MMR

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO	1
1.1 Matemaattiset taidot ja lukumääräisyyden taju	1
1.2 Pienten ja suurten lukumäärien havaitseminen	4
1.3 Lukumääräisyyden tajun perinnöllisyys ja yhteys matemaattisiin haasteisiin	5
1.4 Lukumääräisyyden tajuun liittyvät aivoalueet	7
1.5 EEG ja vauvatutkimus	8
1.6 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset	10
2 MENETELMÄT	12
2.1 EarlyMath-projekti	12
2.2 Otos ja aineistonkeruu	12
2.3 Mittarit ja muuttujat	13
2.3.1. Vastasyntyneiden EEG:n mittaaminen ja esikäsittely	13
2.3.2 Vanhempien matemaattisten taitojen mittaaminen ja muuttujien muodostaminen	15
2.4 Tilastolliset analyysit	18
3 TULOKSET	19
3.1 Vastasyntyneiden aivojen kyky havaita eroja pienissä lukumäärissä	19
3.2 Vanhempien matemaattisten taitojen yhteys vastasyntyneiden aivovasteisiin	21
4 POHDINTA	25
4.1 Vastasyntyneiden aivojen kyky havaita eroja pienissä lukumäärissä	25
4.2 Vanhempien matemaattisten taitojen yhteys vastasyntyneiden aivovasteisiin	28
4.3 Johtopäätökset	30
4.4 Suosituksia jatkotutkimukselle	30
5 LÄHDELUETTELO	32

1 JOHDANTO

Kun ajatellaan matemaattisia taitoja, mieleen nousevat helposti kertolaskut ja tilanteet, joissa monimutkaisia numerosarjoja ratkotaan paperin äärellä. Matemaattiset taidot ovat kuitenkin paljon monipuolisempi kokonaisuus, joka ulottuu yksinkertaisista aivotason havainnoista elinympäristössä toimimiseen. Matemaattisuus on oleellinen osa arkeamme, tapaamme olla ja kykyämme hahmottaa maailmaa: tarvitsemme matemaattiseen osaamiseen pohjaavia taitoja esimerkiksi valitessamme lyhintä kassajonoa kaupassa, pakatessamme reppua tai arvioidessamme tämän tutkielman lukemiseen kuluvaan aikaan. Matemaattisia taitoja on tästä huolimatta tutkittu vähänlaisesti verrattuna esimerkiksi kielellisiin taitoihin, minkä vuoksi niistä tiedetään myös vähemmän. Matemaattisten taitojen monimuotoisuutta ja merkitystä halutaan kuitenkin ymmärtää yhä tarkemmin.

Uudenlaista tietoa saadaan jatkuvasti lisää, sillä teknologian kehittyminen on mahdollistanut monipuolisten aivokuvantamismenetelmien käytön myös matemaattisia taitoja tutkittaessa (ks. esimerkiksi Denyer ym., 2020; Nakai ym., 2023; Van Rinsveld ym., 2020). Varhaisten matemaattisten kykyjen ja näihin liittyvien tekijöiden kehityksen tutkimus on kuitenkin jäänyt taka-alalle, vaikka tämän avulla voitaisiin tunnistaa matemaattisten vaikeuksien kehityksen riski- sekä suojatekijöitä paremmin. Edellisiä kartoittamalla ja varhaisten matemaattisten taitojen periytyvyyttä ymmärtämällä voitaisiin edistää muun muassa varhaisen tuen suunnittelua ja kohdentamista, mikä mahdollistaisi yhä tarkemman ja oikea-aikaisemman tuen antamisen matemaattisissa haasteissa. Eräs lähtökohta on vastasyntyneiden lukumääräisyyden tajun tutkiminen.

1.1 Matemaattiset taidot ja lukumääräisyyden taju

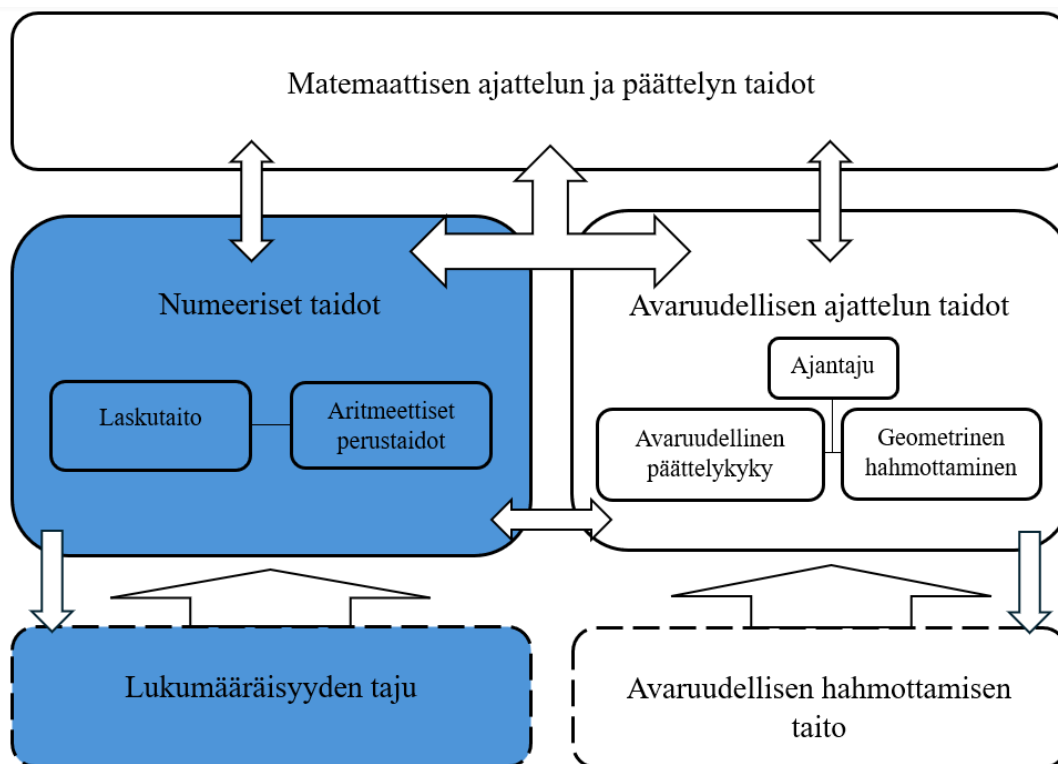
Matemaattiset taidot ovat monimuotoinen kokonaisuus, joka rakentuu useammasta osatekijästä. Myös taitojen kehitystä voidaan seurata monesta näkökulmasta. Parviainen (2019) on hahmotellut mallin, joka jäsentää matemaattisten perustaitojen kehityskulkua vastasyntyneestä kahdeksanvuotiaaksi saakka holistisen näkökulman kautta. Holistiseen kehikkoon kuuluu kolme pääaluetta: numeeriset taidot, avaruudellisen ajattelun taidot sekä matemaattisen ajattelun ja päättelyn taidot. Jo syntyessään ihmisellä on lukumääräisyyden taju sekä avaruudellisen hahmottamisen taito, joiden avulla vauva asettuu tilaan, toimii ja arvioi ympäristöään. Kyseiset taidot ovat edellytyksenä mallissa esiteltyjen muiden taitojen kehittymiselle.

Parviainen (2019) selittää mallissaan myös tarkemmin, kuinka matemaattiset taidot nivoutuvat yhteen muun kehityksen kanssa. Vauvan hermoston kehittyessä kahden eri lukumäärän suhteellisen

suuruuseron ymmärrys muuttuu mahdolliseksi, mikä mahdollistaa lukumääräisyyden tajun. Kehityksen edetessä ympäröivän maailman hahmottaminen paranee ja vauvan mielensisäinen vertailu, lajittelu sekä jäsentely muuttuvat yhä tarkemmiksi. Nämä prosessit auttavat meitä ymmärtämään esimerkiksi sen, miten painovoima toimii ja kuinka eri asiat ovat yhteydessä toisiinsa. Kun erilaisia elinympäristöstä löytyviä rakenteita, sääntöjä ja järjestyksiä opitaan ymmärtämään ja hyödyntämään, abstraktimmat matemaattisen päättelyn ja ajattelun prosessit laajenevat. Matemaattisten taitojen eri osa-alueet eivät kuitenkaan ole hierarkkisia, vaan ne kehittyvät samanaikaisesti ja vuorovaikutuksessa toisiinsa. Parviaisen (2019) matemaattisten taitojen malli on esitetty kuviossa 1.

Kuvio 1

Matemaattisten taitojen holistinen kehikko Parviaista (2019) mukaillen



Huom. Lukumääräisyyden tajulle keskeiset alueet on merkitty sinisellä.

Lukumäärät ja näiden havainnointi ovat matemaattisten taitojen merkittäviä perustekijöitä. Tästä huolimatta lukumääräisyyden tajun käsite (engl. number sense) ei ole täysin vakiintunut ja sen määritelmä on tieteenalasta riippuvainen (Berch, 2005). Lukumääräisyyden tajua voi nähdä kutsuttavan myös termillä numeerisuus (engl. numeracy). Lukumääräisyyden tajulla tarkoitetaan useimmiten kykyä ymmärtää, arvioida ja käsitellä lukumääräisyyttä koskevaa tietoa (Koponen ym s. 331., 2019; Dehaene, 2001). Lukumääräisyyden tajun on havaittu olevan synnynnäistä ja vahvasti

fylogeneettistä eli evolutiivisesti jatkuvaa (Butterworth ym., 2018; Libertus & Brannon, 2009). Kyky löytyykin laajalti eläinkunnasta ja sitä on tutkittu esimerkiksi lintujen ja nisäkkäiden lisäksi myös hyönteisillä (Nieder, 2018). Vaikka monet eläimet hahmottavat lukumääräisyyttä eri aistikanavien kautta, vain ihmisten on havaittu käsittelevän tätä sekä näkö-, kuulo- että tuntoaistin avulla (Izard ym., 2009).

Jo pienten vauvojen on todettu hahmottavan lukumääräisyyttä. Esimerkiksi Starkey ja Cooper (1980) havaitsivat tutkimuksessaan, että alle puolivuotiaat kykenivät pienten lukumäärien erotteluun. He käyttivät vauvatutkimuksissa yleistä habituaatiokoeasetelmaa, jossa mitataan, kuinka kauan katse kohdistuu ärsykkeeseen. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että vauvat katsoivat merkittävästi kauemmin taulua, kun taulussa oleva pallomäärä vaihtui kahdesta kolmeen tai kolmesta kahteen. Vauvat siis kiinnittivät huomiota lukumäärän muutokseen. Butterworth (2005) on esitellyt laadullisessa meta-analyysissään lisää tutkimuksia, joissa ilmeni samantapaisia havaintoja: vauvat havaitsivat pienten lukumäärien muutoksia koeasetelmasta riippumatta. Samoin Smythin ja Ansarin (2020) tekemässä määrällisessä meta-analyysissä todettiin olemassa olevan tutkimustiedon puoltavan vauvojen kykyä erotella erityisesti pieniä lukumääriä toisistaan. Edellä esitetyt tutkimustulokset vahvistavat oletusta siitä, että lukumääräisyyden taju on varhain ilmenevä synnynnäinen ominaisuus.

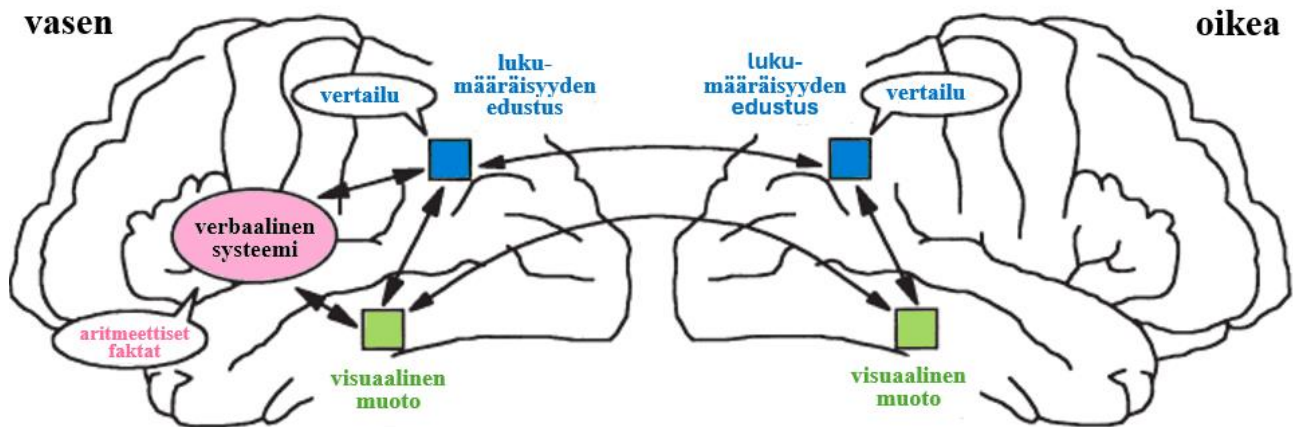
Lukumääräisyyden taju voidaan jakaa ei-symbolisiin ja symbolisiin taitoihin sekä näiden välillä toimivaan taitoon yhdistää lukumäärä numerosymboliin (engl. mapping) (Kolkman ym., 2013). Ei-symbolinen lukumääräisyyden taju viittaa mielensisäiseen lukumääräisyyden hahmottamiseen. Tässä keskeisenä on mentaalinen lukujana (engl. mental number-line, MNL), jolla eri lukumäärät asettuvat vastaaville paikoilleen niin, että pienet sijoittuvat vasemmalle ja suuret oikealle (Di Giorgio ym., 2019). Symbolinen lukumääräisyyden taju puolestaan tarkoittaa kulttuurisesti hankittuja verbaalisia ja visuaalisia taitoja, kuten numeromerkkejä ja -sanoja (Göbel ym., 2011). Ei-symbolisen ja symbolisen lukumääräisyyden tajun vuorovaikutuksen edellytyksenä on aiemmin mainittu lukumäärän ja numerosymbolin yhdistämisen taito, jonka avulla esimerkiksi numerosanat yhdistetään mielensisäisiin lukumäärien edustuksiin (Gallistel & Gelman, 1992).

Eräs kuuluisimmista symbolisten ja ei-symbolisten taitojen kehitystä selittävistä malleista on Dehaenen ja Cohenin (1995) kolmoiskoodimalli. Myös tämän mallin mukaan ei-symbolinen lukumääräisyyden taju eli analoginen koodi on synnynnäinen. Lapsen kehityksen edetessä matematiikan ja kielen oppiminen tuovat mukanaan symbolisen lukumääräisyyden tajun eli numerosanat ja -symbolit, toisin sanoen verbaalisen ja visuaalisen koodin. Kullekin kolmelle koodille on löydetty vastaavat alueensa myös aivoista: analoginen koodi sijaitsee intraparietaalilla uurteella (engl. intraparietal sulcus, IPS), verbaalinen koodi vasemman sylvian uurteen ympäristössä ja visuaalinen koodi takaraivo-ohimolohkojen alueella. Kolmoiskoodimalli on esitetty kuviossa 2.

Toisaalta on hyvä pitää mielessä, että on olemassa tutkimusnäyttöä myös siitä, ettei symbolisten ja ei-symbolisten taitojen kehitys ole aivan näin suoraviivaista ja kausaalista (ks. Elliot ym., 2019).

Kuva 1

Kolmoiskoodimalli: funktionaalinen ja anatominen malli lukumääräisyyden tajusta Dehaenea ja Cohenia (1995) mukaillen



Huom. Analoginen koodi on merkattu sinisellä, verbaalinen koodi vaaleanpunaisella ja visuaalinen koodi vihreällä.

1.2 Pienten ja suurten lukumäärien havaitseminen

Lukumääräisyyden taju jakautuu pienten (1–3 tai 1–4 yksikköä) ja suurten (yli 4 yksikköä) lukumäärien havaitsemiseen, joilla on vastikään todistettu olevan erilliset järjestelmät myös aivotasolla (Kutter ym., 2023). Tätä jakoa ovat aiemminkin tukeneet useat tutkimukset, joissa on löydetty epäyhteneväisyyksiä edellä mainittujen välillä: on havaittu, että vauvat pystyvät erottelemaan pieniä ja suuria lukumääriä toisistaan erillisinä, mutta suurten ja pienten lukumäärien keskinäinen vertailu (esim. 2 vs. 8) ei onnistu (Anderson & Cordes, 2013; Mou & vanMarle, 2014; Revkin ym., 2008). Pienten ja suurten lukumäärien prosessoinnissa on siis havaittu toimivan erilaiset järjestelmät.

Likimääräisen lukumäärän prosessoinnin järjestelmän (engl. approximate number system, ANS) toiminnan on ajateltu auttavan erityisesti suurten lukumäärien hahmottamisessa. Likimääräisen prosessoinnin järjestelmä toimii Weberin lain avulla (Hyde & Spelke, 2011; Lipton, 2003). Weberin lain mukaan lukumäärien erottaminen toisistaan riippuu vertailtavien määrien välisestä lukusuhteesta ja erottelukykyyn tarkkuus paranee kehityksen edetessä. Vastasyntyneet tarvitsevan hyvin pienen lukusuhteen, 1:3, jotta ero kahden ei-symbolisen lukumäärän välillä pystytään ylipäättään

havaitsemaan. Puolivuotiailla vaadittava suhde tarkentuu ja se on 1:2. Yhdeksän kuukauden iässä suhde on 2:3, esikoululaisilla 3:4 ja aikuisilla 7:8 (Hyde & Spelke, 2011).

Tarkan lukumäärän prosessoinnin järjestelmä (engl. individuation system) (Hyde, 2011) liittyy puolestaan erityisesti pienten lukumäärien havaitsemiseen. Tarkka järjestelmä luo jokaiselle yksittäiselle mielessä pidettävälle kohteelle oman mielensisäisen edustuksensa, mikä auttaa lukumäärän täsmällisessä havainnoinnissa (Hyde, 2011). Lisäksi on olemassa muita prosessointitapoja, jotka auttavat erityisesti pienten lukumäärien havaitsemisessa. Visuaalisen jäljittämisen järjestelmä (engl. object tracking system, OTS) kuvaa sitä määrää kohteita, joita pystytään näön avulla havainnoimaan samanaikaisesti ajassa ja tilassa (Revkin ym., 2008). Subitisaatiolla puolestaan tarkoitetaan kykyä nimetä nopeasti ja näönvaraisesti pieniä lukumääriä (Ross-Sheehy ym., 2003). Erityisesti pienten lukumäärien hahmottamisen apuna käytetään siis useita erilaisia järjestelmiä, vaikkakin moni näistä liittyy juuri lukumäärän visuaaliseen hahmottamiseen, eikä muiden aistikanavien avulla havaittuun lukumääräisyyteen.

On olemassa ristiriitaista tutkimustietoa siitä, miten yllä mainittuja järjestelmiä käytetään erilaisten lukumäärien havaitsemiseen. Vallitseva näkemys on, että likimääräistä järjestelmää käytetään erityisesti suurten ja muita järjestelmiä pienten lukumäärien havaitsemiseen. On kuitenkin löydetty viitteitä siitä, että myös pieniä lukumääriä on mahdollista havainnoida likimääräisen järjestelmän avulla (Mou & vanMarle, 2014). Tämä tarkoittaisi sitä, että pieniä lukuja olisi mahdollista havaita ensisijaisesti Weberin lain periaatteella, määrien suhdetta tarkastellen. Pienten ja suurten lukumäärien prosessointi ei siis välttämättä jakaudukaan aivan yksiselitteisesti eri järjestelmiin. Toisaalta aivokuvantamistutkimusten avulla on voitu todeta, että aivojen aktivaatio on sekä aikuisilla että lapsilla erilaista pieniä ja suuria lukumääriä havainnoitaessa (Hyde, 2011; Hyde & Spelke, 2009). Mainittakoon vielä, että täysin omaan järjestelmäänsä kuuluvat erittäin suuret lukumäärät, joiden havainnointiin vaikuttavat Weberin lain sijaan muuttujan muut visuaaliset ominaisuudet, kuten tiheys (Fornaciai & Park, 2017).

1.3 Lukumääräisyyden tajun perinnöllisyys ja yhteys matemaattisiin haasteisiin

Haasteet matemaattisissa taidoissa voivat näkyä esimerkiksi matemaattisina oppimisvaikeuksina. Diagnosoidulla matemaattisella oppimisvaikeudella eli dyskalkulialla tarkoitetaan häiriötä, jonka seurauksena matemaattisten taitojen oppiminen on jatkuvasta harjoittelusta huolimatta vaikeaa (Koponen ym., 2019, s. 329). Haasteet matematiikassa eivät myöskään ole selitettävissä muilla tekijöillä, kuten huonoilla kielellisillä taidoilla ja ne ovat olleet havaittavissa jo varhaislapsuudesta

lähtien (Koponen ym., 2019, s. 329; Räsänen, 2012). Matemaattiset taidot koostuvat monesta eri osataidosta (ks. edellä mainittu Parviaisen (2019) holistinen malli), minkä vuoksi haasteet voivat näkyä esimerkiksi aritmeettisten faktojen muistamisessa, sujuvassa ja tarkassa laskemisessa tai laskustrategioiden oppimisessa (Butterworth, 2005; Jordan ym., 2003; WHO, 2018). Erityisesti aikapaineisten testien on havaittu auttavan matemaattisten haasteiden tunnistamisessa (Jordan & Montani, 1997).

Matemaattisten taitojen ja haasteiden periytyvyydestä on olemassa melko vahvaa näyttöä. Periytyvyydellä tarkoitetaan sekä käsitteellisesti että tilastollisesti geneettisen perimän vaikutusta yksilöllisiin eroavaisuuksiin ryhmässä (Kovas, Haworth, Dale & Plomin, 2007). Aihetta on lähdetty tutkimaan erityisesti kaksostutkimusten kautta, ja matemaattisten taitojen ja haasteiden periytyvyyden on arveltu olevan jopa 40–69 % tutkimuksesta ja otoksesta riippuen (Haworth ym., 2009; Kovas ym., 2005; Kovas, Haworth, Dale & Plomin, 2007; Kovas, Haworth, Harlaar ym., 2007; Plomin & Kovas, 2005). Tarkkoja geenejä, joiden kautta matemaattiset haasteet ja taidot välittyisivät vanhemmalta lapselle, ei kuitenkaan ole vielä tunnistettu (Chen ym., 2017). Tutkimusta ei ole juuri tehty myöskään siitä, onko vanhemman sukupuolella väliä matemaattisten haasteiden periytymisessä.

Vaikka matemaattisten haasteiden periytyvyydestä on saatu vankkaa tutkimusnäyttöä, teorian matemaattisten oppimisvaikeuksien taustalla olevista syistä ovat kirjavia. Esimerkiksi kognitiivisia haasteita, kuten työmuistia, inhibitiota sekä avaruudellisen hahmottamisen vaikeuksia on ehdotettu matemaattisia oppimisvaikeuksia selittäviksi tekijöiksi (Szucs ym., 2013). Toisaalta Butterworth (2005) esittää, että matemaattisten vaikeuksien taustalla on enemmänkin tarkkarajainen haaste juuri lukumääräisyyden tajussa. Myös Schneider ja kollegat (2017) ovat tarkastelleet meta-analyyssissään lukumääräisyyksien käsittelyn taidon yhteyttä matemaattisiin taitoihin. He havaitsivat, että lukumääräisyyksien käsittelyn taito oli selvästi yhteydessä matemaattisiin taitoihin koko elämän ajalta, vaikkakin symbolisten taitojen yhteys oli vahvempi kuin ei-symbolisten taitojen. Toisaalta myös ei-symbolisten matemaattisten taitojen on havaittu olevan yhteydessä sekä aiempaan, että tulevaan matemaattiseen osaamiseen (Halberda ym., 2008; Starr ym., 2013; Qixuan & Jingguang, 2014).

Butterworthin (2005) ajatusta siitä, että juuri lukumääräisyyden taju olisi yksi mahdollisista matemaattisten haasteiden taustalla vaikuttavista tekijöistä, vahvistavat myös Decarlin (2019) tutkimustulokset. Näissä havaittiin, että lapsilla, joilla oli todettu matemaattisia oppimisvaikeuksia, oli merkittävästi heikompi kyky erotella suuria ei-symbolisia lukumääriä toisistaan. Ei lienekään yllättävää, että myös lukumääräisyyden tajun periytyvyydestä on kohtalaista tutkimusnäyttöä (Lukowski ym., 2017; Tosto ym., 2014; Viktorsson ym., 2023). On kuitenkin huomioitava, että

erityisesti pienten lukumäärien havaitsemisen järjestelmien yhteydestä matemaattisiin oppimisvaikeuksiin on Decarlin (2019) mukaan olemassa ristiriitaista tutkimusnäyttöä, minkä lisäksi sen periytyvyyttä ei ole juurikaan tutkittu.

1.4 Lukumääräisyyden tajuun liittyvät aivoalueet

Lukumääräisyyden tajuun lähde on pyritty aivotutkimuksen avulla paikantamaan yhä tarkemmin. Kehityksellisesti lukumääräisyyden taju näyttäisi olevan aluksi oikealle aivopuoliskolle ja aivojen etuosiin painottunutta, mistä se ajan myötä jakautuu molemmille aivopuoliskoille päälakilohkoille keskittyen (Ansari ym., 2005; Hyde ym., 2010). Esimerkiksi Izard, Dehaene-Lambertz ja Deahene (2008) havaitsivat vauvoja tutkiessaan, että lukumääräisten ärsykkeiden vasteet syntyivät laajalla aivoverkostolla oikealla alemmalla päälakilohkolla sekä otsa- ja ohimolohkolla, mikä mukailee kolmoiskoodimallissa määriteltyjen lukumääräisyyden tajuun osien sijainteja. Erityisesti oikean aivopuoliskon IPS:n on havaittu aktivoituvan sekä symbolisesta että ei-symbolisesta lukumääräisestä ärsykkeestä aistikanavasta riippumatta (Libertus & Brannon, 2009).

IPS:stä onkin tullut keskeisimpiä, ellei jopa keskeisin, lukumääräisyyden tajuun liitetty aivoalue. Tätä on tutkittu esimerkiksi arvioimalla lukumääräisyyden tajuun häiriön yhteyttä IPS:n epänormaaliin toimintaan. Aivokuvantamistutkimuksissa on havaittu, että käyttämällä transkraniaalista magneettistimulaatiota (rTMS) oikean ja vasemman IPS:n yllä on pystytty vaikuttamaan aikuisilla kykyyn erotella sekä symbolisia että ei-symbolisia lukumääriä toisistaan (Cappelletti ym., 2007; Dormal ym., 2012). Tutkimustulokset ovat tosin olleet vaihtelevia sen suhteen, mikä on vasemman ja oikean IPS:n täsmällinen rooli matemaattisissa taidoissa ja aiheuttaako transkraniaalisen magneettistimulaation käyttö lopulta taitojen paranemista vai heikentymistä.

Rapinin (2016) tekemän katsausartikkelin mukaan oikean aivopuoliskon päälakilohkon alueet vastaavat laskemiseen liittyvissä tehtävissä enemmän likimääräisen lukumäärän hahmottamisen järjestelmästä, kun taas vasemman puolen päälakilohkon alueet aktivoituvat enemmän tarkan lukumäärän hahmottamisen ja aritmeettisten tehtävien aikana. Tämä siis tarkoittaisi, että likimääräisen hahmottamisen järjestelmän neurologinen perusta voisi sijaita oikealla IPS:llä. Edellistä tukien myös Heine ja kumppanit (2013) havaitsivat, että lapsilla, joilla oli matemaattisia oppimisvaikeuksia, ilmeni poikkeava aivovaste oikealla päälakilohkolla heidän vertaillessaan suuria lukumääriä keskenään. Myös muissa tutkimuksissa juuri oikean IPS:n on havaittu aktivoituvan lukumääriä havainnoitaessa ja käsiteltäessä (ks. esimerkiksi Dormal ym., 2010).

Lukumääräisyyden tajuun liittyvää aivojen lateralisaatiota on tutkittu myös tarkastelemalla Turnerin oireyhtymää, jossa dyskalkulia on normaalia yleisempää. Molkon ja kollegojen (2003) tutkimuksessa havaittiin, että henkilöillä, joilla oli Turnerin syndrooma, oli myös keskimäärin poikkeava oikean IPS:n rakenne ja toiminta. Toisaalta Kaufmann, Wood, Rubinsten ja Henik (2011) havaitsivat meta-analysissään, kuinka lapsilla, joilla oli matemaattinen oppimisvaikeus, juuri vasemman IPS:n alue aktivoitui suurten lukumäärien vertailun tehtävässä normaalia vähemmän. Lukumääräisyyden tajun lateralisaatiosta on siis risteävää näyttöä.

Edellä esitettyjen tutkimustulosten perusteella olisi mielekästä todeta, että lukumääräisyyden tajun perustana on IPS. Samoin voisi väittää, että matemaattiset oppimisvaikeudet johtuvat oikeasta IPS:stä lähtöisin olevasta lukumääräisyyden tajun häiriöstä. Todellisuudessa kuitenkin niin monimutkaiselle kokonaisuudelle kuin matemaattisuus tuskin löytyy aivoista yhtä ja tiettyä taidon ja häiriön lähdeä. Onkin tärkeä huomata, että tutkimuksissa on tuotu esille paljon muitakin aivoalueita muun muassa otsalohkolla, ohimolohkolla ja päälakilohkolla, jotka ovat matemaattisissa oppimisvaikeuksissa poikkeavia aktivaatioissaan, alueiden välisissä yhteyksissään ja rakenteessaan (Ashkenazi ym., 2013). Samoin useiden aivoalueiden on havaittu aktivoituvan lukumääräisen tiedon prosessoinnin yhteydessä (Wei ym., 2014).

1.5 EEG ja vauvatutkimus

EEG (engl. electroencepalography) eli aivosähkökäyrätutkimus on menetelmä, jolla tutkitaan aivojen sähköistä toimintaa päähän asetettavien elektrodien avulla. Ominaisuuksiensa ansiosta EEG soveltuu lukumääräisyyden tajun kehityksen tutkimiseen erityisesti vauvojen ja pienten lasten kohdalla. EEG on ajallisesti tarkka, objektiivinen ja edullinen. Se ei vaadi tutkittavalta toimia tai huomiota ja sietää muihin menetelmiin nähden hyvin liikehdintää (Biasiucci ym., 2019), jota vauvojen kohdalla väistämättä ilmenee.

EEG:n avulla on mahdollista tutkia joko tapahtumasidonnaisia herätevasteita (engl. evoked response potential, ERP) tai aivojen rytmisen toiminnan modulaatiota (engl. induced activity). Rytmisen toiminta eli oskillaatiot ovat dynaamisia ja ilmenevät laajassa aikaikkunassa (Biasiucci ym., 2019). Aivotoimintaa tutkimalla halutaan usein kuitenkin vertailla ajallisesti tarkkarajaisempaa aktivaatiota, herätevasteita. Herätevasteet ovat vaihelukittuja aiovasteita, jotka seuraavat sensorisia tai motorisia ärsykeitä (Sur & Sinha, 2009). Näiden avulla on mahdollista tutkia eri ryhmien kliinisiä eroja, mutta myös kehityksellisiä tekijöitä. Herätevasteet muuttuvat kehityksen myötä aivojen uurtuessa sekä hermosolujen järjestäytyessä ja myelinisoituessa (Picton & Taylor, 2007). Esimerkiksi

eräs varhain vauvoilla havaittavissa oleva auditorinen heräteväste on noin 100 ms kohdalla ilmenevä selkeä positiivinen P1-vaste, joka aikuistuessaa laajenee muotoon P1-N1-P2 (Picton & Taylor, 2007). Samoin auditoriset vasteet P150, N250, P350 ja N450 ovat havaittavissa jo syntymässä, mutta näiden amplitudit kasvavat ja osan latenssit pienenevät ensimmäisen elinvuoden aikana (Kushnerenko, Čeponiene, Balan, Fellman ym., 2002).

Eräs merkittävä heräteväste, jonka avulla voidaan tutkia sekä sensorisia että kognitiivisia prosesseja on Näätäsen, Sussmanin, Salisburyn ja Shaferin (1978) määrittelemä poikkeavuusnegatiivisuuvaste eli MMN (engl. mismatch negativity). Nimensä mukaisesti kyseinen vaste ilmenee, kun toistuvassa ärsykesarjassa tapahtuu jokin poikkeavuus. Tällöin poikkeavaan ärsykkeeseen eli devianttiärsykkeeseen syntyy standardiärsykettä negatiivisempi vaste. MMN-vaste ilmenee 100–250 ms ärsykkeiden eroavaisuuden jälkeen ärsyketypistä, vireystasosta ja tarkkaavaisuudesta riippumatta, ja se voidaan havaita kuuloaivokuorella, otsalohkoilla, päälakilohkoilla sekä syvemmilläkin aivo-osilla (Kujala ym., 2007). MMN:ää on käytetty erityisesti auditorisissa koeasetelmissa tutkittaessa kielellisyyteen ja muistiin liittyviä ilmiöitä, mutta sen avulla on kyetty havainnoimaan myös kliinisiä tapauksia kuten psykiatrisia ja neurologisia sairauksia (Näätänen ym., 2014).

Vauvoilla aiovasteet ovat vasta kehittymässä, mikä aiheuttaa myös MMN-vasteessa suuriakin muutoksia ja vaikeuttaa sen havaitsemista (Leppänen ym., 2004). Alle vuoden ikäisillä MMN-vaste ilmeneekin useimmiten positiivisena vasteena, minkä vuoksi sitä kutsutaan myös poikkeavuusvasteeksi (engl. mismatch response; MMR) (Háden ym., 2016). MMN/MMR-vasteen havainnoimista vaikeuttaa se, että vauvoilla tämä voi auditorisessa koeasetelmassa jäädä piiloon toisen samanaikaisen positiivisen vasteen alle, joka sekin liittyy poikkeavan ärsykeen havainnointiin ja muistuttaa aikuisten P3a-vastetta (Kushnerenko, Čeponiene, Balan, Fellman & Näätänen, 2002). Vauvojen herätevästeiden tutkiminen ja tulkitseminen onkin huomattavasti haastavampaa kuin lasten tai aikuisten. Tästä huolimatta muutamia EEG-tutkimuksia liittyen vauvojen lukumääräisyyden tajuun on tehty. MMN/MMR-vastetta hyödyntäen muun muassa Ruusuvirta, Huotilainen, Fellman ja Näätänen (2009) ovat alustavasti havainnoineet lukumääräisyyden tajua jopa alle viikon ikäisillä vauvoilla. Tutkimuksessa vastasyntyneet kykenivät erottelemaan tilanteen, jossa standardiärsykkeessä kaksi eritaajuista ääntä esiintyivät suhteessa 2:2 ja deviantissa suhteessa 4:0, mutta ei näiden äänien esiintyessä deviantissa suhteessa 3:1. Pienempi ero jäi siis havaitsematta, kun taas suurempi havaittiin.

Myös Hyde ja Spelke (2011) ovat tutkineet lukumääräisyyden tajua ja tarkentaneet likimääräisen hahmottamisen järjestelmän neurologisia alueita. He havaitsivat, että visuaalisessa koeasetelmassa alle puolivuotiailla vauvoilla esiintyi päälakilohkoilla P500-vaste suuria lukumääriä

vertailtaessa ja takaraivo-ohimolohkoilla P400-vaste pienten lukumäärien kohdalla. Tulokset muistuttivat aikuisten vastaavia aiovasteita, jotka ilmenevät hiukan aikaisemmin. Viimeisimmäksi tutkimuksen ovat julkaisseet Gennari, Dehaene, Valera ja Dehaene-Lambertz (2023), jotka tarkensivat kolmen kuukauden ikäisten vauvojen lukumääräisyyden tajuun liittyviä herätevasteita. Visuaalisia ja auditorisia ärsykeitä sisältävässä koeasetelmassa he havaitsivat noin 400 ms kohdalla lukumääräisyydelle erityisen positiivisen aiovasteen, kun vauvat vertailivat suuria lukumääriä keskenään. Havaittu vaste oli vireystilasta sekä aistijärjestelmästä riippumaton.

1.6 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Matemaattiset taidot ovat laaja ja monimuotoinen kokonaisuus, jonka avulla ajattelemme ja toimimme ympäristössämme. Matemaattisten taitojen perustana nähdään muun muassa synnynnäinen lukumääräisyyden taju, joka koostuu symbolisista ja ei-symbolisista taidoista sekä lukumäärän ja numerosymbolin yhdistämisen taidosta. Lukumääräisyyden taju voidaan lisäksi jakaa pienten ja suurten lukumäärien havaitsemiseen. Lukumääräisyyden tajua on tutkittu erityisesti aikuisilla hyödyntäen edellä mainittuja jaotteluja sekä tarkentaen näiden välisiä yhteyksiä toisiinsa, mutta tarkempaa tutkimusta eri järjestelmien toiminnasta ja kehityksestä kaivataan. Tutkimukset matemaattisten taitojen ja haasteiden periytyvyydestä ovat antaneet viitteitä lukumääräisyyden tajun osallisuudesta matemaattisiin haasteisiin sekä näiden periytyvyydestä yleensä. Lisätutkimukselle ja tarkemmalle ymmärrykselle haasteiden yhteyksistä lukumääräisyyden tajun eri osiin on kuitenkin tarvetta. Lukumääräisyyden tajun taustalla on havaittu vaikuttavan useita aivoalueita, joista (oikea) intraparietaalinen uurre eli IPS on saanut erityistä huomiota.

Vaikka lukumääräisyyden taju on synnynnäinen ominaisuus, on sen tutkiminen erityisesti vauvoilla vasta alkutekijöissään. Tutkimuksia on tehty verrattain vähän, ja näistä suurimmassa osassa on käytetty katseen kohdistamiseen kuluvaan aikaan mittaavaa koeasetelmaa. Edellistä ei vastasyntyneillä pystytä luotettavasti käyttämään, eikä sillä saada tietoa lukumääräisyyden tajun tarkemmista aivomekanismeista. Aivokuvantamismenetelmiä on hyödynnetty tutkimuksissa toistaiseksi vähänlaisesti. Näiden avulla on saatu kuitenkin näyttöä siitä, että vauvat havaitsevat sekä pieniä että suuria lukumääriä ja että jonkintasoisia eroja suhteessa aikuisten aiovasteisiin löytyy.

Vastasyntyneiden kohdalla lukumääräisyyden tajuun liittyviä avoimia kysymyksiä on vielä paljon. Missä määrin vastasyntyneet kykenevät havaitsemaan esimerkiksi pieniä lukumääriä ja miten tämä näyttäytyy aivoissa? Lisäksi vastasyntyneiden lukumääräisyyden tajun ja vanhempien matemaattisten taitojen välinen yhteys on täysin koskematon tutkimusalue. Olisiko mahdollista, että

matemaattisten haasteiden perinnöllisyys näkyisi jo näin varhaisissa matemaattisissa taidoissa? Tutkimuksemme tavoitteena on tarttua edellä mainittuihin kysymyksiin ja tarkastella, miten vastasyntyneet havaitsevat pieniä lukumääriä ja kuinka tämä on yhteydessä vanhempien matemaattisiin taitoihin. Tutkimuskysymyksemme ovat seuraavat:

1. Havaitsevatko vastasyntyneiden aivot eroja pienissä lukumäärissä auditorisessa koeasetelmassa?
 - a. Eroavatko aiovasteet 2-osaiseen ja 1-osaiseen sekä 2-osaiseen ja 3-osaiseen siniääneen toisistaan?
 - b. Onko aivopuoliskojen välillä eroa aiovasteissa?

Tutkimuskirjallisuuden perusteella oletamme, että vastasyntyneiden aivot kykenevät havaitsemaan eroja pienissä lukumäärissä auditorisessa koeasetelmassa. Eroavaisuuksia ei 2-osaisen ja 1-osaisen sekä 2-osaisen ja 3-osaisen siniääneen eron havaitsemisessa odottaisi ilmenevän suuresti, sillä ne kuuluvat samaan lukumäärän havaitsemisen järjestelmään. Lukumäärien suhde tosin eroaa hieman ollen ensimmäisessä tilanteessa 1:2 ja toisessa 2:3, millä voi olla merkitystä (ks. esimerkiksi Ruusuvirta ym., 2009). Aivopuoliskoja vertailtaessa olisi oletettavaa, että vasteet oikean ja vasemman puoliskon välillä eroaisivat jonkin verran toisistaan. Vaikka tutkimuskirjallisuus onkin osin ristiriitaista, oletamme tutkimuksessamme oikean aivopuoliskon aktivaation olevan vasenta selvempää (ks. Ansari ym., 2005; Hyde ym., 2010; Izard ym., 2008)

2. Ovatko vastasyntyneiden aiovasteet pieniin lukumääriin yhteydessä vanhempien ei-symbolisiin tai symbolisiin matemaattisiin taitoihin?

Nojaten vähäiseen olemassa olevaan tutkimuskirjallisuuteen likimääräisen järjestelmän periytyvyydestä (Lukowski ym., 2017; Viktorsson ym., 2023) on oletettavaa, että vanhempien matemaattisilla taidoilla olisi jonkintasoista yhteyttä vastasyntyneiden aivojen kykyyn havaita myös pieniä lukumääriä. Koska vastasyntyneillä tutkitaan ei-symbolista lukumääräisyyden tajua, yhteyden olettaisi olevan merkittävämpi vanhempien ei-symbolisten kuin symbolisten taitojen kohdalla.

2 MENETELMÄT

2.1 EarlyMath-projekti

Pro gradu –tutkielmamme tehdään osana Jyväskylän yliopiston Opettajankoulutuslaitoksen EarlyMath-hanketta. Hankkeen tavoitteena on tutkia matemaattisten taitojen, tunteiden ja motivaation kehityspolkuja syntymästä kouluikään. 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. EarlyMath-hankkeen kesto on 2022–2026 ja se koostuu kolmesta eri seurantatutkimuksesta. Tutkimuksessamme käytetty aineisto on kerätty osana “Vauvan ensiaskeleet matematiikkaan” osahanketta. Kyseinen osahanke seuraa vauvoja syntymästä 3,5 vuoden ikään asti. Osahankkeeseen kuuluu muun muassa EEG-mittauksia, vauvan unirytmien mittaus, vanhempien matemaattisten taitojen kartoitus ja lapsen matemaattisten taitojen kartoituksia lapsen ollessa 2,5- ja 3,5-vuotias.

Olemme rajanneet tutkimuksemme aiheeksi vastasyntyneiden aivojen kyvyn havaita eroja pienissä lukumäärissä ja tämän yhteyden vanhempien matemaattisiin taitoihin. Tutkimuksessamme on käytetty aineistona vastasyntyneiden EEG-mittauksia sekä vanhempien matemaattisten taitojen testituloksia.

2.2 Otos ja aineistonkeruu

Tutkimuksessamme käytetty aineisto on kerätty vuosien 2022–2024 aikana. Aineisto koostui vastasyntyneistä ($n = 47$), sekä heidän äideistään ($n = 36$) ja isistään ($n = 51$). Vanhempien epätasainen jakautuminen johtui periaatteesta, jolla vanhemmat kutsuttiin mukaan testauksiin; isät voitiin testata jo raskauden aikana, mutta äitien kohdalla synnytyksen jälkeen haluttiin odottaa vähintään puoli vuotta, ettei synnytyksen jälkeinen hormonien epätasapaino vaikuttaisi suoriutumiseen testeissä.

Tutkittavat rekrytoitiin pääosin Jyväskylän alueelta äitiysneuvoloiden kautta, mutta myös sosiaalisen median kautta, ja siksi osa tutkittavista on hakeutunut tutkimukseen mukaan kaukaisemmiltakin paikkakunnilta. Jyväskylän alueella lähikuntineen asuu noin 200 000 asukasta ja alue vastaa hyvin suomalaista keskimääräistä populaatiota. Tutkimukseen kutsuttiin sekä perheitä,

joissa on matemaattisia oppimisvaikeuksia, että perheitä, joiden jäsenillä ei ole todettu matemaattista oppimisvaikeutta. Emme ole ottaneet tutkimukseemme diagnosoituja matemaattisia oppimisvaikeuksia tarkemmin huomioon. Aineistosta on poistettu vastasyntyneet, jotka ovat syntyneet erityisen pienikokoisina, joilla on ollut kuulovaikeuksia tai joilla on ilmennyt muita tekijöitä, jotka voisivat vaikuttaa koeasetelman luotettavuuteen. Lisäksi vanhempien täyttämän esitietolomakkeen perusteella tutkimukseemme on valittu mukaan ainoastaan biologiset vanhemmat.

EEG-mittaukset toteutettiin Jyväskylän yliopiston tiloissa EEG-mittauksiin tarkoitettussa laboratorioissa. Mittaus suoritettiin, kun vastasyntyneiden ikä oli 2–3 viikkoa lasketusta ajasta katsottuna. Koeasetelmien äänisarjojen järjestys satunnaistettiin ennen jokaisen mittauksen alkua ja itse mittausaika alku- ja loppuvalmisteluineen kesti noin puolitoista tuntia. Ääniärsykkeiden lisäksi vastasyntyneiltä tallennettiin myös mahdollisuuksien mukaan lepoaktiivisuutta. Mittauksen aikana mukana olevat vanhemmat täyttivät suostumuslomakkeen sekä vastasyntyneen esitietolomakkeen. Kaikilta mukana olevilta vanhemmilta ja vastasyntyneitä koskien vähintään toiselta vanhemmalta on saatu suostumus tutkimukseen osallistumiseen. Myös vanhempien matemaattisten taitojen testaukset tehtiin Jyväskylän yliopiston tiloissa. Vanhempien testaukset olivat yksilötilanteita, joissa työskentelivät perehdytetyt tutkimusavustajat. Testaukseen kului yhteensä noin kaksi tuntia, jonka aikana oli mahdollista pitää lyhyt tauko.

2.3 Mittarit ja muuttujat

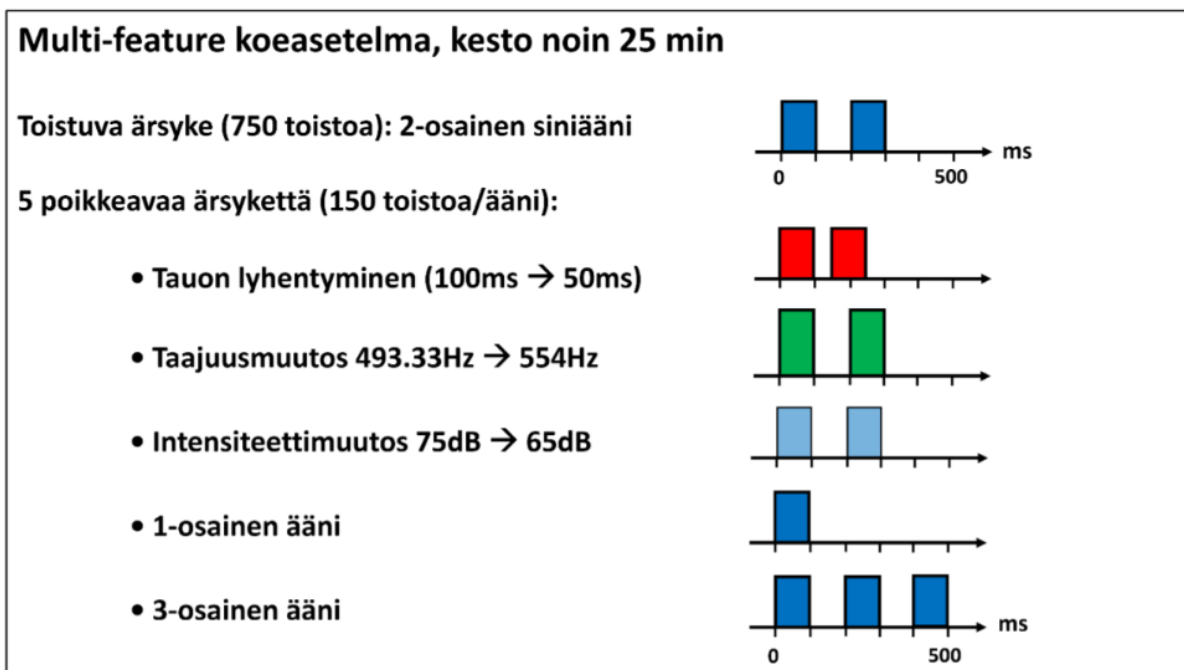
2.3.1. Vastasyntyneiden EEG:n mittaaminen ja esikäsittely

EEG-mittaukset suoritettiin akustisesti ja sähköisesti suojatussa huoneessa. Mittauksen aikana vastasyntyneet nukkuivat pinnasängyssä tai vanhempansa sylissä kattoon kiinnitetyn kaiuttimen alla. Mikäli lapsi oli kovin itkuinen eikä nukahtanut, mittaus keskeytettiin. EEG mitattiin unen aikana, sillä vastasyntyneen aivot prosessoivat ääniä erittäin aktiivisesti myös hiljaisen unen aikana. Jatkuvaa EEG:tä mitattiin käyttämällä langatonta LiveAmp-vahvistinta ja BrainVision Recorder 1.24 -ohjelmistoa (<https://www.brainproducts.com/solutions/liveamp/>). Jatkuvaa EEG:tä tallennettiin 500 Hz näytteenottotaajuudella ja 19 kanavalla (Fp1, Fz, F3, F7, C3, T7, Pz, P3, P7, O1, O2, P4, P8, Cz, C4, T8, F4, F8, Fp2) käyttäen EasyCap-merkkistä aktiivielektrodimyyssyä (actiCAP snap, EasyCap, GmbH, Gilching, Saksa). Referenssielektrodi sijaitsi kanavapaikalla AFz ja maadoituselektrodi kanavapaikalla TP10. Kaikkien elektrodien impedanssit pyrittiin pitämään alle 20 kΩ.

Mittauksen aikana käytettiin 0–131 Hz kaistanpäästösuodatinta. Siniäänet, joiden taajuus oli 493,33 Hz, luotiin Audacity-ohjelmalla (Audacity® versio 3.4; <https://www.audacityteam.org/>). Äänet esitettiin multi-feature-koeasetelmassa Presentation® -ohjelmistolla (versio 20.2, Neurobehavioral Systems) äänenvoimakkuudella 75 dBA katossa olevan kaiuttimen avulla. Koeasetelma muodostui äänisarjasta: standardiärsykkeestä (2-osainen siniääni) sekä devianttiärsykkeistä (1-osainen ja 3-osainen siniääni). Edellisten lisäksi koeasetelmaan kuului kolme muuta poikkeavaa ääniärsykettä, joita emme tutkimuksessamme huomioineet tarkemmin. Tarkemmat tiedot koeasetelmasta ja sen äänisarjasta on esitetty kuvioissa 3 ja 4.

Kuvio 3

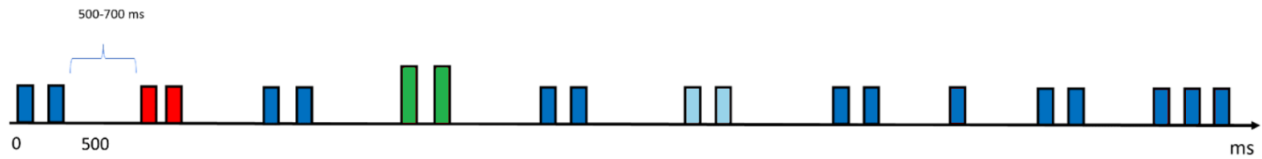
Auditorinen koeasetelma



Huom. Tutkimuksessamme keskityimme ainoastaan tummemman sinisellä kuvattuihin eli lukumäärään liittyviin ärsykkeisiin (2-osainen, 1-osainen ja 3-osainen siniääni).

Kuvio 4

Ote koeasetelmasta



EEG-aineisto esikäsiteltiin MNE Python -ohjelmistoa käyttäen (Spyder/Python 3.10.4/ IPython 7.32.0). Huonot kanavat merkittiin ja interpoloitiin. Häiriöt korjattiin riippumattomien komponenttien analyysillä (ICA). EEG-aineisto suodatettiin digitaalisesti 0.1–30 Hz kaistanpäästösuoittimella ja uudelleenreferoitiin kanavien P7 ja P8 keskiarvoon. Häiriöiden poiston jälkeen aineisto segmentoitiin ja keskiarvoistettiin jokaisen ärsykkeen ja jokaisen koehenkilön osalta erikseen aikaikkunalla -100–1000 ms. Baseline-aikana käytettiin aikaikkunaa -100–0 ms. Lopuksi laskettiin vielä ryhmäkeskiarvot yksilökeskiarvoista ärsyketyypeittäin. Kaikkien ääniärsykkeiden osalta ryhmäkeskiarvojen kaikki aikapisteen 0–1000 ms väliltä tuotiin erillisinä muuttujina IBM SPSS Statistics 28.0.0.0-ohjelmistoon, jossa myöhemmät tilastolliset analyysit suoritettiin. Valitsimme analyysiin kanavat P3 ja P4 näiden lukumääräisyyden tajulle oleellisen sijainnin perusteella. Kyseiset kanavat sijaitsevat suunnilleen vasemman ja oikean IPS:n kohdalla.

2.3.2 Vanhempien matemaattisten taitojen mittaaminen ja muuttujien muodostaminen

Symboliset taidot

EarlyMathin vanhempien taitojen testistössä oli yhteensä yhdeksätoista erilaista kognitiiviseen tasoon, kieleen ja matematiikkaan liittyvää testiä. Näistä tarkempaan arviointiin valittiin kahdeksan matematiikkaan liittyvää testiä. Korrelaatiomatriisia tarkastelemalla havaittiin, että tilastollisesti mielekäs muuttuja kuvaamaan symbolista peruslaskutaitoa saataisiin yhdistämällä yhteen-, vähennys- ja kertolaskutestit sekä aritmetiikkatesti. Kyseiset testit on esitelty alla.

Yhteenlasku. Testissä tutkittavalla oli yksi minuutti aikaa laskea mahdollisimman monta yhteenlaskutehtävää mahdollisimman tarkasti ja nopeasti (Koponen & Mononen, 2010a). Tutkittava sai harjoitella ennen testiä kahdella esimerkkilaskulla. Laskuja oli yhteensä 120 ja yhteenlaskettavat luvut olivat 1–9 suuruisia. Laskutoimitusten vastaukset olivat aina positiivisia kokonaislukuja.

Laskutoimitukset ovat esimerkiksi $2 + 1$ tai $8 + 7$. Jos tutkittava huomasi tehneensä väärän vastauksen, häntä pyydettiin suttaamaan tämä ja kirjoittamaan viereen oikea. Valitsimme yhteenlaskujen osaamista kuvaavaksi muuttujaksi oikeiden laskettujen tehtävien määrän.

Vähennyslasku. Vähennyslaskutestissä tutkittavalla oli yhteenlaskujen tapaan yksi minuutti aikaa laskea 120 tehtävästä niin monta kuin mahdollista (Koponen & Mononen, 2010b). Tutkittava sai harjoitella ennen testiä kahdella esimerkkilaskulla. Vähennyslaskujen luvut olivat väliltä 1–18 ja niiden vastaukset olivat aina positiivisia kokonaislukuja väliltä 1–10. Esimerkkejä vähennyslaskuista ovat $8-6$ ja $15-8$. Jos tutkittava huomasi tehneensä väärän vastauksen, häntä pyydettiin suttaamaan tämä ja kirjoittamaan viereen oikea. Valitsimme vähennyslaskujen osaamista kuvaavaksi muuttujaksi oikeiden laskettujen tehtävien määrän.

Kertolaskut. Testissä tutkittavan tuli kahden minuutin aikana laskea niin monta kertolaskutehtävää kuin mahdollista (Koponen & Mononen, 2010c). Laskutehtäviä oli yhteensä 120 ja ne koostuivat kertolaskuista luvuilla 1–9. Esimerkkejä kertolaskuista ovat 6×2 ja 8×5 . Kertolaskujen tulokset olivat positiivisia kokonaislukuja. Tutkittava sai harjoitella ennen testiä kahdella esimerkkilaskulla. Mikäli tutkittava huomasi tehneensä virheen, häntä pyydettiin suttaamaan väärä vastaus ja kirjoittamaan sen viereen oikea. Valitsimme kertolaskujen osaamista kuvaavaksi muuttujaksi oikeiden laskettujen tehtävien määrän.

Aritmetiikka. Tässä testissä tutkittavan tuli laskea mahdollisimman nopeasti ja tarkasti niin monta laskutehtävää kuin hän ehti kolmen minuutin aikana (Aunola & Räsänen, 2007). Tutkittavaa ohjeistettiin siirtymään seuraavaan tehtävään, mikäli joku tehtävistä tuntui ylivoimaiselta. Laskutehtäviä oli yhteensä 28 ja ne alkoivat helpoista tehtävistä, kuten esimerkiksi $15-9$ tai $22 + 44$. Tehtävät vaikeutuivat sitä mukaa, mitä pidemmälle tutkittava pääsi. Loppupuolen tehtäviä ovat esimerkiksi $976-340$, $40 \div 8-3$ ja $x-18 = 45-12$. Tehtävien vastaukset olivat positiivisia kokonais- ja murtolukuja. Mikäli tutkittava huomasi tehneensä virheen, häntä pyydettiin suttaamaan väärä vastaus ja kirjoittamaan sen viereen oikea. Tutkittavaa sai tehdä kaksi harjoitustehtävää ennen varsinaisen testin aloitusta. Valitsimme aritmetiikan osaamista kuvaavaksi muuttujaksi oikein laskettujen tehtävien määrän.

Edellä esitettyjä testejä on käytetty myös muissa tutkimuksissa matemaattisen osaamisen luotettavassa erottelussa (Koponen ym., 2018; Koponen ym., 2021; Pakarinen ym., 2017). Testien ominaisuudet auttavat matemaattisten haasteiden tunnistamisessa ja sopivat yhteen muun muassa

ICD-11:ssä (WHO, 2018) mainittujen matemaattisten haasteiden perusvaikeuksien kanssa. Vanhempien symbolisia matemaattisia taitoja kuvaamaan valittuja muuttujia esikäsiteltiin ennen tilastollisia analyysejä. Peruslaskutaidon muuttujaa varten valitut muuttujat olivat eri asteikkollisia, minkä vuoksi ne standardoitiin. Uusista standardoiduista arvoista muodostettiin kullekin vanhemmalle keskiarvomuuttuja. Näin saatua muuttujaa arvioitiin Cronbachin alfalla, joka oli .89. Vanhemman peruslaskutaidon muuttuja kuvaa siis hyvin vanhemman symbolista matemaattista peruslaskutoimitusten osaamista.

Ei-symboliset taidot

Matemaattiset taidot koostuvat merkittävässä määrin myös ei-symbolisista taidoista. Tätä kuvaamaan valitsimme vanhempien testistöstä määrienvertailun testin, joka on esitelty alla.

Määrienvertailu. Määrienvertailun testissä tutkittavan tuli arvioida, kummassa kahdesta laatikosta oli lukumäärällisesti enemmän mustia palloja (Nosworthy ym., 2013). Palloja ei saanut laskea, vaan tutkittavan tuli tehdä silmämääräinen arvio mahdollisimman nopeasti ja tarkasti ja viivata yli se laatikko, jossa palloja oli enemmän. Tutkittava sai harjoitella kahdella harjoitustehtävällä ennen varsinaista testiä. Laatikkopareja oli testipaperissa yhteensä 30 ja pallojen määrät vaihtelivat laatikoissa kahdesta yhdeksään. Mikäli tutkittava huomasi tehneensä virheen, häntä pyydettiin suttaamaan väärä vastaus ja tekemään sen jälkeen oikea. Valitsimme tehtävän tekoon käytetyn ajan kuvaamaan lukumäärien havaitsemisen taitoa.

Kuten aiemmin esiteltyjä testejä, myös määrienvertailun testiä on arvioitu ja käytetty useammassa tutkimuksessa (ks. esimerkiksi Bugden ym., 2021, Hawes ym., 2019). Ennen tilastollisia analyysejä lukumäärienvertailun testin aikamuuttujaa esikäsiteltiin. Muodostimme uuden muuttujan tallentamalla standardoitujen jäännösten arvot lineaarisessa regressioanalyysissä, jossa lukumäärienvertailun aikaa ennustettiin vanhempien testistöön kuuluvalla WAIS:in prosessointinopeuden testituloksella. Ei-symbolisten taitojen mittana käytettiin näin lukumäärienvertailun tehtävän tekoon käytettyä aikaa, josta oli poistettu yksilöllinen prosessointinopeus. Kyseinen muuttuja kuvaa mahdollisimman tarkasti haluttua taitoa eli vanhempien ei-symbolista lukumääräisyyden havaitsemista.

2.4 Tilastolliset analyysit

Teimme tilastolliset analyysit käyttäen IBM SPSS Statistics 28.0.0.0-ohjelmistoa. Tarkistimme symbolisten ja ei-symbolisten matemaattisten taitojen muuttujien välisen yhteyden korrelaation avulla. Korrelaatio oli hyvin vähäinen ($r = -.073$, $p = .505$), mistä voidaan päätellä peruslaskutaitomuuttujan eli symbolisten taitojen muuttujan ja lukumäärienvertailun taidon muuttujan eli ei-symbolisten taitojen muuttujan todella mittaavan eri asioita.

Analyysien suorittamista varten vastasyntyneistä ja vanhemmista oli muodostettava vastasyntynyt-vanhempi-parit. Otoksessamme vastasyntyneitä oli 47, äitejä 36 ja isiä 51. Parien muodostamiseen tarvittiin perheyksiköitä, joissa aineistoa oli kerätty sekä vastasyntyneeltä että vähintään toiselta vanhemmalta. Mikäli kummatkin vanhemmat oli testattu, vanhempi valittiin mukaan satunnaistamalla. Muussa tapauksessa mukaan valittiin ainoa vanhempi, joka oli testattu. Lopulliseen otokseen valikoitui 41 vastasyntynyt-vanhempi-paria, joissa äitejä oli 16 ja isiä 25. Näin toimimalla saatiin myös muodostettua suurin mahdollinen otoskoko. Emme huomioineet vastasyntyneiden ja vanhempien kohdalla tarkemmin sukupuolta, sillä emme nähneet tälle olevan riittävästi perusteluja.

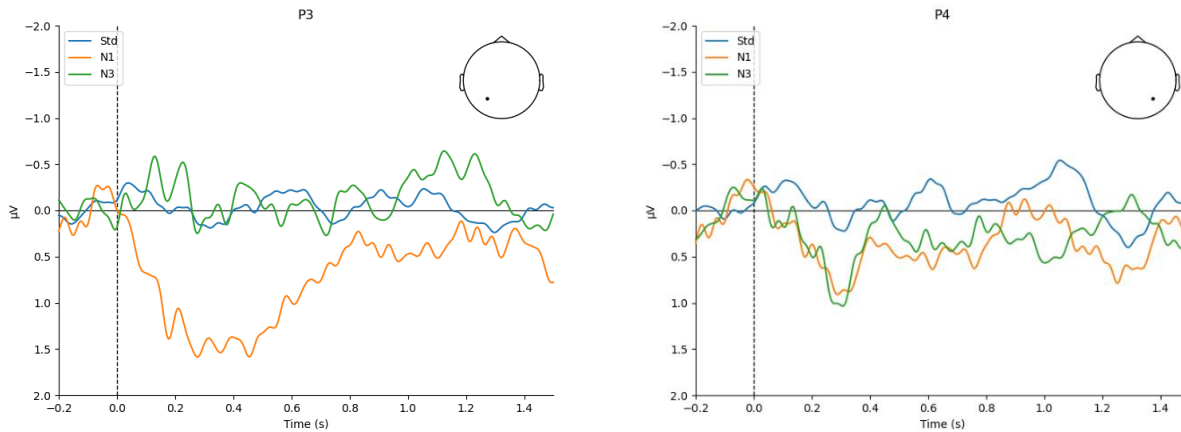
Sekä ensimmäiseen että toiseen tutkimuskysymykseen vastattiin samalla tilastollisella analyysillä. Teimme toistettujen mittausten varianssianalyysin, jossa selitettävänä muuttujana oli vastasyntyneiden aiovasteiden suuruus kanavilla P3 ja P4 ja selittävinä tekijöinä ärsyketyypit sekä vastasyntyneiden aivopuoliskot. Kovariaattina mallissa olivat vanhempien matemaattiset taidot. Pienen otoskoon vuoksi teimme kaksi erillistä analyysiä, joista toisessa oli kovariaattina vanhemman peruslaskutaidon muuttuja ja toisessa vanhemman lukumäärienvertailun muuttuja. Tutkimuksen eksploraatiivisen otteen vuoksi analysoimme auditorisen ärsykkeen jälkeistä 100–1000 millisekunnin aikaväliä 100 ms mittaisina analyysiväleinä. Jokaiselle vastasyntyneelle laskettiin kussakin 100 ms jaksossa keskiarvot kolmelle ärsyketyypille, joita olivat standardi (2-osainen siniääni) sekä deviantti N1 (1-osainen siniääni) ja deviantti N3 (3-osainen siniääni).

3 TULOKSET

Tutkimuksessamme tarkastelimme, havaitsevatko vastasyntyneiden aivot eroja pienissä lukumäärissä auditorisessa koeasetelmassa. Lisäksi selvitimme, onko vastasyntyneiden aiovasteilla ja vanhempien matemaattisilla taidoilla yhteyttä. Kuviossa 5 on esitetty vastasyntyneiden aiovasteet vasemman (P3) ja oikean (P4) aivopuoliskon parietaalikanavilla.

Kuvio 5

Vasemman aivopuoliskon (P3) ja oikean aivopuoliskon (P4) päälakilohkojen aivosähkökäyrät standardille (sininen), deviantille N1 (oranssi) ja deviantille N3 (vihreä)



Huom. Std = standardiärsyke (2-osainen siniääni), N1 = devianttiärsyke N1 (1-osainen siniääni), N3 = devianttiärsyke N3 (3-osainen siniääni). X-akseli kuvaa kulunutta aikaa sekunteina auditorisen ärsykkeen alusta lähtien ja Y-akseli aiovasteen voimakkuutta mikrovoltteina. Ärsykkeet alkavat kohdassa 0.0 s.

3.1 Vastasyntyneiden aivojen kyky havaita eroja pienissä lukumäärissä

Sekä peruslaskutaidon että lukumäärienvertailun taidon ollessa kovariaattina kullakin 100 millisekunnin analyysivälillä aikavälillä 200–600 ms ärsykkeen päävaikutus oli merkitsevä niin, että deviantti N1 synnytti standardia suuremman positiivisen vasteen ($p = .001-.006$, $\eta_p^2 = .182-.269$). Lisäksi peruslaskutaidon ollessa kovariaattina myös analyysivälillä 600–700 ms ärsykkeen päävaikutus oli merkitsevä niin, että deviantti N1 synnytti standardia suuremman positiivisen vasteen ($p = .006$, $\eta_p^2 = .177$). Analyysivälillä 600–700 ms lukumäärien vertailun ollessa kovariaattina puolestaan havaittiin yhdysvaikutus vanhemman taidon kanssa niin, että deviantti N3 synnytti

standardia positiivisemmän vasteen. Kyseinen tulos on avattu tarkemmin toisen tutkimuskysymyksen tuloksissa. Analyysivälillä 100–200 ms ja 700–1000 ms ei löytynyt merkitseviä yhteyksiä kummassakaan analyysissä. Taulukossa 1 on esitelty tutkittavien tiedot ja taulukossa 2 vanhempien matemaattisten taitomuuttujien tiedot. Varianssianalyysien tulokset on esitelty taulukoissa 3 ja 4.

Taulukko 1

Vanhempien ikä (vuosina) ja vastasyntyneiden ikä (päivinä, lasketusta ajasta katsoen)

	n	ka	SD	min	max
Vanhemmat	41	34,74	3,994	27	46
Vastasyntyneet	41	22,73	4,642	11	34

Huom. ka = keskiarvo, SD = keskihajonta

Taulukko 2

Vanhempien matemaattisten taitomuuttujien tiedot

	n	ka	SD	vinous(kv)	huipukkuus(kv)
Peruslaskut	41	-0.143	0.824	0.236(0.369)	-0.343(0.724)
Lukumäärienvertailu	41	0.133	1.027	0.748(0.369)	0.220(0.724)

Huom. ka = keskiarvo, SD = keskihajonta, kv = keskivirhe

Taulukko 3

Toistettujen mittausten varianssianalyysi, jossa kovariaattina vanhemman peruslaskutaito

Aika	Päävaikutus						Yhdysvaikutus							
	Ärsyke		Peruslaskut		Kanava		Ärsyke x Kanava		Ärsyke x Peruslaskut		Peruslaskut x Kanava		Ärsyke x Kanava x Peruslaskut	
	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2
100–200 ms	1.890	.090	.433	.011	1.409	.035	2.055	.050	.550	.028	.010	.000	.216	.006
200–300 ms	4.128*	.096	1.177	.029	.249	.006	2.721	.065	.033	.001	.002	.000	1.011	.025
300–400 ms	5.278*	.119	3.871	.090	2.694	.065	2.368	.111	.631	.016	2.858	.068	2.032	.097
400–500 ms	4.823*	.110	2.371	.057	2.392	.058	2.480	.060	.814	.020	1.066	.027	.137	.003
500–600 ms	4.443*	.102	5.994*	.133	.211	.005	.397	.020	.493	.012	.761	.019	.067	.003
600–700 ms	4.275*	.184	1.860	.046	.165	.004	.052	.003	.222	.012	1.841	.045	.609	.031
700–800 ms	1.868	.090	2.337	.057	.021	.001	.312	.008	.129	.007	2.486	.060	.179	.005
800–900 ms	.359	.009	.201	.005	.230	.006	.495	.025	.007	.000	.121	.003	.913	.046
900–1000 ms	1.697	.082	.221	.006	.199	.005	.646	.033	.522	.027	.113	.003	1.432	.070

Huom. $p < .05^*$

Taulukko 4

Toistettujen mittausten varianssianalyysi, jossa kovariaattina vanhemman lukumäärienvertailun taito

Aika	Päävaikutus						Yhdysvaikutus							
	Ärsyke		Lukumäärien- vertailu		Kanava		Ärsyke x Kanava		Ärsyke x Lukumäärien- vertailu		Lukumäärien- vertailu x Kanava		Ärsyke x Kanava x Lukumäärien- vertailu	
	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2	<i>F</i>	η_p^2
100–200 ms	2.444	.114	.019	.000	1.693	.042	1.829	.045	.384	.020	.405	.010	1.539	0.38
200–300 ms	4.654*	.107	.202	.005	.175	.004	2.045	.050	.323	.008	.539	.014	.255	.006
300–400 ms	5.387*	.121	.718	.018	1.239	.031	1.638	.079	.798	.020	4.152*	.096	.410	.021
400–500 ms	4.437*	.102	.006	.000	1.380	.034	2.599	.062	.205	.005	3.480	.082	.248	.006
500–600 ms	4.660*	.107	.133	.003	.019	.000	.553	.028	2.086	.051	1.833	.045	.770	.039
600–700 ms	3.946*	.172	.286	.007	.018	.000	.016	.001	3.400*	.152	.065	.002	.058	.003
700–800 ms	1.634	.079	1.365	.034	.064	.002	.426	.011	1.394	.068	.940	.024	.365	.009
800–900 ms	.435	.011	.001	.000	.387	.010	.428	.022	.526	.013	2.106	.051	.458	.024
900–1000 ms	1.389	.068	.026	.001	.255	.007	1.079	.054	.502	.026	.000	.000	1.107	.055

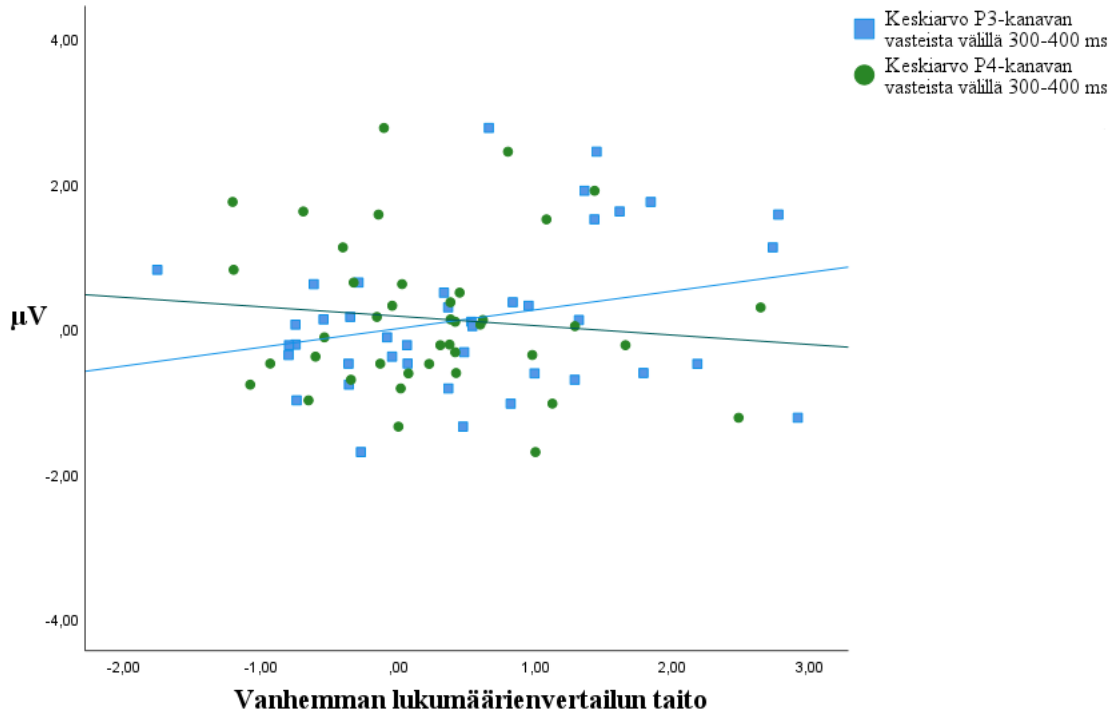
Huom. $p < .05^$*

3.2 Vanhempien matemaattisten taitojen yhteys vastasyntyneiden aivovasteisiin

Analyysivälillä 300–400 ms vanhempien lukumäärienvertailun taidolla ja vastasyntyneiden aivopuoliskolla havaittiin yhdysvaikutus; vanhempien taidoilla oli yhteys vastasyntyneiden aivopuoliskojen kykyihin erotella ärsykkeet toisistaan ärsyketypistä riippumatta ($p = .048$, $\eta_p^2 = .096$) (taulukko 4). Teimme jatkoanalyysin, jossa laskimme kummallekin aivopuoliskolle kaikkien kolmen ärsyketypin keskiarvon. Tämän jälkeen laskimme näin saatujen aivopuoliskojen keskiarvojen ja vanhemman lukumäärienvertailun taidon välisen korrelaation, joka näytti vanhempien taitojen ja vastasyntyneiden aivopuoliskojen vaste-erojen yhteyden olevan positiivinen ($r = .310$, $p = .048$). Toisin sanoen, mitä parempi vanhempien lukumäärienvertailun taito oli, sitä suurempi myös vastasyntyneiden vasemman ja oikean aivopuoliskon vasteiden ero ärsyketypistä riippumatta oli. Korrelaatio on esitetty tarkemmin kuviossa 6.

Kuvio 6

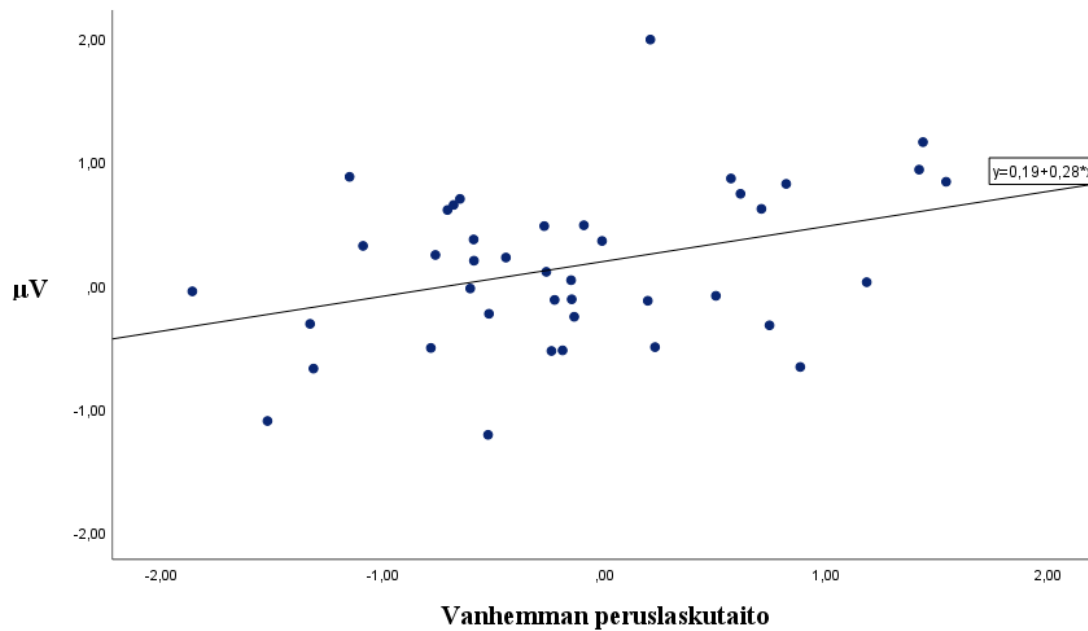
Vanhemman lukumäärienvertailun taidon ja vastasyntyneen aivovasteiden keskiarvojen välinen korrelaatio vasemmalla (P3-kanava, sininen neliö) ja oikealla aivopuoliskolla (P4-kanava, vihreä pallo) analyysivälillä 300–400 ms



Analyysivälillä 500-600 ms havaittiin vanhempien peruslaskutaidon päävaikutus ($p = .019$, $\eta_p^2 = .133$) (taulukko 3). Teimme jatkoanalyysin, jossa laskimme keskiarvon kaikista kolmesta ärsyketyypin aivovasteesta vastasyntyneiden kummallekin aivopuoliskolle, minkä jälkeen laskimme vielä aivopuoliskojen keskiarvon. Tämän jälkeen laskimme korrelaation vanhempien peruslaskutaidon ja muodostamamme keskiarvovasteen välille. Korrelaatio näytti yhteyden olevan positiivinen ($r = .365$, $p = .019$) tarkoittaen sitä, että vanhempien peruslaskutaitojen ollessa paremmat myös vastasyntyneiden aivovasteet ärsyketyypistä ja aivopuoliskosta riippumatta olivat suuremmat. Korrelaatio on esitetty kuviossa 7.

Kuvio 7

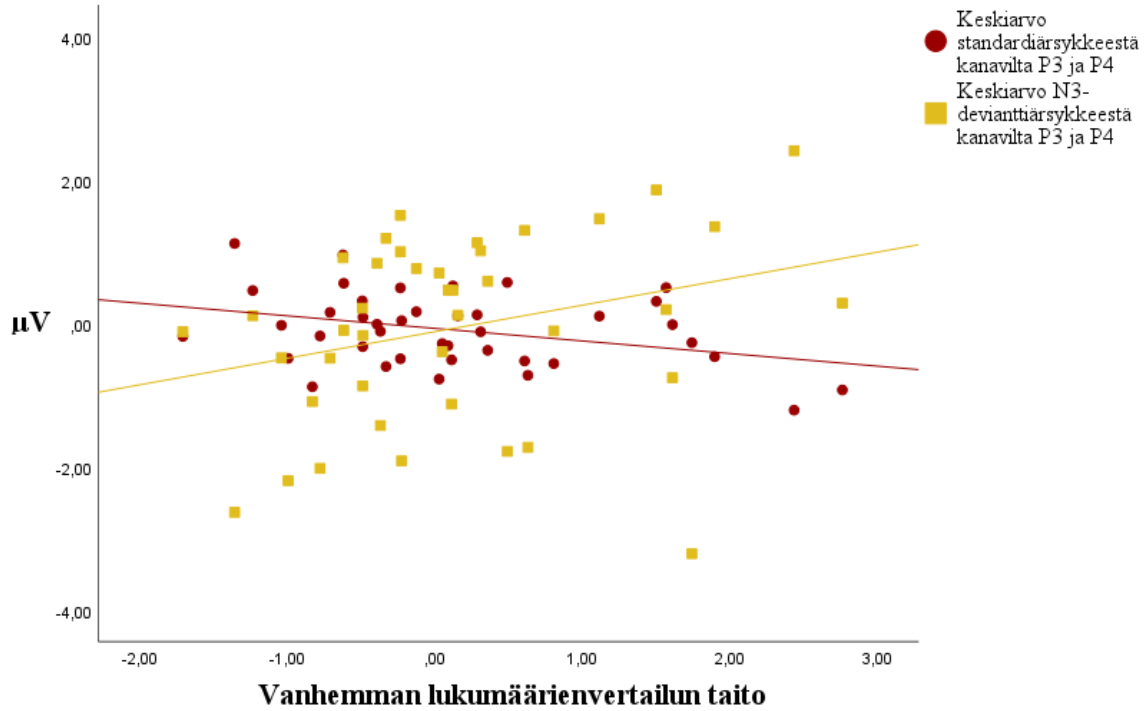
Vanhemman peruslaskutaidon ja vastasyntyneiden eri ärsyketyyppien aiovasteiden (std, N1 ja N3) keskiarvon välinen korrelaatio analyysivälillä 500–600 ms



Analyysivälillä 600–700 ms puolestaan vanhempien lukumäärienvertailun taidolla ja ärsykkeellä oli yhdysvaikutus; vanhempien taidolla oli yhteys vastasyntyneiden aivojen kykyyn erottaa standardi ja deviantti N3 toisistaan ($p = .012$, $\eta_p^2 = .152$) (taulukko 4). Teimme jatkoanalyysin, jossa laskimme keskiarvon molemmilta aivopuoliskoilta standardiärsykkeelle ja deviantille N3. Tämän jälkeen korreloimme saamamme kaksi keskiarvoa vanhempien lukumäärienvertailun taidon kanssa. Kyseisten muuttujien yhteys oli positiivinen ($r = .389$, $p = .012$), eli vanhempien lukumäärienvertailun taidon ollessa parempi myös deviantin N3 ja standardin välinen vaste-ero kasvoi aivopuoliskosta riippumatta. Korrelaatio on esitetty kuviossa 8.

Kuvio 8

Vanhemman lukumäärienvertailun taidon ja vastasyntyneen aivopuoliskojen keskiarvojen välinen korrelaatio standardiärsykkeelle (punainen pallo) ja devianttiärsykkeelle N3 (keltainen neliö) analyysivälillä 600–700 ms



4 POHDINTA

Tutkimuksemme tarkoituksena oli tarkastella, havaitsevatko vastasyntyneiden aivot eroja pienissä lukumäärissä auditorisessa koeasetelmassa ja onko tällä yhteyttä vanhempien matemaattisiin taitoihin. Ensimmäinen päähavaintomme oli, että aikavälillä 200–700 ms ärsykkeen alkamisesta vastasyntyneiden aivot erottivat 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänän toisistaan ja aikavälillä 600–700 ms 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänän toisistaan. 1-osaisen ja 3-osaisen siniäänän aiheuttamat vasteet olivat 2-osaisen aiheuttamia positiivisempia ja ilmensivät vastasyntyneiden MMN/MMR-vasteita. Erot aivopuoliskojen välillä eivät olleet selkeitä.

Toinen päähavaintomme oli, että vanhempien matemaattisilla taidoilla oli yhteys vastasyntyneiden aivojen kykyyn havaita eroja pienissä lukumäärissä. 300–400 ms kohdalla vanhempien lukumäärienvertailun taidolla ja vastasyntyneiden aivopuoliskoilla havaittiin yhteisvaikutus. Mitä paremmat vanhempien lukumäärienvertailun taidot siis olivat, sitä enemmän aivopuoliskojen vasteet erosivat toisistaan. 500–600 ms kohdalla puolestaan vanhempien peruslaskutaidolla oli omavaikutus, jolloin vanhempien paremmat peruslaskutaidot synnyttivät kauttaaltaan positiivisempia aiovasteita vastasyntyneillä, riippumatta ärsykkeestä tai aivopuoliskosta. Lisäksi 600–700 ms kohdalla vanhempien lukumäärienvertailun taidolla ja ärsykkeellä havaittiin yhteisvaikutus. Tällöin vanhempien suoriutumisella lukumäärienvertailun testissä oli positiivinen yhteys siihen, kuinka hyvin vastasyntyneiden aivot havaitsivat eron 2-osaisen ja 3-osaisen äänen välillä.

4.1 Vastasyntyneiden aivojen kyky havaita eroja pienissä lukumäärissä

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen kohdalla oletuksemme oli, että vastasyntyneiden aivot havaitsisivat eroja pienissä lukumäärissä riippumatta ärsykkeestä. Oletimme myös vastasyntyneen aivopuoliskoilla olevan eroja keskenään niin, että erot pienissä lukumäärissä havaittaisiin selvemmin oikealla aivopuoliskolla. Hypotesimme toteutui siinä määrin, että erot havaittiin järjestelmällisesti 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänän välillä usealla analyysivälillä peräkkäin ja 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänän välillä yhdellä analyysivälillä. Lisäksi eroavaisuus aivopuoliskoissa ilmeni vain yhdellä analyysivälillä niin, että vasemmalla puoliskolla vaste oli oikeaa positiivisempi.

On erikoista, että vastasyntyneiden aivot havaitsivat selkeästi eron 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänän välillä, mutta 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänän erottelu tapahtui vain yhdellä analyysivälillä.

Mikäli kyse on vastasyntyneiden aidosta kyvystä erotella pieniä lukumääriä toisistaan, olisi oletettavaa, että erot 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänen ja 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänen välillä havaittaisiin vastaavissa määrin. Analyysiväli, jolla vastasyntyneiden aivot havaitsivat eron 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänen välillä, oli 600–700 ms vanhemman lukumäärienvertailun taidon ollessa kovariaattina. Analyysiväli sopii aikaikkunaltaan lukumääräisyyden havaitsemisen ilmiöön, mutta eron havaitseminen ei 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänen tavoin jatkunut useammalla aikavälillä.

Eräs keino selittää erojen havaitsemisen korostumista 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänen välillä voisi olla vastasyntyneiden lukumäärän havaitsemisen järjestelmien kehittymättömyys. Esimerkiksi Coubartin, Izardin, Spelken, Marien ja Strerin (2014) näkö- ja kuuloaisteja yhdistävässä koeasetelmassa vastasyntyneet kykenivät erottelemaan asetelman, jossa vertailtavana oli 4 vs. 12 yksikköä, mutta ei asetelmaa, jossa vertailtavana oli 2 vs. 3 yksikköä. Tämän selitettiin johtuvan esimerkiksi siitä, että vastasyntyneiden pienten lukumäärien havaitsemisen raja menisi kahden ja kolmen yksikön välillä. Kolme olisi siis vastasyntyneillä suurten lukumäärien havainnoinnin piiriin kuuluva lukumäärä ja toimisi eri havaintojärjestelmässä kuin kaksi. Lisäksi Feigenson, Dehaene ja Spelke (2004) havaitsivat, että 10–12 kuukauden ikäiset vauvat pystyivät jo erottelemaan 2 vs. 3 yksikköä toisistaan; noin vuoden iässä havaitsemisen järjestelmät olivat kehittyneet ja kolme kuuluikin pieniin lukumääriin. Kyseisen teorian avulla voitaisiin mahdollisesti selittää myös tutkimuksessamme ilmenneitä tuloksia.

Toinen mahdollinen selitys Coubartin ja kumppaneiden (2014) tutkimustuloksille oli, ettei vastasyntyneillä olisi vielä kehittynyt pienten lukumäärien havaitsemisen järjestelmiä lainkaan, vaan havainnointi perustuisi johonkin muuhun. Yhden järjestelmän teorian (engl. one system view) (Hyde, 2011) avulla voisikin selittää sekä Coubartin ja kumppaneiden (2014) tutkimustuloksia että osittain omiamme. Kyseisessä teoriassa esitetään, että myös pieniä lukumääriä havaittaisiin likimääräisen hahmottamisen järjestelmän avulla, eli että suurilla lukumäärillä toimiva Weberin laki olisi voimassa myös pieniä lukumääriä havainnoitaessa. Weberin lain mukaan lukumäärien välisen suhteen tulee olla enintään 1:3 (esimerkiksi 4 vs. 12 yksikköä), jotta vastasyntyneet pystyvät erottelemaan ne toisistaan (Hyde & Spelke, 2011). Tämä selittäisi, mikseivät vastasyntyneet havainneet niin selkeästi tutkimuksessamme tilannetta, jossa lukumäärien välinen suhde oli 2:3 - lukusuhte voisi olla vielä liian suuri havaittavaksi.

Yhden järjestelmän teoria ei kuitenkaan sovi tutkimustuloksissamme siihen, että vastasyntyneiden aivot pystyivät havaitsemaan eroja tilanteessa, jossa lukumäärien välinen suhde oli 1:2. Weberin lain mukaan myös tämän pitäisi olla liian suuri lukusuhte vastasyntyneiden havaittavaksi (Hyde & Spelke, 2011). Onkin tärkeää huomioida, että yhden järjestelmän teoria on kiistelty näkemys ja Hyden (2011) artikkelikatsauksen mukaan on olemassa paljon tutkimustuloksia,

jotka todistavat tätä vastaan. Tuloksemme korostavat entisestään tarvetta tutkimukselle, joka keskittyisi pienten lukumäärien havaitsemisen järjestelmiin ja näiden kehittymiseen syntymästä alkaen.

Erojen havaitsemisen korostuminen 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänen välillä voi johtua myös siitä, että 3-osaisen siniäänen tarkastelu jää tutkimuksessamme rajoitteiseksi. 3-osainen siniääni kestää muita kahta ärsykettä ajallisesti pidempään, noin 500 ms, kun taas tarkastelemamme aikaväli loppuu jo 1000 ms kohdalla. On siis mahdollista, että osa lukumäärän muutoksen havaitsemiseen liittyvistä aivovasteista on jäänyt kokonaan tarkastelualueemme ulkopuolelle. Toisaalta seuraava ärsyke alkaa jo 1000 ms kohdalla herättäen uusia aivovasteita, minkä vuoksi 3-osaisen siniäänen aiheuttamat vasteet kyseisestä ajankohdasta eteenpäin olisivat olleet vaikeita havaita.

On myös hyvin mahdollista, että tutkimuksessamme ilmenneissä vastasyntyneiden aivovasteissa on päällekkäin muitakin auditorisia ja kognitiivisia prosesseja. Tämä vaikeuttaisi lukumääräisyyden tajulle erityisten vasteiden havaitsemista ja voisi osaltaan selittää vähäisiä tuloksiamme vastasyntyneiden aivojen kyvystä havaita eroja 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänen välillä. 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänen kohdalla havaittu MMN/MMR-vaste aikavälillä 600–700 ms voi siis hyvinkin kertoa aidosta löydöstä, joka muiden päällekkäisten prosessien vuoksi jää yksittäiseksi. Esimerkiksi vauvojen toisesta samanaikaisesta poikkeavan auditorisen ärsykkeen havainnointiin liittyvästä positiivisesta herätevasteesta johtuen MMN/MMR-vastetta ei välttämättä ole erotettavissa (Kushnerenko, Čeponiene, Balan, Fellman & Näätänen, 2002). Lisäksi vastasyntyneiden auditoriset vasteet ovat vasta kehittymässä, minkä vuoksi ne ovat usein suuria latenssiltaan ja pieniä amplitudiltaan. Tämä vaikeuttaa eri vasteiden erottelua entisestään ja luo vastasyntyneiden välille paljon yksilöllistä vaihtelua (Kushnerenko, Čeponiene, Balan, Fellman ym., 2002).

Havaitsemamme erot vastasyntyneiden aivopuoliskojen välillä sopivat ristiriitaisesti aiempaan tutkimuskirjallisuuteen. 1-osaisen siniäänen kohdalla aivosähkökäyrässä ilmeni suuri positiivinen vaste vasemmalla aivopuoliskolla (P3-kanava), kun taas oikealla aivopuoliskolla (P4-kanava) vaste ei ollut yhtä selkeä. Varianssianalyysien mukaan aivopuoliskojen kyvyt erotella vasteita toisistaan erosivat merkitsevästi kuitenkin ainoastaan analyysivälillä 300–400 ms. Vähäiseen tutkimuskirjallisuuteen vauvojen lukumääräisyyden tajusta nojaten oikean IPS:n (P4-kanava) olisi olettanut näkyvän tuloksissamme merkittävämmiin (ks. Izard ym., 2008). Toisaalta Rapinin (2016) katsausartikkelin mukaan vasemman puolen päälakilohkon alueet aktivoituvat enemmän juuri tarkan lukumäärän hahmottamisen aikana lapsilla ja aikuisilla.

Vastasyntyneiden aivopuoliskojen eroja pohdittaessa on huomioitava toisaalta tutkimusnäyttö siitä, että lukumääräisyyden taju näyttäisi paikantuvan vauvoilla vahvasti aivojen etuosiin (Ansari ym., 2005; Hyde ym., 2010). Tämä selittäisi sitä, miksi tuloksissamme ei juuri näkynyt

aivopuoliskojen eroja päälakilohkoilla. Jatkoanalyysissä tehty korrelaation hajontakuviokuva näytti havaitsemamme aivopuoliskojen välisen yksittäisen eron olevan myös epäselvä. Vasemman aivopuoliskon hetkellinen korostuminen tuloksissa voi siis olla vain tilastollinen sattuma.

Tuloksia arvioitaessa on otettava huomioon EEG menetelmänä. EEG perustuu aivokuoren pyramidisolujen synkronoituihin postsynaptisiin potentiaaleihin, mutta sähkökäyrään vaikuttavat myös muut kehon sisäiset ja ulkoiset sähköiset signaalit (Müller-Putz, 2020). Lisäksi aivojen synnyttämät useat sähkökentät sekä vaikuttavat toisiinsa että hankaloittavat aivoaktivaation lähteen paikantamista (Biasucci ym., 2019). Tämän vuoksi EEG ei ole kovinkaan tarkka arvioimaan missä kohtaa aivoja aktivaatio on syntynyt. Eri lähteistä nousseet aktivaatiot ovat siis vaikuttaneet myös P3- ja P4-kanavissa havaitsemiimme vasteisiin, emmekä ole tarkemmin analysoineet tämän vaikutusta tuloksiimme. Useamman EEG-kanavan vertailu keskenään tarkentaisi havaintojamme sekä aiovasteiden paikantumisesta että aivopuoliskojen eroista.

Vastasyntyneiden kyvyistä havaita lukumääriä on hyvin vähän etukäteistietoa ja -tutkimusta, minkä vuoksi valitsimme analyyseihin melko eksploratiivisen tutkimusotteen. Emme voineet olla täysin varmoja siitä, minkälaista aiovastetta olemme etsimässä ja miltä aikaväliltä. Tämän vuoksi tilastollisissa analyyseissä kävimme aivosähkökäyrän järjestelmällisesti läpi 100 ms mittaisia aikaikkunoita analysoiden. Menetelmä mahdollisti pienempien osasten tarkemman tarkastelun niin, että tarkasteluvälien määrä pysyi käytännöllisenä. Toisaalta mielivaltaisten aikavälien tarkastelu saattoi häivyttää ja hankaloittaa syntyneiden vasteiden havaitsemista sekä lyhyempien tai pidempien aikavälien merkitsevyyksien näkemistä, mikä olisi voinut olla arvokasta tietoa.

4.2 Vanhempien matemaattisten taitojen yhteys vastasyntyneiden aiovasteisiin

Toisen tutkimuskysymyksemme kohdalla oletimme, että vanhempien matemaattisilla taidoilla, erityisesti ei-symbolisilla taidoilla, olisi yhteyttä vastasyntyneiden aivojen kykyyn havaita eroja pienissä lukumäärissä. Vanhempien ei-symbolisella lukumäärienvertailun taidolla oli merkitsevä yhteys kahdella (ei peräkkäisellä) aikavälillä kun taas symbolisella peruslaskutaidolla vain yhdellä aikavälillä. Odotimme vanhempien taitojen näkyvän tuloksissa merkittävämmiin. Tätä odotimme etenkin lukumäärienvertailun taidon kohdalla, sillä vastasyntyneiden koekasetelma mittasi nimenomaan ei-symbolisia taitoja.

Tulosten epäyhteneväisyydestä huolimatta jatkoanalyysit näyttivät yksittäisten ilmenneiden yhteyksien olevan melko selkeitä. Analyysivälien 500–600 ms sekä 600–700 ms korrelaatioiden hajontakuviosta näki, kuinka vanhempien parempi matemaattinen taito ilmeni vastasyntyneillä

suurempina aivovasteina, ärsykkeestä ja aivopuoliskosta riippumatta. Analyysivälillä 300–400 ms hajontakuvio oli kuitenkin epäselvempi, mikä voisi viitata yhdysvaikutuksen olleen vain tilastollinen sattuma. Nämä muutamat aikavälit, joilla vanhempien matemaattisilla taidoilla havaittiin yhteys vastasyntyneiden aivojen kykyyn havaita eroja pienissä lukumäärissä, sekä tukevat hypoteesejamme että herättävät kysymyksiä. Miksi havainnot ilmenivät juuri tällä tavoin ja juuri kyseisillä aikaväleillä?

Kuten mainittu, vastasyntyneiden aivovasteissa on mahdollisesti päällekkäin useampia kognitiivisia ja auditorisia prosesseja, mikä vaikeuttaa yksittäisten aivovasteiden erottelua. Tällöin osa vanhempien matemaattisten taitojen yhteyksistä vastasyntyneiden aivovasteisiin on voinut jäädä huomaamatta. Lisäksi käytimme tutkimuksessamme analyysimenetelmänä toistettujen mittausten varianssianalyysiä, joka arvioi ainoastaan vanhempien taitojen ja vastasyntyneiden aivovasteiden yhteyden olemassaoloa, ei sen suuntaa. Tuloksemme eivät siis kerro suoraan matemaattisten taitojen ja haasteiden periytyvyydestä. Yhteyksien suunnan tutkiminen vaatisi erilaisia analyysimenetelmiä, kuten esimerkiksi regressioanalyysiä, mihin tutkimuksessamme ei otoskoon puolesta ollut mahdollisuutta.

Aiemmat tutkimustulokset ja meta-analyysit tukevat matemaattisten taitojen periytyvyyttä (ks. Kovas, Haworth, Dale & Plomin, 2007), minkä vuoksi on mielekästä tulkita yksittäistenkin löydöstemme kertovan aidosta yhteydestä vanhempien matemaattisten taitojen ja vastasyntyneiden aivovasteiden välillä. Voidaan myös pohtia, mitä muita selittäjiä yhteyden taustalta voisi löytyä. Vastasyntyneiden kykyyn havaita lukumääriä eivät vielä ole ehtineet vaikuttaa ulkopuoliset tekijät, kuten kasvatus tai ympäristö, joilla niilläkin on vaikutusta matemaattisten taitojen ja haasteiden kehittymiseen (Salminen ym., 2021; Susperreguy ym., 2020). Perinnöllisyys vaikuttaisi näin ollen vahvalta vaihtoehdolta.

Tuloksia pohdittaessa on myös syytä arvioida käyttämiämme muuttujia. Vanhempien matemaattisia taitoja on kuvattu monipuolisesti, sillä valitsimme analyysiin mukaan sekä symbolisia että ei-symbolisia matemaattisia taitoja edustavia testejä. Vanhempien taitomuuttujien yhteensopivuus vastasyntyneiden muuttujaan kuitenkin vaihtelee. Ensinnäkin peruslaskumuuttujan testit vaativat symbolisia taitoja, kun taas vastasyntyneiden auditorinen koeasetelma mittasi ei-symbolisia taitoja. Vaikka vanhempien lukumäärien vertailun testi mittasi ei-symbolisia taitoja, se sisälsi lähinnä suurten lukumäärien vertailua (yli 4 yksikköä), kun taas vastasyntyneillä tutkittiin pienten lukumäärien havaitsemista. Koeasetelmassamme arvioitiin siis vanhempien matemaattisten taitojen ja vastasyntyneiden lukumääräisyyden tajun yhteyksiä yleisemmällä tasolla. Erilaisia yhteyksiä olisi voinut löytyä, mikäli olisimme tutkineet nimenomaan vanhempien ja vastasyntyneiden pienten lukumäärien havaitsemisen yhteyttä, sillä esimerkiksi pienten lasten ja

vanhempien suurten lukumäärien havaitsemiskyvyn välillä on havaittu olevan yhteys (Navarro ym., 2018).

4.3 Johtopäätökset

Tutkimuksemme antaa näyttöä siitä, että vastasyntyneiden aivot havaitsevat eroja pienissä lukumäärissä auditorisessa koeasetelmassa. Vastasyntyneet havaitsivat usealla analyysivälillä eron 2-osaisen ja 1-osaisen siniäänien välillä, kun taas 2-osaisen ja 3-osaisen siniäänien välillä eron havaitseminen jäi yhden analyysivälin havainnoksi. Tämä saattaa johtua esimerkiksi menetelmällisistä puutteista tai vastasyntyneiden lukumäärän havaitsemisen järjestelmien kehittymättömyydestä. Tutkimustuloksemme vahvistaa siis näkemystä, jonka mukaan jo vastasyntyneillä ilmenee lukumääräisyyden taju eli synnynnäinen kyky havaita eroja lukumäärien välillä. Emme havainneet päälakilohkoilla selviä eroja vastasyntyneiden aivopuoliskojen kyvyissä havaita lukumääriä.

Tutkimuksemme antaa myös jonkin verran näyttöä siitä, että ainakin vanhempien ei-symbolisilla matemaattisilla taidoilla on yhteyttä vastasyntyneiden aivojen kykyyn havaita pieniä lukumääriä. Havaitsemamme yhteydet olivat yksittäisiä, mikä saattaa jälleen johtua menetelmällisistä puutteista. Yksittäisistä havainnoista huolimatta yhteyksien voidaan olettaa kertovan matemaattisten taitojen ja haasteiden jonkinasteisesta perinnöllisyydestä, mikä sopii yhteen aiemman tutkimusnäytön kanssa. Tuloksemme on merkittävä, sillä se on ensimmäinen laatuaan; näin pienten vauvojen lukumääräisyyden tajua ja vanhempien matemaattisten taitojen yhteyttä ei ole aikaisemmin tutkittu vastaavassa tutkimusasetelmassa. Tutkimuksemme antaa näin ollen uutta tietoa vastasyntyneiden lukumääräisyyden tajusta sekä tukee EEG:n käyttöä varhaisten matemaattisten kykyjen tutkimisessa. Tutkimuksemme tarkentama tieto varhaisten matemaattisten kykyjen kehityksestä on tarpeellista, jotta voitaisiin kehittää menetelmiä yhä kohdennetumman ja oikea-aikaisemman tuen antamiseksi matemaattisissa haasteissa.

4.4 Suosituksia jatkotutkimukselle

Tulevia tutkimuksia ajatellen koeasetelmaa tarkentamalla voitaisiin löytää myös tarkempia vastauksia esittämiimme tutkimuskysymyksiin sekä laajentaa niitä. Ensinnäkin tarkasteluun tulisi ottaa mukaan auditorisen ärsykkeen muut ominaisuudet, kuten kesto ja intensiteetti, ja verrata näitä

lukumääräisyyden tajun muuttuun. Näin voitaisiin vastata paremmin kysymykseen siitä, havaitsevatko vastasyntyneiden aivot juuri lukumäärän muutosta vai ärsykkeen muita ominaisuuksia. Myös EEG-aineiston tarkempi käsittely ja analysointi esimerkiksi riippumattomien komponenttien analyysin (ICA) tai pääkomponenttianalyysin (PCA) avulla voisi auttaa mahdollisten muiden päällekkäistyvien kognitiivisten ja sensoristen vasteiden erottelussa. Lisäksi olisi syytä tarkastella useampia tai kaikkia EEG-kanavia. Erilaisten aikavälien sekä erityisesti aivojen otsalohkojen huomioiminen olisi aiemman tutkimustiedon valossa oleellista.

Otoskoon kasvattaminen olisi merkittävä parannus jatkotutkimuksia ajatellen. Tällöin olisi mahdollista huomioida myös vanhempien koulumenestys ja matemaattiset oppimisvaikeudet paremmin. Tutkimuksessamme oli mukana matemaattisilta taidoiltaan kaiken tasoisia vanhempia, mutta diagnosoituja vaikeuksia olisi mahdollista eritellä tarkemmin käyttämällä useampia testejä. Erityisesti pienten lukumäärien järjestelmät olisi hyvä huomioida jatkossa paremmin. Lisäksi vanhempien taitomuuttujien käsittelyssä olisi hyvä ottaa huomioon myös vanhemman kirjoitusnopeuden vaikutus testissä suoriutumiseen.

Myös vanhempien muiden taitojen yhteyttä vastasyntyneiden lukumääräisyyden havainnointiin voitaisiin tulevaisuudessa tarkastella. Näitä olisivat esimerkiksi kielelliset taidot sekä RAN eli nopean nimeämisen taito. Jälkimmäistä ovat tutkineet muun muassa Koponen, Georgiou, Salmi, Leskinen ja Aro (2017), jotka meta-analyysissään havaitsivat RAN:in ja matemaattisten taitojen välillä selkeän yhteyden. Lopulta tarkimmat tulokset ja erilaisten yhteyksien suunnan määrittelyn mahdollistaisi pitkittäinen tutkimus, jossa lasten matemaattisia taitoja mitattaisiin EEG:llä sekä erilaisilla taitokartoituksilla useampaan kertaan kehityksen edetessä.

5 LÄHDELUETTELO

- Anderson, U. S., & Cordes, S. (2013). $1 < 2$ and $2 < 3$: Non-linguistic appreciations of numerical order. *Frontiers in Psychology*, 4(5). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00005>
- Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K., & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *Neuroreport*, 16(16), 1769–1773. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000183905.23396.fl>
- Ashkenazi, S., Black, J. M., Abrams, D. A., Hoefft, F., & Menon, V. (2013). Neurobiological Underpinnings of Math and Reading Learning Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 46(6), 549-569. <https://doi.org/10.1177/0022219413483174>
- Aunola, K., & Räsänen, P. (2007). The 3-minutes basic arithmetic test. Julkaisematon testimateriaali. Jyväskylä, Finland.
- Berch, D. B. (2005). Making Sense of Number Sense: Implications for Children With Mathematical Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 38(4), 333-339. <https://doi.org/10.1177/00222194050380040901>
- Biasiucci, A., Franceschiello, B., & Murray, M. M. (2019). Electroencephalography. *Current Biology*, 29(3), 80-85. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.11.052>
- Bugden, S., Peters, L., Nosworthy, N., Archibald, L., & Ansari, D. (2021). Identifying Children with Persistent Developmental Dyscalculia from a 2-min Test of Symbolic and Nonsymbolic Numerical Magnitude Processing. *Mind, Brain and Education*, 15(1), 88-102. <https://doi.org/10.1111/mbe.12268>
- Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3–18. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00374.x>
- Butterworth, B. (2018). The implications for education of an innate numerosity-processing mechanism. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1740). <https://doi.org/10.1098/rstb.2017.0118>
- Cappelletti, M., Barth, H., Fregni, F., Spelke, E. S., & Pascual-Leone, A. (2007). rTMS over the intraparietal sulcus disrupts numerosity processing. *Experimental Brain Research*, 179(4), 631-642. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0820-0>
- Chen, H., Gu, X. H., Zhou, Y., Ge, Z., Wang, B., Siok, W. T., Wang, G., Huen, M., Jiang, Y., Tan, L. H., & Sun, Y. A. (2017). Genome-Wide Association Study Identifies Genetic Variants Associated with Mathematics Ability. *Scientific Reports*, 7(1), 40365. <https://doi.org/10.1038/srep40365>

- Coubart, A., Izard, V., Spelke, E. S., Marie J., & Streri A. (2014). Dissociation between small and large numerosities in newborn infants. *Developmental Science*, *17*(1), 11–22. <https://doi.org/10.1111/desc.12108>
- Decarli, G. (2019). *The two core systems of numerical cognition in infants and developmental dyscalculia* (Väitöskirja, University of Trento). http://eprints-phd.biblio.unitn.it/3508/1/2018_DECARLI_Dissertation.pdf
- Dehaene, S. (2001). Précis of The Number Sense. *Mind & Language*, *16*(1), 16-36. <https://doi.org/10.1111/1468-0017.00154>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an Anatomical and Functional Model of Number Processing. *Mathematical Cognition*, *1*, 83-120. <https://doi.org/10.4236/am.2020.117040>
- Denyer, R., Morris, S. R., Greeley, B., Ferris, J. K., White, K., Laule, C., Boyd, L. A., & Weber, R. C. (2020). Learning-Challenged Youth Show an Abnormal Relationship Between Fronto-Parietal Myelination and Mathematical Ability. *Journal of Neuroimaging*, *30*(5), 648-657. <https://doi.org/10.1111/jon.12741>
- Di Giorgio, E., Lunghi, M., Rugani, R., Regolin, L., Dalla Barba, B., Vallortigara, G., & Simion, F. (2019). A mental number line in human newborns. *Developmental Science*, *22*(6). <https://doi.org/10.1111/desc.12801>
- Dormal, V., Andres, M., Dormal, G., & Pesenti, M. (2010). Mode-dependent and mode-independent representations of numerosity in the right intraparietal sulcus. *NeuroImage*, *52*(4), 1677-1686. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.04.254>
- Dormal, V., Andres, M., & Pesenti, M. (2012). Contribution of the right intraparietal sulcus to numerosity and length processing: An fMRI-guided TMS study. *Cortex*, *48*(5), 623-629. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.019>
- Elliott L., Feigenson L., Halberda J., & Libertus M. E. (2019). Bidirectional, Longitudinal Associations Between Math Ability and Approximate Number System Precision in Childhood. *Journal of Cognition and Development*, *20*(1), 56–74. <https://doi.org/10.1080/15248372.2018.1551218>
- 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>
- Fornaciai, M., & Park, J. (2017). Distinct Neural Signatures for Very Small and Very Large Numerosities. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 21. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00021>
- Gallistel, C., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, *44*(1), 43-74. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90050-R](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90050-R)

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.03.062>
- Göbel, S. M., Shaki, S., & Fischer, M. H. (2011). The Cultural Number Line: A Review of Cultural and Linguistic Influences on the Development of Number Processing. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 42(4), 543-565. <https://doi.org/10.1177/0022022111406251>
- 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/10.1016/j.biopsycho.2016.02.004>
- Halberda J., Mazocco M. M., & Feigenson L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665–668. <https://doi.org/10.1038/nature07246>
- Hawes, Z., Nosworthy, N., Archibald, L., & Ansari, D. (2019). Kindergarten children's symbolic number comparison skills relates to 1st grade mathematics achievement: Evidence from a two-minute paper-and-pencil test. *Learning and Instruction*, 59, 21-33. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.09.004>
- Haworth, C. M., Kovas, Y., Harlaar, N., Hayiou-Thomas, M.E., Petrill, S.A., Dale, P.S., & Plomin. R. (2009). Generalist genes and learning disabilities: a multivariate genetic analysis of low performance in reading, mathematics, language and general cognitive ability in a sample of 8000 12-year-old twins. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 50(10), 1318-1325. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2009.02114.x>
- Heine A., Wißmann J., Tamm S., De Smedt B., Schneider M., Stern E., Verschaffel L., & Jacobs A. M. (2013). An electrophysiological investigation of non-symbolic magnitude processing: Numerical distance effects in children with and without mathematical learning disabilities. *Cortex*, 49(8), 2162–2177. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1016/j.cortex.2012.11.009>
- Hyde D. C. (2011). Two systems of non-symbolic numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 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 (Orlando, Fla.)*, 53(2), 647-652. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.06.030>
- Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2009). All Numbers Are Not Equal: An Electrophysiological Investigation of Small and Large Number Representations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(6), 1039-1053. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21090>

- 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>
- Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS biology*, *6*(2), 275-285. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060011>
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, *106*(25), 10382-10385. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106>
- Jordan, N. C., Hanich, L. B., & Kaplan, D. (2003). A Longitudinal Study of Mathematical Competencies in Children With Specific Mathematics Difficulties Versus Children With Comorbid Mathematics and Reading Difficulties. *Child Development*, *74*(3), 834-850. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00571>
- Jordan, N. C., & Montani, T. O. (1997). Cognitive Arithmetic and Problem Solving: A Comparison of Children with Specific and General Mathematics Difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, *30*(6), 624-634. <https://doi.org/10.1177/002221949703000606>
- Kaufmann, L., Wood, G., Rubinsten, O., & Henik, A. (2011). Meta-Analyses of Developmental fMRI Studies Investigating Typical and Atypical Trajectories of Number Processing and Calculation. *Developmental Neuropsychology*, *36*(6), 763-787. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549884>
- Kolkman, M. E., Kroesbergen, E. H., & Leseman, P. P. M. (2013). Early numerical development and the role of non-symbolic and symbolic skills. *Learning and Instruction*, *25*, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.12.001>
- Koponen, T., Aro, T., Peura, P., Leskinen, M., Viholainen, H., & Aro, M. (2021). Benefits of Integrating an Explicit Self-Efficacy Intervention With Calculation Strategy Training for Low-Performing Elementary Students. *Frontiers in Psychology*, *12*, 714379. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.714379>
- Koponen, T., Georgiou, G., Salmi, P., Leskinen, M., & Aro, M. (2017). A Meta-Analysis of the Relation Between RAN and Mathematics. *Journal of Educational Psychology*, *109*(7), 977-992. <https://doi.org/10.1037/edu0000182>
- Koponen, T., & Mononen, R. (2010a). The 2-minute addition fluency test. Julkaisematon testimateriaali. Jyväskylä, Suomi: Niilo Mäki Instituutti.
- Koponen, T., & Mononen, R. (2010b). The 2-minute subtraction fluency test. Julkaisematon testimateriaali. Jyväskylä, Suomi: Niilo Mäki Instituutti.

- Koponen, T., & Mononen, R. (2010c). The 2-minute multiplication fluency test. Julkaisematon testimateriaali.
- Koponen, T., Salminen, J., & Sorvo, R. (2019). Matematiikan perustaitojen oppimisvaikeudet. Teoksessa T. Ahonen, M. Aro, T. Aro, M-K. Lerkkanen, & T. Siiskonen (toim.), *Oppimisen vaikeudet (1. painos)* (s. 324–349). Niilo Mäki Instituutti.
- Koponen, T., Sorvo, R., Dowker, A., Räikkönen, E., Viholainen, H., Aro, M., & Aro, T. (2018). Does Multi-Component Strategy Training Improve Calculation Fluency Among Poor Performing Elementary School Children? *Frontiers in Psychology*, 9, 1187. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01187>
- Kovas, Y., Harlaar, N., Petrill, S., & Plomin, R. (2005). ‘Generalist genes’ and mathematics in 7-year-old twins. *Intelligence (Norwood)*, 33(5), 473-489. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2005.05.002>
- Kovas, Y., Haworth, C. M., Dale, P. S., & Plomin, R. (2007) The genetic and environmental origins of learning abilities and disabilities in the early school years. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 72(3), 1-144. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5834.2007.00439.x>
- Kovas, Y., Haworth, C. M., Harlaar, N., Petrill, S. A., Dale, P. S., & Plomin, R. (2007). Overlap and specificity of genetic and environmental influences on mathematics and reading disability in 10-year-old twins. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48(9), 914-922. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2007.01748..x>
- Kushnerenko, E., Čeponiene, 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(1), 47–51. <https://doi.org/10.1097/00001756-200201210-00014>
- Kushnerenko, E., Čeponiene, R., Balan, P., Fellman, V., & Näätänen, R. (2002). Maturation of the auditory change detection response in infants: a longitudinal ERP study. *NeuroReport*, 13(15), 1843–1848. <https://doi.org/10.1097/00001756-200210280-00002>
- Kutter, E. F., Dehnen, G., Borger, V., Surges, R., Mormann, F., & Nieder, A. (2023). Distinct neuronal representation of small and large numbers in the human medial temporal lobe. *Nature Human Behaviour*, 7(11), 1998-2007. <https://doi.org/10.1038/s41562-023-01709-3>
- Leppänen, P. H., Guttorm, T. K., Pihko, E., Takkinen, S., Eklund, K. M., & Lyytinen, H. (2004). Maturation effects on newborn ERPs measured in the mismatch negativity paradigm. *Experimental Neurology*, 190, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.expneurol.2004.06.002>
- Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2009). Behavioral and Neural Basis of Number Sense in Infancy. *Current Directions in Psychological Science: a Journal of the American Psychological Society*, 18(6), 346-351. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8721.2009.01665.x>

- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of Number Sense: Large-Number Discrimination in Human Infants. *Psychological Science, 14*(5), 396-401. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.01453>
- Lukowski, S. L., Rosenberg-Lee, M., Thompson, L. A., Hart, S. A., Willcutt, E. G., Olson, R. K., Petrill, S. A., & Pennington, B. F. (2017). Approximate number sense shares etiological overlap with mathematics and general cognitive ability. *Intelligence (Norwood), 65*, 67-74. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.08.005>
- Molko, N., Cachia, A., Rivière, D., Mangin, J., Bruandet, M., Le Bihan, D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). Functional and Structural Alterations of the Intraparietal Sulcus in a Developmental Dyscalculia of Genetic Origin. *Neuron (Cambridge, Mass.), 40*(4), 847-858. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00670-6](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00670-6)
- Mou, Y., & vanMarle, K. (2014). Two core systems of numerical representation in infants. *Developmental review, 34*(1), 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2013.11.001>
- Müller-Putz, G., R. (2020). Electroencephalography. Teoksessa N., F. Ramsey ja J., del R. Millán (toim.), *Handbook of Clinical Neurology* (s. 249-262). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63934-9.00018-4>
- Nakai, T., Girard, C., Longo, L., Chesnokova, H., & Prado, J. (2023). Cortical representations of numbers and nonsymbolic quantities expand and segregate in children from 5 to 8 years of age. *PLoS Biology, 21*(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001935>
- Navarro, M. G., Braham, E. J., & Libertus, M. E. (2018). Intergenerational associations of the approximate number system in toddlers and their parents. *British Journal of Developmental Psychology, 36*(4), 521–539. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12234>
- Nieder, A. (2018). Evolution of cognitive and neural solutions enabling numerosity judgements: Lessons from primates and corvids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B. Biological sciences, 373*(1740). <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0514>
- Nosworthy, N., Bugden, S., Archibald, L., Evans, B., & Ansari, D. (2013) A Two-Minute Paper-and-Pencil Test of Symbolic and Nonsymbolic Numerical Magnitude Processing Explains Variability in Primary School Children's Arithmetic Competence. *PLoS ONE, 8*(7), e67918. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067918>
- Näätänen, R., Gaillard, A., & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica, 42*(4), 313-329. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(78\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(78)90006-9)
- Näätänen, R., S. Sussman, E., Salisbury, D., & L. Shafer, V. (2014). Mismatch Negativity (MMN) as an Index of Cognitive Dysfunction. *Brain Topography, 27*(4), 451-466. <https://doi.org/10.1007/s10548-014-0374-6>

- Pakarinen, E., Lerkkanen, M., Poikkeus, A., Salminen, J., Silinskas, G., Siekkinen, M., & Nurmi, J. (2017). Longitudinal associations between teacher-child interactions and academic skills in elementary school. *Journal of Applied Developmental Psychology, 52*, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2017.08.002>
- Parviainen, P. (2019). The Development of Early Mathematical Skills : A Theoretical Framework for a Holistic Model. *Journal of Early Childhood Education Research, 8*(1), 162-191.
- Plomin, R., & Kovas, Y. (2005). Generalist Genes and Learning Disabilities. *Psychological Bulletin, 131*(4), 592–617. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.4.592>
- Picton, T. W., & Taylor, M. J. (2007). Electrophysiological Evaluation of Human Brain Development. *Developmental Neuropsychology, 31*(3), 249-278. <https://doi.org/10.1080/87565640701228732>
- Rapin, I., MD. (2016). Dyscalculia and the Calculating Brain. *Pediatric Neurology, 61*, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.pediatrneurol.2016.02.007>
- Revkin, S. K., Piazza, M., Izard, V., Cohen, L., & Dehaene, S. (2008). Does subitizing reflect numerical estimation? *Psychological Science, 19*(6), 607–614. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02130.x>
- Ross-Sheehy, S., Oakes, L. M., & Luck, S. J. (2003). The development of visual shortterm memory capacity in infants. *Child Development, 74*(6), 1807-1822. <https://doi.org/10.1046/j.1467-8624.2003.00639.x>
- Ruusuvirta, T., Huotilainen, M., Fellman, V., & Näätänen, R. (2009). Numerical discrimination in newborn infants as revealed by event-related potentials to tone sequences. *The European Journal of Neuroscience, 30*(8), 1620-1624. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2009.06938.x>
- Räsänen, P. (2012). Laskemiskyvyn häiriö eli dyskalkulia. *Aikakauskirja Duodecim, 28*(11), s. 1168–1177. <https://www.duodecimlehti.fi/duo10309>
- Salminen, J., Khanolainen, D., Koponen, T., Torppa, M., & Lerkkanen, M. (2021). Development of Numeracy and Literacy Skills in Early Childhood—A Longitudinal Study on the Roles of Home Environment and Familial Risk for Reading and Math Difficulties. *Frontiers in Education (Lausanne), 6*. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.725337>
- Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Schmidt, S., Stricker, J., & DeSmedt, B. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: A meta-analysis. *Developmental Science, 20*(3). <https://doi.org/10.1111/desc.12372>
- Smyth, R. E., & Ansari, D. (2020). Do infants have a sense of numerosity? A p-curve analysis of infant numerosity discrimination studies. *Developmental Science, 23*(2). <https://doi.org/10.1111/desc.12897>

- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of Numbers by Human Infants. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 210(4473), 1033-1035. <https://doi.org/10.1126/science.7434014>
- Starr, A., Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2013). Number sense in infancy predicts mathematical abilities in childhood. *Proceedings of the National Academy of Sciences – PNAS*, 110(45), 18116-18120. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302751110>
- Sur, S., & Sinha, V. K. (2009). Event-related potential: An overview. *Industrial Psychiatry Journal*, 18(1), 70-73. <https://doi.org/10.4103/0972-6748.57865>
- Susperreguy, M. I., Di Lonardo Burr, S., Xu, C., Douglas, H., & LeFevre, J. (2020). Children's Home Numeracy Environment Predicts Growth of their Early Mathematical Skills in Kindergarten. *Child Development*, 91(5), 1663-1680. <https://doi.org/10.1111/cdev.13353>
- Szucs, D., Devine, A., Soltesz, F., Nobes, A., & Gabriel, F. (2013). Developmental dyscalculia is related to visuo-spatial memory and inhibition impairment. *Cortex*, 49(10), 2674–2688. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.06.007>
- Tosto, M., Petrill, S. A., Halberda, J., Trzaskowski, M., Tikhomirova, T. N., Bogdanova, O. Y., Ly, R., Wilmer, J. B., Naiman, D. Q., Germine, L., Plomin, R., & Kovas, Y. (2014). Why do we differ in number sense? Evidence from a genetically sensitive investigation. *Intelligence (Norwood)*, 43(100), 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.12.007>
- Van Rinsveld, A., Guillaume, M., Kohler, P. J., Schiltz, C., Gevers, W., & Content, A. (2020). The neural signature of numerosity by separating numerical and continuous magnitude extraction in visual cortex with frequency-tagged EEG. *Proceedings of the National Academy of Sciences – PNAS*, 117(11), 5726-5732. <https://doi.org/10.1073/pnas.1917849117>
- Viktorsson, C., Lindskog, M., Li, D., Tammimies, K., Taylor, M. J., Ronald, A., & Falck-Ytter, T. (2023). Infants' sense of approximate numerosity: Heritability and link to other concurrent traits. *Developmental Science*, 26(4). <https://doi.org/10.1111/desc.13347>
- Wei, W., Chen, C., Yang, T., Zhang, H., & Zhou, X. (2014). Dissociated neural correlates of quantity processing of quantifiers, numbers, and numerosities. *Human Brain Mapping*, 35(2), 444-454. <https://doi.org/10.1002/hbm.22190>
- WHO. (2018). *International statistical classification of diseases and related health problems (11. painos)*. <https://icd.who.int/>
- Qixuan, C., & Jingguang, L. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math performance: A meta-analysis, *Acta Psychologica*, 148, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.016>