

**PROTOTYYPPISTEN ÄIDINKIELEN ÄÄNTEIDEN
PROSESSOINTI NORMAALISTI LUKEVILLA JA
DYSLEKTISILLÄ LAPSILLA**

- Miten erot fonologisissa muistiedustuksissa ilmenevät
aivosähkökäyrän myöhäisessä erotteluvasteessa (LDN)?

Elisa Ruohonen
Pro gradu -tutkielma
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto
Marraskuu 2010

Pro gradu -tutkielman ohjaaja

Paavo H.T. Leppänen, Dosentti, PsT.
Akatemiatutkija
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto

Tutkimusprojekti

NeuroDys,
Dyslexia genes and Neurobiological pathways
European Dyslexia Research Project

Tutkimusyksikkö

Ihmisen kehitys ja sen riskitekijät -huippuyksikkö
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto

Tukijat

Euroopan unioni
Suomen Akatemia
Psykologian laitos
Jyväskylän yliopisto

RUOHONEN, ELISA: Prototyyppisten äidinkielen äänteiden prosessointi normaalisti lukevilla ja dyslektisillä lapsilla - Miten erot fonologisissa muistiedustuksissa ilmenevät aivosähkökäyrän myöhäisessä erotteluvasteessa (LDN)?

Pro gradu -tutkielma, 65 s.

Ohjaaja: Paavo Leppänen

Psykologia

Marraskuu 2010

Heikkojen äidinkielen äänteiden muistiedustusten on esitetty olevan merkittävä tekijä dysleksiassa eli kehityksellisessä lukihäiriössä. Muistiedustusten tarkkuutta voidaan selvittää esimerkiksi tutkimalla aivojen herätevasteita. Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten dyslektisten lasten muistiedustukset prototyyppisistä äidinkielen äänneistä eroavat normaalisti lukevien lasten muistiedustuksista. Eroja tutkittiin tarkastelemalla prototyyppisten ja epäprototyyppisten äidinkielen äänteiden synnyttämiä LDN-vasteita.

LDN-vaste (late discriminative negativity) on yhdistetty korkeamman kognitiivisen tason erotteluprosessointiin ja myös muistiedustuksiin. LDN syntyy, kun toistettujen ärsykkeiden joukossa havaitaan poikkeava ärsyke. Tässä tutkimuksessa ärsykeinä käytettiin suomalaisunkarilaista, ranskalaista ja saksalaista y-äännettä, joita esitettiin poikkeavina ärsykeinä toistettujen ärsykkeiden joukossa. Koehenkilöinä oli 72 iältään 8–11-vuotiasta normaalisti lukevaa ja dyslektistä suomalaislasta. Vastetta tutkittiin viideltä eri LDN-vasteen aikaikkunalta, koska haluttiin tarkastella LDN-vasteen eri prosessointivaiheita. Aikaikkunat selvitettiin pääkomponenttianalyysillä, jonka tuottamia faktoripistemääriä analysoitiin MANOVAn toistettujen mittauksen menetelmällä. Vasteet muutettiin CSD-muotoon, jotta voitiin estimoida aktivaatioiden lähteitä tarkemmin.

Tutkimus tuki käsitystä dyslektikoiden heikoista äidinkielen muistiedustuksista, sillä se osoitti, että LDN-vaste oli normaalisti lukevilla lapsilla vahvempi prototyyppiseen äänneeseen kuin dyslektisillä lukijoilla. Vaste oli normaalisti lukevilla myös vahvempi prototyyppiseen äänneeseen kuin epäprototyyppisiin äänneisiin. Dyslektisillä lukijoilla ei sen sijaan havaittu eroja äänneiden välisissä aktivaatioissa, mikä viittaa heikkoihin muistiedustuksiin prototyyppisestä äänneestä. Heikoista muistiedustuksista kertoo myös se, että dyslektisillä lukijoilla ei syntynyt lainkaan LDN-tyyppistä vastetta prototyyppiseen äänneeseen lukuun ottamatta myöhäisintä aikaikkunaa. Tällöinkin vaste poikkesi huomattavasti normaalisti lukevien aktivaatiosta. Tutkimus osoitti, että LDN jakautuu useampaan erilliseen prosessointivaiheeseen. Aiemmin LDN-vasteen on havaittu ilmenevän fronto-sentraalisena aktivaationa, mutta eri prosessointivaiheiden tutkiminen sekä CSD-muunnos osoittivat, että LDN-vasteeseen liittyy myös temporaalinen komponentti. Selvimät erot ryhmien välillä ilmenivät tässä temporaalisessa komponentissa.

Avainsanat: LDN (late discriminative negativity), dysleksia, puheen prosessointi, äidinkielen muistiedustukset, ERP

SISÄLLYS

JOHDANTO	1
Dysleksia	2
Määritelmä.....	2
Lukemisessa vaadittavat taidot.....	2
Dysleksian taustamekanismit	3
Puheen prosessointi	4
Puheen havaitseminen.....	4
Kategorinen havaitseminen ja magneettiefekti.....	4
Äidinkielen muistiedustukset	5
Magneettiefektin kritiikkiä	6
Dyslektikot ja puheen havaitseminen	9
ERP-tutkimukset.....	11
ERP-komponentit.....	11
LDN (late discriminative negativity)	12
Tutkimuskysymykset	16
TUTKIMUSMENETELMÄT	18
Neurodys-projekti.....	18
Tutkittavat	18
Tutkittavien valinta	18
Jako ryhmiin	19
Ärsykkeet	19
Käytetyt ärsykkeet	19
Ärsykkeiden piirteet.....	20
Koeasetelma	21
ERP-aineiston keruu ja muokkaus.....	22
Aineiston keruu.....	22
ERP-aineiston esikäsittely.....	22
Erotuskäyrät ja CSD-muunnos.	23
Aineiston analyysi	23
Pääkomponenttianalyysi (PCA)	23
Aivoalueiden valinnat	25
Tilastolliset analyysit	26

TULOKSET	28
ERP-sähkökäyrät	28
CSD-muunnetun aineiston sähkökäyrät.....	29
Ryhmäerot CSD-muunnetun aineiston sähkökäyrissä.....	30
Komponentti 9-340.....	33
Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat.....	33
Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä.....	34
Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä.....	35
Komponentti 17-375.....	36
Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat.....	36
Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä.....	37
Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä.....	38
Komponentti 15-395.....	39
Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat.....	39
Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä.....	40
Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä.....	41
Komponentti 20-415.....	42
Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat.....	42
Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä.....	43
Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä.....	44
Komponentti 1-490.....	45
Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat.....	45
Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä.....	46
Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä.....	47
POHDINTA	49
LDN-vasteen rakenne eri aikaikkunoilla	49
Erot LDN-vasteessa dyslektisten lukijoiden ja normaalisti lukevien lasten välillä.....	52
Rajoitukset ja tutkimuksen merkitys.....	56
Johtopäätökset	57
LÄHTEET	59

JOHDANTO

Dysleksia on kehityksellinen lukemisen häiriö, jonka taustalla on yleisesti hyväksytty olevan vaikeus puheen fonologisessa prosessoinnissa (Ramus, 2003; Vellutino, Fletcher, Snowling, & Scanlon, 2004). Tämän fonologisen prosessin ongelman alkusyistä kiistellään kuitenkin edelleen, vaikka dysleksian ilmenemismuodoista ja määritelmästä ollaankin melko yksimielisiä. On esitetty esimerkiksi, että taustasyynä olisivat lähinnä yleisessä auditorisessa prosessoinnissa ilmenevät puutteet (Tallal, 1980), joista seuraavat ongelmat puheen havaitsemisessa ja fonologisessa prosessoinnissa. Toisaalta fonologisten pulmien on ajateltu olevan myös nimenomaan puhespesifejä eli aiheutuvan ongelmista puheen tai siihen liittyvän korkeamman kognitiivisen tason prosessoinnissa (ks. esim. Mody, Studdert-Kennedy, & Brady 1997). Tällaisia korkeamman tason kognitiivisia prosessoiteja voivat ilmentää esimerkiksi muistiedustukset. Godfrey, Syrdal-Lasky, Millay ja Knox (1981) ovatkin esittäneet dyslektikkojen ongelmien liittyvän heikkoihin muistiedustuksiin foneemeista. Tämä väite on saanut myöhemmin paljon tukea (ks. esim. Lyytinen ym., 2005; Serniclaes, Van Hege, Mousty, Carré, & Sprenger-Charolles, 2004; Snowling, 2006).

Fonologia edustuksia on tutkittu usein behavioraalisilla menetelmillä. Myös aivojen herätevaste- eli ERP-tutkimuksia (event related potential) on tehty, mutta koehenkilöinä on ollut useimmiten normaalisti lukevia ja tutkimukset ovat keskittyneet enimmäkseen MMN (miss match negativity) -vasteen tarkasteluun (ks. esim. Aaltonen, Eerola, Uusipaikka, & Lang, 1997; Näätänen ym., 1997; Winkler ym., 1999). Tässä tutkimuksessa pyrin kuitenkin tarkastelemaan vielä melko vähän tutkitun LDN (late discriminative negativity) -vasteen avulla, miten prototyypin äidinkielen äänten ja epäprototyypisten äänten erottelu poikkeaa dyslektisten lukijoiden ja normaalisti lukevien välillä. LDN-vaste syntyy, kun toistettujen ärsykkeiden joukossa havaitaan poikkeava ärsyke (Čeponienė ym., 2004), joten sen avulla voidaan saada tietoa kyvystä erotella äänteitä. Toisin kuin MMN-vaste, joka myös liittyy poikkeavuuden havaitsemiseen, LDN-vasteen on ajateltu ilmentävän myöhäisempää mahdollisesti kognitiivisen tason prosessointia (ks. esim. Čeponienė ym., 2004; Korpilahti, Krause, Holopainen, & Lang, 2001). Etenen kuvaamalla ensin dysleksiaa ja sen taustateorioita ja jatkan sitten puheen prosessin, ERP-mittausten ja tutkimuskysymysteni kuvailuun.

Dysleksia

Määritelmä. Kehityksellinen dysleksia (tästä eteenpäin dysleksia) on oppimisen häiriö, joka ilmenee kyvyttömyytenä saavuttaa normaaleja lukemiseen tarvittavia osataitoja, mutta se ei selity älykkyydellä, sensorisilla puutoksilla, sosioekonomisella taustalla tai oppimismahdollisuuksilla (Lyon, Shaywitz, & Shaywitz, 2003; Vellutino ym., 2004). Ongelma ilmenee lukemiseen tarvittavissa osataidoissa, kuten sanojen tunnistamisessa, tavutuksessa sekä äänteiden ja kirjainten välisessä koodaamisessa (Lyon ym., 2003; Vellutino ym., 2004). Dysleksiää esiintyy 5–10 prosentilla kouluikäisistä lapsista (Habib, 2000; Ramus, 2003). Dysleksialla on neurobiologinen tausta (Lyon ym., 2003), ja sen ajatellaan yleisesti liittyvän puutteisiin erilaisissa osataidoissa ja erityisesti fonologisessa tietoisuudessa (Goswami, 2002; Vellutino ym., 2004). Fonologisella tietoisuudella tarkoitetaan kielen äännejärjestelmän ymmärtämistä eli käsitystä siitä, että puhe voidaan jakaa sanoja ja tavuja pienempiin osiin eli äänneisiin (Goswami, 2002).

Lukemisessa vaadittavat taidot. Vellutinin ym. (2004) mukaan lukemaan oppiminen perustuu monien kognitiivisten taitojen oppimiseen. Lukeminen vaatii ensinnäkin sanojen visuaalista ja lingvististä koodausta, jotka luovat yhteyden puhuttujen ja kirjoitettujen sanojen välille. Tarvitaan myös ymmärrystä kielen aakkosellisesta periaatteesta eli siitä, että kirjoitetut sanat vastaavat puhuttuja sanoja ja että ne koostuvat kirjaimista. Olennaista on myös metalingvistinen tieto kielen rakenteesta. Tähän kuuluvat fonologinen, ortografinen ja syntaktinen tietoisuus. Edellä on esitetty fonologisen tietoisuuden tarkoittavan ymmärrystä siitä, että puhutut sanat koostuvat äänneistä eli foneemeista ja äänneyhdistelmistä (tavuista). Tämä tietoisuus on tärkeää, jotta ymmärretään, että kirjaimet vastaavat äänneitä. Ortografinen tietoisuus on puolestaan ymmärrystä siitä, miten kirjaimet on järjestetty sanoissa. Lisäksi tarvitaan syntaktista tietoisuutta, joka liittyy kieliopillisiin sääntöihin. Pitkäkestoinen ja lyhytkestoinen muisti osallistuvat myös lukemiseen vahvistamalla yhteyttä puhuttujen ja luettujen sanojen välillä, mikä on tärkeää erityisesti sujuvassa lukemisessa.

Goswamin (2002) mukaan lukemisen ongelmat vaihtelevat eri kielissä. Ongelmat ovat vaikeampia epäsäännöllisen ortografian kielissä, kuten englannissa, kuin säännöllisen ortografian kielissä, joita ovat muun muassa italia, kreikka, saksa ja myös suomi. Säännöllisessä ortografiassa yksi kirjain vastaa yhtä äännettä. Dyslektikot voivat tällaisissa kielissä oppia kirjain-äännevastaavuuden ja saavuttaa foneemitietoisuuden toisin kuin epäsäännöllisen ortografian kielissä, joissa ongelmat jatkuvat yleensä aikuisuuteen. Säännöllisen ortografian kielissä ongelmat

näkyvät kuitenkin edelleen nopeutta ja sujuvuutta vaativissa tehtävissä (ks. myös Vellutino ym., 2004).

Dysleksian taustamekanismit. Dysleksian taustalla vallitsevista mekanismeista ei ole päästy yhteisymmärrykseen (Habib, 2000). Viime vuosikymmeninä eniten huomiota ovat herättäneet erityisesti kaksi kilpailevaa teoriasuuntaa: fonologisen häiriön teoria ja sensomotorinen teoria (Ramus, 2003).

Fonologisen teorian mukaan dyslektikoiden ongelmat liittyvät puutteelliseen fonologiseen tietoisuuteen, joka puolestaan vaikeuttaa kirjain-äännekoodausta ja muistiedustusten muodostamista (Vellutino ym., 2004). Monet tutkimukset tukevat käsitystä, että ongelma on nimenomaan fonologinen ja puhespesifi eikä auditorinen (ks. esim. Mody ym., 1997; Vellutino ym., 2004). Dysleksian monimuotoisuus ja suuret yksilölliset vaihtelut ovat kuitenkin saaneet jotkut tutkijat etsimään vaihtoehtoisia selityksiä (Snowling, 2006). Esimerkiksi *sensomotorisen* tai *magnosellulaarisen* teorian kannattajat ajattelevat, että dysleksia johtuu yleisestä auditorisen prosessoinnin vaikeudesta, joka puolestaan johtuu magnosolujen toiminnan häiriöstä sensorisissa kanavissa (Ramus, 2003; Stein & Talcot, 1999). Ajatellaan, että fonologiset ongelmat johtuvat auditorisen prosessoinnin puutteista ja siten ne välillisesti johtavat dysleksiaan. Esimerkiksi Tallal (1980) on esittänyt, että dyslektikoiden ongelmat liittyvät kyvyttömyyteen prosessoida nopeassa tahdissa esitettyjä lyhyitä ärsykeitä. Myös Reed (1989) on saanut tutkimuksissaan tukea tälle käsitykselle, sillä hän havaitsi, että dyslektikoilla on vaikeuksia nopeasti esitettyjen puheäänteiden järjestyksen arvioimisessa.

Snowlingin (2006) mukaan fonologisen tietoisuuden pulmat ovat edelleen vahvin selitysmalli dysleksialle, sillä magnosellulaariset teoriat eivät ole onnistuneet kiistämään fonologisen prosessoinnin ongelmien yhteyttä dysleksiaan. Dysleksian vaihtelevuus saattaisikin Snowlingin mukaan selittyä kasautuvilla riskitekijöillä sekä suojaavilla tekijöillä. Osa lapsista voi kompensoida fonologisen tietoisuuden ongelmiaan hyvällä sanavarastolla ja kielellisillä taidoilla. Ongelmat eivät myöskään ole samanlaisia kaikissa kielissä; esimerkiksi säännöllisemmän ortografian kielissä fonologisen tietoisuuden vaikeudet eivät tule niin selkeästi esille.

Vaikka kiista dysleksian tarkoista taustamekanismeista jatkuu, ajatellaan yleisesti kuitenkin, että fonologinen prosessointi on häiriintynyt dyslektikoilla ja tähän ongelmaan liittyy häiriötä puheen prosessoimisessa (ks. esim. McBride-Chang, 1995; Serniclaes ym., 2004, Snowling, 2006). On esimerkiksi huomattu, että äänteiden erottelu ja siihen liittyvä kategorinen havaitseminen on dyslektikoilla poikkeava, mikä johtaa heikompiin fonologisiin muistiedustuksiin (ks. esim. Serniclaes, Sprenger-Charollers, Carré, & Demonet 2001). Nykyään käsitetäänkin perimmäisten

vaikeuksien dysleksiassa liittyvän juuri näihin epätarkkoihin muistiedustuksiin (Lyytinen ym., 2005). Seuraavaksi kuvaan puheen prosessointiin vaikuttavia tekijöitä.

Puheen prosessointi

Puheen havaitseminen. Fitchin, Millerin ja Tallalin (1997) mukaan puhe koostuu ajallisesti vaihtelevista akustisista signaaleista, jotka rakentuvat useasta yhtäaikaisesta taajuudesta eli formantista. Vaikka puheen perustaajuus vaihtelee puhujan mukaan, ovat äänteiden tuotossa käytetyt taajuuksien yhdistelmät kuitenkin melko vakaita puhujien välillä (ks. myös Philips, 2001). Normaali kuuntelija voi näin ollen tunnistaa tietyt äänteet, vaikka puhuja vaihtuukin. Aivot eivät muunna puheen virtaa kohta kohdalta sen akustisia elementtejä vastaaviksi äänteiksi vaan prosessoivat informaation ja koodaavat sen kielessä esiintyviä foneemikategorioita käyttäen. Philipsin (2001) mukaan äänteiden havaitsemisessa hyödynnetäänkin foneettisia edustuksia kielen lingvistikategorioista ja äidinkielen kannalta merkitsevät kategoriat ovat paremmin edustettuina kuin epäolennaiset kategoriat. Myös Fitch ym. (1997) ovat esittäneet, että äidinkielen olennaiset foneemikategoriat muodostetaan puheenoppimisvaiheessa, kun opitaan asettamaan oikeat rajakohdat akustiseen signaaliin (ks. myös Kuhl ym., 1992). Tätä rajojen muodostamista ja havaitsemista kutsutaan kategoriseksi havaitsemiseksi, ja sitä käytetään äänteiden tunnistamisessa niiden vaihtuessa asteittaisesti foneemista toiseen.

Kategorinen havaitseminen ja magneettiefekti. Puheäänteitä havaitaan siis äidinkielen foneemikategorioista muodostettuja edustuksia hyödyntämällä (ks. esim. Cheour ym., 1998; Godfrey ym., 1981; Kuhl, 1993; Philips, 2001). Äänteet havaitaan kategorioina, vaikka ne ilmenevätkin todellisuudessa akustisena jatkumona. Libermanin, Harrisin, Hoffmanin ja Griffithin (1957) mukaan tämä niin kutsuttu kategorinen havaitseminen johtaa siihen, että äänteiden keskinäinen erottelu on helpompaa foneemikategorioiden rajoilla kuin kategorian sisällä. He havaitsivat tutkimuksessaan, että sellaisia puheäänteitä eroteltiin paremmin toisistaan, joille annettiin erillinen kategorianimeke, kuin niitä, jotka tulkittiin saman kategorian sisäisiksi, vaikka akustinen etäisyys molempien äänteiden välillä olisi ollut sama. Tätä ilmiötä, jossa erottelu on parempaa kategorioiden välillä kuin sisällä, kutsutaan foneemin rajaefektiksi (Iverson & Kuhl, 2000; Savela ym., 2003). Ilmiön ajatellaan johtuvan nimenomaan kategorisesta havaitsemisesta,

jonka vuoksi äänteet havaitaan yhdistämällä ne äidinkielen foneemeihin (Iverson & Kuhl, 2000). Tätä näkemystä vastaan sotivat kuitenkin tutkimukset, joissa kategorista havaitsemista on havaittu eläimillä (ks. esim. Kuhl & Miller, 1975) ja ei-puheäänteisissä äänissä (ks. Kluender, Dieh, & Wright, 1988). Näissä tapauksissahan ei voida olettaa, että taustalla vaikuttaisi foneettinen tunnistus. Myös Kuhlin (1991) esittämä magneettiefektiteoria on osittain ristiriidassa kategorisen havaitsemisen kanssa, sillä se on osoittanut, että äänteiden havaitseminen ei ole yhdenmukaista kategorian sisällä. Kuhlin mukaan prototyypin äänten lähellä olevia äänteitä on vaikeampi erotella toisistaan kuin kauempana prototyypistä olevia äänteitä (ks. myös Aaltonen ym., 1997).

Kuhl (1991, 1993) onkin esittänyt, että vokaalikategorian sisäinen rakenne vaikuttaa havaitsemiseen, ja tätä ilmiötä hän kutsuu magneettiefektiksi. Magneettiefektiteorian mukaan foneettiset kategoriat on koodattu prototyypeiksi eli abstrakteiksi esimerkeiksi kategorian jäsenistä ja foneemit havaitaan niiden etäisyytenä prototyypistä (Iverson & Kuhl, 2000). Jotkin äänteet voivat vastata paremmin prototyyppiä eli ovat lähempänä sitä kuin toiset äänteet. Magneettiefektiteorian mukaan prototyypiset äänteet vetävät magneetin tavoin puoleensa niiden läheisyydessä olevia samaan kategoriaan kuuluvia äänteitä, jolloin näitä äänteitä on vaikeampi erotella toisistaan. Sen sijaan äännekategorian rajoilla erottelu on helpompaa. Havainnot siis ikään kuin kutistuvat prototyypin lähellä, kun taas kategorian rajoilla laajenevat. Toisin kuin kategorisen havaitsemisen teoriassa magneettiefektiteoriassa oletetaan, että äänteiden havaitseminen on jatkumo, jossa havaitaan etäisyys prototyypistä eikä niinkään erillisiä kategorioita (Iverson & Kuhl, 2000). Kuhl (1991) on osoittanut efektin vauvoilla ja aikuisilla, mutta sitä ei sen sijaan ole havaittu apinoilla, mikä viittaa siihen, että efektiin vaikuttaa lingvistinen prosessointi.

Äidinkielen muistiedustukset. Magneettiefektiteorian mukaan puheen havaitseminen nojaa äidinkielen prototyypeistä muodostettaviin muistiedustuksiin, jotka alkavat Kuhlin, Williamsin, Lacerdan, Stevensin ja Lindblomin (1992) mukaan kehittyä noin puolen vuoden iässä. Muistiedustusten muodostaminen voi vaikeuttaa vieraan kielen äänteiden havaitsemista, sillä äidinkielessä näitä vastaavat äänteet saattavat kuulua samaan kategoriaan. Tällaisesta prosessoinnista on tyypillisenä esimerkkinä muun muassa japaninkielisten vaikeus erotella englannin kielen /r/- ja /l/-foneemeja, sillä ne kuuluvat japanissa samaan kategoriaan. Kuhlin, Conboyn, Paddenin, Nelsonin ja Pruittin (2005) mukaan äänteiden erottelu on universaalialta noin puolen vuoden ikään saakka, jonka jälkeen vieraan kielen äänteiden erottelu toisistaan vaikeutuu. Seuraa niin sanotusti hermostollinen ”sitoutuminen” oman äidinkielen akustisiin ominaisuuksiin. Tämä sitoutuminen edesauttaa äidinkielen oppimista, mutta vaikeuttaa vieraan kielen havainnointia. Kuhl ym. (2005) huomasivat tutkimuksessaan, että ne lapset, jotka erottelivat puolen vuoden iän

jälkeen edelleen hyvin vieraan kielen äännteitä, suoriutuivat myöhemmin huonommin äidinkielen kykyä mittaavissa tehtävissä. Vieraiden kielten äännekontrastien erottelukyvyn säilyminen vaikeutti siis myöhempää kielen oppimista (ks. myös Rivera-Gaxiola, Klarman, Garcia-Sierra, & Kuhl, 2005). Serniclaes ym. (2004) ovatkin havainneet, että dyslektikot eivät omaksu puolen vuoden iässä normaalisti lukevien tavoin foneemista äännteiden erottelutapaa vaan säilyttävät herkkyyden epäolennaisille äännteiden vaihteluille. Dyslektikot reagoivat siis herkemmin kategorioiden sisäisiin vaihteluihin, mikä häiritsee puheen prosessointia.

Näätänen ym. (1997) ovat saaneet vahvistusta näille äidinkielen äännteistä muodostettaville muistiedustuksille tutkimalla suomalaisia ja virolaisia aikuisia MMN-koeastelmalla. MMN on erotteluprosessointia kuvaava aivojen heräteväste, joka syntyy, kun toistetun ärsykkeen joukossa havaitaan poikkeava ärsyke. Näätänen ym. huomasivat, että suomalaisilla koehenkilöillä oli vahvempi MMN-vaste suomen kielen ö-äännteeseen kuin virolaiseen ö-äännteeseen ja vastaavasti virolaisilla vahvempi õ-äännteeseen kuin suomalaisen ö-äännteeseen, kun ö- ja õ-äänne esiintyivät poikkeavina ärsykkeinä toistettujen e-vokaalien joukossa. Vahvempi MMN-vaste äidinkielen äännteeseen osoitti, että se erotettiin vieraan kielen äännettä paremmin toistetusta äännteestä. Tämä viittaa siihen, että äidinkielen äännteestä oli olemassa vahvempi muistiedustus. Cheour ym. (1998) ovat vahvistaneet käsitystä muistijäljen muodostumisesta samanlaisella asetelmalla tutkimalla kuuden kuukauden ja vuoden ikäisiä suomalaisvauvoja. Tutkimuksessa ilmeni, että puolivuotiaat suomalaisvauvat havaitsivat eron sekä suomalaisen e- ja ö-äänteen että suomalaisen e- ja virolaisen õ-äänteen välillä. Vuoden ikäiset vauvat eivät sen sijaan enää erotelleet vieraan kielen äännettä hyvin toistetusta äännteestä. Myös Kirmse ym. (2008) ovat havainneet, että äidinkielen äänne erotetaan toistetusta äännteestä paremmin kuin vieraan kielen äänne, vaikka molemmat äännteet olisivat akustisilta ominaisuuksiltaan yhtä kaukana toistetusta äännteestä.

Myös Best, McRoberts, Lafleur ja Silver-Isenstadt (1995) ovat esittäneet, että äännteiden fysikaalisista ja foneettisista ominaisuuksista aletaan noin puolen vuoden iässä johtaa abstraktimpia fonologisia kategorioita, jotka vaikuttavat kielen havaitsemiseen. Best on esittänyt vieraan kielen äännteiden prosessointia selittävän PAM (perceptual assimilation model) -teorian, jonka mukaan vieraan kielen äännteiden prosessointi riippuu siitä, miten ne assimiloidaan äidinkielen kategorioihin. Vieraan kielen äännteitä voidaan erotella helpommin, jos ne assimiloidaan äidinkielen eri foneemikategorioihin. Erottelu on sitä vastoin heikkoa, jos ne assimiloidaan samaan äidinkielen kategoriaan.

Magneettiefektin kritiikkiä. Kuhlin (1991) alkuperäinen tutkimus herätti kritiikkiä erityisesti sen osalta, oliko siinä kyetty osoittamaan magneettiefekti vai selittyivätkö tulokset perinteisellä

kategorisen havainnoinnin teoriolla. Kuhl testasi tutkimuksessaan koehenkilöiden kykyä erotella i-äännettä sen erilaisista prototyypisistä tai ei-prototyypisistä variaatioista. Koehenkilöitä ei kuitenkaan pyydetty identifioimaan kuulemiaan äänneitä, joten on mahdollista, että ei-prototyypisiä äänneitä ei tunnistettu lainkaan i-äänneiksi vaan jonkin toisen kategorian äänneiksi. Tällöin erottelu olisikin tapahtunut eri kategorioihin kuuluvien äänneiden välillä, jolloin kyseessä ei olisi magneettiefekti. Iverson ja Kuhl (1995) ovat kuitenkin myöhemmin tutkimuksessaan vahvistaneet magneettiefektin huolellisemmalla tutkimusasetelmalla. He huomasivat, että koehenkilöt eivät tunnistaneet osaa alkuperäisen asetelman prototyypisistä i-äänneistä, mutta magneettiefekti havaittiin edelleen, kun nämä äänneet poistettiin ja ärsykkeinä käytettiin vain selkeästi i-kategorian sisäisiä äänneitä.

On myös kyseenalaistettu, liittyykö tämä prototyypinen äänneiden prosessointi korkeamman tason foneettiseen prosessointiin, niin kuin Kuhl (1991) alun perin oletti (ks. myös Kuhl ym., 1992). Jotkut tutkijat ovatkin esittäneet, että kategorian sisäisiä eroja prosessoitaisiin lähinnä akustisten piirteiden perusteella (Guenther & Gjaja, 1996; Savela ym., 2003; Sharma & Dorman, 1998; Tremblay & Kraus, 2002; Winkler ym., 1999). Sharma ja Dorman (1998) testasivat magneettiefektiteoriaa esittämällä koehenkilöille vokaalin i variaatioita. Toisessa äänneparissa molemmat äänneet olivat prototyypisiä ja toisessa molemmat olivat ei-prototyypisiä. He eivät saaneet tukea magneettiefektille, sillä äänneiden erotteluun ei vaikuttanut se, oliko kyseessä prototyypinen vai ei-prototyypinen äännepari. Sharma ja Dorman kuitenkin huomasivat, että prototyypisiin äänneisiin syntyi vahvempi MMN. Tästä he päättelivät, että kategorian sisäisen erottelun täytyi nojata akustisiin tekijöihin, koska se näkyi vain akustista erottelua ilmentävänä MMN-vasteena, mutta ei kognitiivista prosessointia vaativassa behavioraalisessa erottelutehtävässä. Näin ollen kategorian sisäinen erottelu perustuisikin akustiseen erotteluun eikä kognitiivisesti korkeamman tason muistiedustuksiin. Myös Winkler ym. (1999) ovat havainneet, että kategorian sisäiseen erotteluun syntyy MMN-vaste, vaikkakin heikompana kuin kategorioiden väliseen erotteluun. Tämä viittaa siihen, että kategorian sisäisiä eroja voidaan prosessoida auditorisesti, vaikka foneettista edustusta kontrastista ei koehenkilöiden äidinkielessä olisikaan. Savela ym. (2003) ovat Sharman ja Dormanin havainnoista poiketen huomanneet, että foneettiset tekijät näyttävät vaikuttavan juuri behavioraaliin tehtäviin. Savela ym. tutkivat, miten suomalaiset aikuiset erottelivat suomen ja komin kielen vokaaleita toisistaan. Esitetyt komin kielen äänneet kuuluvat samaan foneemikategoriaan kuin vastaavat suomen kielen äänneet, joten äänneiden havaitseminen vaati kategorian sisäistä erottelua. Tutkijat huomasivat, että MMN-vasteeseen vaikuttivat lähinnä ärsykkeen akustiset ominaisuudet. Sen sijaan reaktioaikaan vaikuttivat ärsykkeen foneettiset ominaisuudet, kuten äänneen sijainti kategorian rajalla. Savela ym. päättelivät,

että foneettiset tekijät näyttivät vaikuttavan enemmän prosesseihin, jotka olivat tarkkaavuuden alaisia, kuin esimerkiksi MMN-vasteeseen, joka ei vaadi tarkkaavaisuutta.

Guenther ja Gjaja (1996) ovat esittäneet, että magneettiefekti saattaisi selittyä auditorisella kokemuksella eikä niinkään prototyyppien magneettisilla ominaisuuksilla. Heidän mukaansa akustinen kokemus alkaa muuttaa hermosolujen aktivoitumista siten, että useammin esiintyviin foneemeihin aktivoituu suurempi joukko hermosoluja kuin harvemmin esiintyviin. Sellaisia hermosoluja on enemmän, jotka reagoivat prototyypin lähellä oleviin äänteisiin, kuin sellaisia, jotka reagoivat kategorioiden rajoilla oleviin. Jos äänne osuu rajalle, jossa sen viereisiin äänteisiin reagoi suurempi hermosolujoukko kuin toisella puolella oleviin äänteisiin, vetävät suuremmat hermosolujoukot äännettä puoleensa. Tällöin äänten havaitaan olevan lähempänä prototyyppiä kuin se oikeasti on. Näin tapahtuu helpommin, kun äänne on prototyypin läheisyydessä, koska hermosolujoukkojen jakauma on siinä jyrkempi kuin äännekategorian rajalla, jossa ei ole niin suuria hermosolukeskittymiä. Äänteiden erottelu voisi siis perustua puhtaasti auditoriseen kokemukseen eikä niinkään korkeamman kognitiivisen tason prosessointiin.

Iverson ja Kuhl (2000) ovatkin korjanneet magneettiefektiteoriaa ja pyrkineet selvittämään, minkälaiset mekanismit vaikuttavat magneettiefektin taustalla. Heidän mukaansa on mahdollista, että magneettiefektinä näkyvä havainnon muuttuminen selittyisi auditorisella prosessoinnilla eikä niinkään foneemisella kategorisoinnilla. Tähän auditoriseen erotteluun vaikuttaa kuitenkin kokemus omasta äidinkielestä, sillä vauvoilla erottelu tapahtuu alun perin hyödyntämällä auditorisessa prosessoinnissa luonnollisesti esiintyviä herkkyyksiä tietyille akustisille rajoille, mutta havainnointi muuttuu, kun foneemikategoriat opitaan (Kuhl ym., 1992). Oma äidinkieli alkaa vaikuttaa havaintoihin, ja tämä tapahtuu erityisesti magneettiefektin vaikutusta hyödyntäen. Myös Best, McRoberts ja Goodell (2001) ovat huomauttaneet, että magneettiefektiteoriassa ei oleteta prototyyppiä muodostettavan foneettisesti, vaan niiden nähdään syntyvät nimenomaan akustisen kokemuksen perusteella. Vieraan kielen äänteistä ei synny kategorioita, koska niistä ei ole akustista kokemusta.

Joka tapauksessa näyttää siltä, että normaali havaitseminen nojaa prototyypeistä muodostettaviin muistiedustuksiin, olivatpa ne sitten akustisen tai lingvistisen kokemuksen muokkaamia. Magneettiefekti puolestaan heikkenee, mikäli muistiedustukset ovat heikkoja. Aaltonen ym. (1997) ovat esimerkiksi havainneet, että magneettiefekti ei välttämättä toimi henkilöillä, joilla on heikot muistiedustukset. Aaltonen ym. selvittivät, miten hyvät ja huonot äänteiden luokittelijat havaitsivat suomen kielen i- ja y-äänteitä, kun niitä esitettiin eri variaatioina. He huomasivat, että koehenkilöt jakautuivat hyviin ja huonoihin luokittelijoihin sen mukaan, kuinka yhdenmukaisesti he pystyivät kategorioimaan y- ja i-äänteitä. Vain hyvät luokittelijat pystyivät

johdonmukaisesti tunnistamaan prototyypinä pitämänsä i-äänteen. Aaltosen ym. havainnot antoivat myös ainakin hyvien luokittelijoiden osalta tukea magneettiefektille. Tutkimuksesta ilmeni esimerkiksi, että hyvien luokittelijoiden oli vaikeampi havaita pieniä muutoksia prototyypisessä vokaalissa kuin epäprototyypisessä, kun taas heikot luokittelijat havaitsivat eroja helpommin prototyypisissä vokaaleissa. Tutkijat päättelivät, että heikoilla luokittelijoilla kategorioiden muistiedustukset eivät ole ehkä niin hyvin kehittyneitä, mikä ilmeni heikkona MMN-vasteena.

Heikot muistiedustukset siis vääristävät normaalia puheen havaitsemista. Dyslektikoiden on huomattu poikkeavan normaaleista lukijoista sekä kategorioiden välisessä että kategorian sisäisessä havaitsemisessa. Onkin esitetty, että dyslektikoiden ongelmat johtuvat heikoista muistiedustuksista. Seuraavaksi kuvaan tarkemmin dyslektikoiden puheen havaitsemista.

Dyslektikot ja puheen havaitseminen. Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että dyslektikot havaitsevat paremmin eroja kategorioiden sisällä kuin välillä, kun taas normaalisti lukevilla erottelu on parempaa kategorioiden välillä (ks. esim. Godfrey ym., 1981; Serniclaes ym., 2001; Serniclaes ym., 2004; Werker & Tees, 1987). Godfrey ym. (1981) ovat esittäneet, että hyvät lukijat muodostavat pitkäkestoisia edustuksia foneettisista yksiköistä, mikä nopeuttaa lukemista. Tämä edustusten muodostaminen tapahtuu puheoppimisvaiheessa abstrahoimalla. Heikoilla lukijoilla on kuitenkin vaikeuksia näiden edustusten muodostamisessa. Godfrey ym. esittivät heikosti ja normaalisti lukeville lapsille ba–da- ja da–ga-tavujen jatkumopareja. He havaitsivat, että dyslektikoilla erottelu oli parempaa kategorian sisällä ja heikompaa kategorioiden välillä. He päättelivät, että parempi kategorian sisäisten äänteiden erottelu johtaa epäjohdonmukaisuuteen kategorisoinnissa ja siten vaikeuteen muodostaa pitkäkestoisia edustuksia. Myös Gerrits ja Bree (2009) huomasivat tutkimuksessaan, että dysleksian riskissä olevat lapset eivät havaitse puheäänteitä kategorisesti vaan olivat herkempiä merkityksettömille akustisille eroille foneemikategorian sisällä kuin merkityksellisille eroille kategorioiden välillä. He tutkivat 3–4-vuotiaita dysleksian riskissä olevia hollantilaislapsia vertaamalla heidän suoriutumistaan kontrollilapsiin puheäänteiden kategorisointitehtävässä, jossa täytyi tunnistaa oikein äännejatkumolla esitetyt äänteet. Äänteitä esitettiin pop–kop-äänteiden jatkumolla, jossa lasten tuli tunnistaa äänne joko pop- (merkitsee nukkea) tai kop- (merkitsee kuppia) äänneeksi.

Serniclaesin ym. (2001) mukaan dysleksia liittyy kyvyttömyyteen hyödyntää foneettisia vihjeitä, mikä puolestaan johtuu heikosta foneemikategorioiden muodostuksesta. Kirjainäännekoodaus vaikeutuu, kun fonologiset edustukset eivät ole selvärajaisia. Serniclaes ym. tutkivat, miten dyslektikkolapset erottelivat /ba/- ja /da/-tavujen variaatioita ja niiden ei-puheäänisiä vastineita. He havaitsivat, että dyslektikot erottelivat foneemeja paremmin kategorian sisällä kuin

kategorioiden välillä. Tämä haastaa Serniclaesin ym. mukaan väitteet siitä, että foneettisen prosessoinnin pulmat johtuisivat lähinnä vaikeudesta käsitellä nopeita auditorisia vihjeitä (vrt. esim. Reed, 1989; Tallal, 1980). Dyslektikkojen hyvä kategorian sisäinen erottelu viittaa siihen, että kyseessä ei voi olla nopeiden vihjeiden prosessoinnin ongelma, sillä dyslektikot olivat jopa kontrolleja parempia hyödyntämään akustisia vihjeitä, kuten nopeita taajuuksien vaihteluita kategorian sisällä. Dyslektikkojen parempi erottelu kategorian sisällä ja huonompi kategorioiden välillä voidaan Serniclaesin ym. mukaan selittää kategorisen havaitsemisen heikkoudella. Dyslektikot eivät havaitse niin kategorisesti kuin kontrollit vaan kiinnittävät huomioita vaihteluihin kategorian sisällä (ks. myös Gerrits & Bree, 2009).

Serniclaesin ym. (2004) mukaan dyslektikoiden parempi äänteiden erottelu foneemikategorian sisällä saattaisi selittyä heidän suuremmalla herkkyydellään puheen allofoneille eli puheessa luonnostaan esiintyville äänteiden vaihteluille. Alle puolivuotiaat lapset käsittävät nämä puheäänteiden variaatiot erillisinä foneettisina kategorioina, mutta alkavat noin puolen vuoden iässä integroida niitä äidinkielen äänteitä vastaaviksi foneemeiksi eli kielellisesti merkityksellisiksi äännekategorioiksi. Dyslektikoilla allofoninen puheen havaitseminen vaikuttaisi kuitenkin säilyvän ainakin lapsuudessa, minkä vuoksi dyslektikot erottelevat puheäänteet useammaksi kategoriaksi kuin normaalisti lukevat. Tämä vaikuttaa lukemiseen, sillä kirjainten muuttaminen äänteiksi ei onnistu automaattisesti, kun äidinkielen foneemeita vastaavat muistiedustukset ovat heikkoja tai saattavat jopa puuttua kokonaan. Serniclaes ym. testasivat pa–ba- ja ka–ga-äännejatkumoiden erottelutehtävällä, olivatko dyslektikkolapset herkempiä sellaisille foneettisille kategorioille, joita ei esiintynyt lasten äidinkielessä. Tutkijat huomasivat, että dyslektiset lapset erottelivat allofoneja normaalisti lukevia paremmin, kun taas kategorioiden välinen erottelu oli heikompaa. He päättelivät, että tämä allofoninen havaitseminen estää dyslektikkoja muodostamasta vakaita foneemiedustuksia. Koska allofoninen havaitseminen on säilynyt, onnistuu myös vieraiden kielen äänteiden erottelu dyslektikoilla normaalisti lukevia paremmin.

Puheen havaitsemista on tutkittu lähinnä behavioraalisilla mittareilla ja jonkin verran myös MMN-vasteen avulla. MMN-vaste voikin paljastaa eroja ärsykkeiden akustisessa prosessoinnissa. Viime vuosina herätevastetutkimuksissa on alettu kuitenkin kiinnittää huomiota myös toiseen erotteluvasteeseen, joka syntyy poikkeaviin ärsykkeisiin. Tämä myöhäisesti ilmenevä erottelunegatiivisuus LDN (late discriminative negativity) saattaa mahdollisesti kuvastaa korkeammantasoista kognitiivista erotteluprosessointia. Seuraavaksi kuvaan tarkemmin ERP-tutkimusten tekemistä.

ERP-tutkimukset

Pictonin ym. (2000) mukaan ERP eli herätepotentiaali tai tapahtumasidonnainen potentiaali (event-related-potential) on pään pinnalta mitattava sähköinen vaste, jota voidaan käyttää aivojen informaation prosessoinnin tutkimiseen. ERP-vasteet ovat aivoissa ilmeneviä jännitteen vaihteluita, jotka liittyvät johonkin fyysikaaliseen tai mentaaliseen tapahtumaan. Niitä voidaan eristää pään pinnalta mitatusta EEG (electroencephalogram) -käyrästä suodattamalla ja keskiarvoistamalla saatua signaalia. ERP-mittaukset sopivat hyvin aivoprosessien ajoittamiseen, koska ne voidaan mitata millisekuntien tarkkuudella. Spatiaaliseen paikallistamiseen menetelmä sopii huonommin, mutta mittaamalla vasteita pään pinnalta useammasta kohdasta voidaan estimoida prosessien lähteitä.

Näätänen (1989) on kuvannut ERP-vasteita ärsykkeiden aiheuttamiksi muutoksiksi, jotka ilmenevät peräkkäisinä negatiivisina ja positiivisina aaltoheilahduksina aivosähkökäyrässä. Näitä eri aaltomuotoja on kirjallisuudessa nimetty erillisiksi ERP-komponenteiksi, mutta todellisuudessa ne muodostuvat useasta samanaikaisesta aivoprosessista. Näätäsen mukaan erilliset samaan aikaan toimivat aivoprosessit tuottavat kukin osansa ERP-komponenttiin. Komponenttien luotettavan arvioimisen vuoksi mittauksia tulisikin hänen mukaansa tehdä useammassa pisteessä.

ERP-komponentit. Komponentit nimetään niiden polariteetin (N = negatiivinen ja P = positiivinen) ja esiintymislatauksen mukaan (Picton ym., 2000). Esimerkiksi N1-vaste on negatiivinen heilahdus, joka syntyy pitkän hiljaisuuden jälkeen esitettyyn kuuloärsykkeeseen noin 100 millisekuntia ärsykkeen esittämisen jälkeen (Näätänen, 1989).

Eräs erityisen paljon tutkituista ERP-komponenteista on MMN (miss match negativity), jota on käytetty myös puheen prosessoinnin tutkimiseen (ks. esim. Näätänen, 1997; Winkler ym., 1999). MMN:n huippu ilmenee noin 100–200 millisekuntia ärsykkeen esittämisen jälkeen (Näätänen, 1995). Näätäsen ja Lyytisen (1989) mukaan MMN on negatiivinen heilahdus, joka syntyy, kun havaitaan edellisistä ärsykkeistä fyysikaalisesti poikkeava ärsyke. Se voi syntyä esimerkiksi taajuuden, voimakkuuden tai äänen keston muutokseen (Näätänen, 1995). On esitetty, että MMN ilmenee, kun sensorista ärsykettä on prosessoitu pidempään ja se saavuttaa niin kutsutun muistijärjestelmän (Näätänen, 1989). Kuultu ärsyke poikkeaa tällöin aiemmin tallennetusta aisti-informaatiosta. MMN mitataan yleisesti niin sanotulla MMN-koeasetelmalla, jossa toistetaan jotakin ärsykettä lyhyin välein ja joukossa esitetään satunnaisesti poikkeava ärsyke. Toistettujen

ärsykkeiden sarjassa toistettu eli standardiärsyke synnyttää vain N1- ja P2-vasteet. Poikkeavaan ärsykkeeseen syntyy näiden lisäksi MMN. MMN-vasteen latenssin on havaittu lyhentyvän, jos ärsyke-ero toistetun ja poikkeavan ärsykkeen välillä kasvaa. MMN ei vaadi tarkkaavuuden kohdistamista esitettyihin ärsykkeisiin.

Pictonin ym. (2000) mukaan yhtä aikaa MMN:n kanssa voi esiintyä myös N2- ja P3-vasteet. N2 liittyy tarkkaavuuden suuntaamiseen, ja se syntyy toistettuun ärsykkeeseen. Näätäsen ja Lyytisen (1989) mukaan P3a syntyy kuten MMN myös fysikaaliseen muutokseen, mutta on suurempi, kun koehenkilö tarkkailee ärsykesarjaa. Onkin esitetty, että P3a ilmentäisi tarkkaavuuden tahatonta suuntaamista uuteen ärsykkeeseen.

LDN (late discriminative negativity). MMN:n lisäksi on havaittu myös toinen vaste, joka liittyy auditorisissa ärsykkeissä havaittuihin eroihin. Tämä LDN-vaste (myöhäisesti ilmenevä erottelu-negatiivisuus) syntyy poikkeavaan ärsykkeeseen toistettujen standardiärsykkeiden joukossa ja ilmenee noin 400–600 millisekuntia ärsykkeen esittämisen jälkeen (Čeponienė ym., 2004). Joidenkin tutkimusten mukaan vaste saattaa myös olla aiempi, noin 300–500 ms (ks. esim. Schulte-Körne, Deimel, Bartling, & Remschmidt, 1998). LDN on melko vähän tutkittu ERP-komponentti, sillä se löydettiin vasta 1990-luvulla. Korpilahti (1996) oli ensimmäinen tutkija, joka raportoi tämän myöhäisen negatiivisuuden lapsilla. Čeponienė ym. (2004) mukaan LDN muistuttaa monilla tavoin MMN-vastetta, sillä se on havaittavissa jo syntymästä saakka ja se syntyy poikkeavaan ärsykkeeseen eikä vaadi tarkkaavaisuuden kohdistamista. LDN kuitenkin poikkeaa MMN:stä monin tavoin. Čeponienė ym. havaitsivat tutkimuksessaan, että LDN ilmenee vahvimpana frontaali- ja sentraalialueilla (FZ- ja CZ-kanavilla), kun taas MMN oli vahvaa myös parietaalialueilla. Toisaalta LDN:n on havaittu ilmenevän myös posteriorisempaan kuin MMN-vasteen (Čeponienė, Cheour, & Näätänen, 1998). Erot näyttävät kuitenkin selittyvän enemmän MMN-vasteen vaihtelulla erilaisiin ärsykkeisiin kuin LDN-vasteella, joka molemmissa tapauksissa painottui vahvimmin fronto-sentraalisille alueille (Čeponienė ym., 2004). Joka tapauksessa LDN:n ja MMN:n erilaiset topografiat viittaavat prosessien erilaisiin lähteisiin. Lisäksi LDN esiintyy myöhemmällä aikaikkunalla kuin MMN. LDN-amplitudi myös pienenee iän myötä, kun taas MMN säilyy suhteellisen samanlaisena. LDN onkin helpompi havaita lapsilla, mutta sitä on löydetty myös aikuisilta. LDN:n kehityksellisen muutoksen Čeponienė ym. (2002) ajattelevat liittyvän yleiseen hermoston kehitykseen tai tarkkaavuuden parantumiseen.

LDN:n merkityksestä ei ole päästy yksimielisyyteen. Melko yleisesti on hyväksytty, että LDN:n täytyy edustaa jonkinlaista myöhempää prosessointia eikä se esimerkiksi sen myöhäisen latenssin vuoksi voi olla vain sensorista erottelua (ks. esim. Čeponienė ym., 2002; Čeponienė ym., 2004;

Hommet ym., 2009; Hämäläinen, Leppänen, Guttorm, & Lyytinen, 2008; Korpilahti ym., 2001). Ei ole kuitenkaan selvää, mitä tämä myöhempi prosessointi voisi olla. Joidenkin tutkijoiden mukaan LDN edustaa tarkkaavuuden uudelleen orientoimista (Shestakova, Huotilainen, Čeponienė, & Cheour, 2003), toisten mukaan semanttista erottelua (Korpilahti ym., 2001) tai jonkilaista kognitiivisen tason prosessointia (Čeponienė ym., 2004). LDN:n on alun perin esitetty liittyvän vain puheääniin (Korpilahti, 1996; Korpilahti; ym., 2001; Schulte-Körne, Deimel, Bartling, & Remschmidt, 2001), mutta sen on myöhemmin havaittu syntyvän myös ei-puheäänteisiin ääniin (Čeponienė ym., 2002).

Korpilahti ym. (2001) ovat ehdottaneet, että LDN on poikkeavuuden havaitsemista semanttisella tasolla, sillä he huomasivat, että se syntyy vasteena vain puheäänteisiin muttei ei-puheäänteisiin ääniin ja on suurempi sanoihin kuin epäsanoihin. Myös Schulte-Körne ym. havaitsivat tutkiessaan sekä dyslektisiä lapsia (1998) että aikuisia (2001), että LDN oli pienempi amplitudiltaan dyslektikoilla vain puheäänitilanteessa, mutta ei-puheäänteisiä ääniä esitettäessä eroja ei sen sijaan syntynyt. Čeponienė ym. (2002) sitä vastoin havaitsivat, että LDN syntyy myös ei-puheäänteisiä ääniä esitettäessä eikä se näytä vaihtelevan ärsykkeen piirteiden mukaan. Tutkijat esittivät koehenkilöille vokaaleja, yksinkertaisia ja komplekseja ei-puheäänteisiä ääniä. MMN vaihteli latenssiltaan ja amplitudiltaan esitetyn ärsykkeen mukaan, mutta LDN:ssä ei sen sijaan havaittu eroja. Myöskään topografialtaan LDN ei vaihdellut sen mukaan, oliko esitetty ärsyke yksinkertainen vai monimutkainen ei-puheäänteinen ääni tai puheääni. Čeponienė ym. päättelivät, että LDN ei ole herkkä esitetyn ärsykkeen piirteille.

Puhespesifisyyteen liittyvän kiistan lisäksi LDN:n merkityksestä on esitetty myös muita teorioita. Shestakovan ym. (2003) mukaan LDN saattaisi ilmentää tarkkaavuuden uudelleen suuntaamista häiriötekijän jälkeen, mihin antaa viitteitä heidän suomalaislapsia koskeva tutkimuksensa. Shestakova ym. vertasivat 3–6-vuotiaita suomalaislapsia, jotka olivat ranskankielisessä koulussa tai päiväkodissa, suomalaislapsiin, joilla ei ollut kokemusta ranskan kielestä. He havaitsivat, että LDN samoin kuin automaattista tarkkaavuutta ilmentävä P3a ja sensorisen poikkeavuuden havaitsemista ilmentävä MMN olivat suurempia ranskalle altistuneilla lapsilla ranskan kielen e-äänteisiin kuin lapsilla, joilla ei ollut kokemusta ranskan kielestä. Poikkeavia äänteitä (ranskan kielen e) esitettiin toistettujen standardiäänteiden (vokaali i) joukossa passiivisessa MMN-koetilanteessa, jonka aikana lapset katsoivat videoita eivätkä siis keskittyneet äänteisiin. P3a-vasteen amplitudin kasvaminen ranskalle altistumisen myötä osoittaa Shestakovan ym. mukaan sen, että ranskan kielen äänteet kiinnittävät herkemmin ranskalle altistuneiden lasten tarkkaavuuden. Tämä tarkkaavuuden herääminen taas viittaa siihen, että ranskalle altistuneille lapsille oli syntynyt ranskan kielen äänteille muistiedustukset, jotka aktivoituivat äänteitä

esitettäessä. Suurempi LDN-vaste ranskalle altistuneilla lapsilla selittyisi Shestakovan ym. mukaan sillä, että häiriön jälkeen tarkkaavuus kohdistetaan takaisin aikaisempaan kohteeseen. LDN edustaa siis tarkkaavuuden uudelleen orientoimista. Tähän viittasi myös se, että P3a ja LDN korreloivat, kun taas LDN:n ja MMN:n välillä ei löytynyt korrelaatiota.

Tarkkaavuutta ilmentävän P3a-vasteen ei kuitenkaan kaikissa tutkimuksissa ole havaittu ennustavan LDN:n vaihtelua ryhmien välillä. Esimerkiksi Hämäläisen ym. (2008) mukaan P3a-komponenttia ei välttämättä ilmene silloin, kun ryhmät eroavat LDN-vasteen suhteen. Hämäläisen ym. tutkimuksessa esitettiin dyslektikoille ja normaalisti lukeville lapsille äänipareja, joissa toinen ääni poikkesi ensimmäisestä joko nousuajaltaan tai taajuudeltaan. Äänen nousuajan muutos ei synnyttänyt P3a-vastetta, kun taas taajuuden muutos synnytti. Kuitenkin LDN erosi ryhmien välillä vain nousuaikatehtävässä eli silloin, kun P3a-vastetta ei syntynyt. Sitä vastoin ryhmät eivät eronneet LDN-vasteen suuruudessa, kun esitettiin ärsyke, joka sai aikaan P3a-vasteen. LDN:n muutos ei siis näyttänyt olevan yhteydessä tarkkaavuuteen. Myös Čeponienė ym. (2004) pitivät tarkkaavuuden uudelleen orientoimista epätodennäköisenä selityksenä LDN-vasteelle, koska monissa tutkimuksissa ei ole havaittu P3a-vasteen edeltävän LDN:ää.

Barry, Hardiman ja Bishop (2009) ovat ehdottaneet, että LDN voisi indeksoida fonologisia edustuksia. He esittivät aikuisille hyvillä ja heikoilla epäsanojen toistajille neljän tavun sarjaa, jossa jokin sarjan tavuista poikkesi muista. He halusivat tutkia, vaikuttiko poikkeavan tavun paikka syntyviin vasteisiin. Ilmeni, että LDN-vaste oli pienempi kolmannen tavun kohdalla heikommilla epäsanojen toistajilla. MMN sen sijaan ei vaihdellut paikan perusteella, eivätkä ryhmät eronneet toisistaan MMN-vasteen suhteen. Barry ym. päättelivät, että MMN ja LDN edustavat todennäköisesti erilaista prosessointia. Tähän viittasi myös se, että LDN ja MMN eivät korreloineet keskenään. Barryn ym. mukaan MMN ilmensi varhaista äänteiden erottelua, joka näyttäisi toimivan myös heikommilla epäsanojen toistajilla. Sen sijaan ryhmien väliset erot LDN-vasteessa viittaavat Barryn ym. mielestä siihen, että huonot epäsanojen toistajat eivät onnistuneet tuottamaan vahvoja fonologisia edustuksia toistetuista ärsykkeistä. Ongelma olisi siis äänteiden koodaamisessa lyhytkestoiseen muistiin. Huonojen muistiedustusten vuoksi heikot epäsanojen toistajat prosessoivat hitaammin ääniteitä ja vaikutus kasaantuu kolmannen tavun kohdalla ilmeten heikentyneenä LDN-vasteena poikkeavaan tavuun. Neljännen tavun kohdalla ongelmaa ei ollut, koska sen jälkeen ei seuraa uusia ärsykeitä, jotka häiritsisivät äänteen koodausta. Barry ym. esittävätkin, että vertailtaessa poikkeavia ääniteitä standardiäänteisiin äänitteet koodataan lyhytkestoiseen muistiin fonologisiksi edustuksiksi ja LDN indeksoi, miten hyvin tämä edustusten muodostaminen onnistuu.

LDN:n kehityksellisiä muutoksia on tutkittu jonkin verran. Čeponienėn ym. (2004) mukaan LDN muuttuu enemmän kehityksen myötä toisin kuin MMN, joka säilyy melko vakaana. Alonso-

Bua, Diaz ja Ferraces (2006) havaitsivat, että 4–6,5-vuotiailla lukihäiriöisillä lapsilla oli lingvistisessä tehtävässä suuremmat LDN-amplitudit kuin kontrolleilla ja nämä amplitudit pienenivät kahdeksanteen ikävuoteen mennessä, kun taas kontrolleilla ne pysyivät samalla tasolla. Ei-kielellisten äänten tehtävissä kontrollien LDN-amplitudit kasvoivat kypsymisen myötä, kun taas lukihäiriöisten LDN-vaste pieneni, vaikkakaan ei merkittävästi. Tämä viittaisi siihen, että hyvillä lukijoilla kielten käsittelyssä tarvittavat prosessit ovat kehittyneet jo varhain ja ei-kielellisiä ärsykeitä käsittelevät prosessit kehittyvät vielä. Dyslektikoilla taas LDN-vaste pieneni sekä kielellisiin että ei-kielellisiin ärsykkeisiin, mikä viittaa kypsymisen myöhästymiseen.

LDN:n topografiaa on selvitelty muutamissa tutkimuksissa. Maurerin, Bucherin, Bremin ja Brandeisin (2003) tutkimus osoitti, että LDN oli tavupareja esitettäessä normaalisti lukevilla vahvempi vasemmalla aivopuoliskolla, kun taas dysleksiariskissä olevilla aktivaatio oli symmetrinen. Alonso-Bua ym. (2006) sitä vastoin havaitsivat, että LDN oli tavutehtävässä vahvempi dyslektikoilla oikealla aivopuoliskolla kuin normaalisti lukevilla, joilla oli symmetrinen aktivaatio. Dyslektikoilla esiintyi siis epänormaalia aktivaatiota oikealla aivopuoliskolla. Schulte-Körnen ym. (2001) mukaan LDN näyttää painottuvan oikealle frontaalialueelle sekä dyslektikoilla että kontrolleilla. Myös Hämäläinen ym. (2008) ovat huomanneet oikealle painottuvan vasteen molemmissa ryhmissä kuitenkin siten, että kontrolleilla aktivoituivat sentraaliset ja mastoidialueet sekä oikea frontaalialue, kun taas dyslektikkolapsilla aktivaatio painottui oikealle sentraalialueelle. Hämäläisen ym. tutkimuksessa ärsykkeinä oli kuitenkin vain ei-puheäänteisiä ääniä. Hommet ym. (2009) ovat puolestaan tutkineet LDN-vasteen topografiaa käyttämällä SCD-muunnosta (scalp current density). SCD-muunnos muuttaa hieman aivosähkökäyrien topografista jakaumaa, mutta se myös mahdollistaa tarkemman aktivaatioiden lähteiden paikallistamisen (Srinivasan, 2005). Hommet ym. tutkivat normaalisti lukevien ja dyslektisten lasten ja aikuisten vasteita tavujen muutoksiin. He havaitsivat, että kontrollilapsilla LDN ilmeni tavallisissa jännitepotentiaalikartoissa sentraalisena negatiivisuutena, kun taas dyslektikoilla frontaalinen negatiivisuus yhdistyi vasemman temporo-parietaalisen alueen positiivisuuteen. SCD-kartoissa kontrolleilla ilmeni kuitenkin sentro-temporaalinen ja fronto-temporaalinen vaste, joka oli vahvempi oikealla, kun taas dyslektikoilla huomattiin ylimääräisiä lähteitä vasemmalla aivopuoliskolla.

Tutkimuskysymykset

LDN-vastetta on tutkittu vielä melko vähän, ja sen merkitys on epäselvä. Sen on kuitenkin useimmiten esitetty edustavan puhtaan sensorisen erottelun sijaan korkeammantasoista kognitiivista prosessointia (ks. esim. Čeponienė ym., 2004), mahdollisesti jopa foneettista prosessointia (ks. esim. Barry ym., 2009; Korpilahti ym., 2001). Voikin olla, että LDN:n avulla pystyttäisiin selvittämään dyslektikoiden fonologista prosessointia. Jos dyslektikoiden ongelmat liittyvät juuri fonologisiin muistiedustuksiin (ks. esim. Godfrey ym., 1981; Serniclaes ym., 2004), sen luulisi näkyvän nimenomaan LDN-vasteessa. Aiemmin muistiedustuksia on dyslektikoilla tutkittu lähinnä behavioraalisilla menetelmillä (ks. esim. Godfrey ym., 1981; Kuhl, 1991; Kuhl, 1993; Serniclaes ym., 2004). Normaalisti lukevien äidinkielen muistiedustuksia on tutkittu melko paljon myös MMN-vasteella (ks. esim. Aaltonen ym., 1997; Näätänen ym., 1997; Winkler ym., 1999), jolloin on selvinnyt, että MMN on suurempi äidinkielen kuin vieraan kielen äänteisiin. LDN:n osalta vastaavaa tutkimusta ei tiedettävästi ole tehty.

Aiemmissä tutkimuksissa LDN on kuvattu yhtenä komponenttina ja se on paikallistettu aaltokäyrän huippukohdan perusteella. Aaltokäyrien muotojen ei voida kuitenkaan olettaa ilmentävän suoraan niiden taustalla vaikuttavia ERP-komponentteja. Onkin huomattava, että komponentti ja aaltomuodon heilahdus eivät ole sama asia, vaan aalto antaa ainoastaan viitteitä komponentista (Spencer, Dien, & Donchin, 1999). Aaltokäyrä koostuu useasta erilaisesta aivoprosessista, eikä aaltokäyränä ilmenevä LDN täten ole yhtenäinen. Tämän vuoksi olisi hyödyllistä selvittää LDN:n erilaisia alaprosesseja. Tässä tutkielmassa LDN onkin paikallistettu pääkomponenttianalyysin avulla, mikä mahdollistaa LDN:n eri osatekijöiden tarkastelemisen. Tämän lisäksi aineisto on muunnettu CSD-muotoon (ks. tutkimusmenetelmät), mikä mahdollistaa herätevasteiden lähteiden tarkemman paikallistamisen (Kayser & Tenke, 2006).

Tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään 8–11-vuotiaiden normaalisti lukevien ja dyslektisten suomalaisten koehenkilöiden LDN-vasteita prototyypiseen äidinkielen äänteeseen ja epäprototyypisiin äänteisiin. Tutkimus toteutettiin MMN-koeasetelmalla, jossa toistettuna ärsykkeenä käytettiin i-vokaalia ja poikkeavina ärsykkeinä esitettiin suomalais-unkarilaista (/y^{fh}/), saksalaista (/y^{gc}/) tai ranskalaista (/y^{fr}/) y-äännettä. Nämä eri y:n variaatiot käsitetään suomen kielessä saman kategorian sisäisiksi, sillä ne eivät poikkea formanttitaajuuksiltaan niin jyrkästi, että ne tulkittaisiin eri äänteiksi. Suomalais-unkarilainen y-äänne edustaa näistä äänteistä parhaiten prototyypistä suomalaista y-äännettä, kun taas ranskan y-äänne on prototyypistä kauimpana.

Tutkimusasetelmassa äänteiden erottelu tapahtui kategorioiden välillä, sillä toistettuna ärsykkeenä oli aina i-äänne, joka kuuluu eri kategoriaan kuin y-äänteen variantit. Oletuksena oli, että LDN-vaste on normaalisti lukevilla suurempi prototyyppiseen (/y^{fh}/) äidinkielen äänteeseen kuin epäprototyyppisempiin (/y^{ge}/, /y^{fr}/) äänteisiin, koska äidinkielen äänteestä on olemassa muistiedustus, joka aktivoituu, kun havaitaan poikkeava äänne (ks. esim. Näätänen ym., 1997). Sen sijaan epäprototyyppisiin äänteen variaatioihin reagoiminen on heikentynyt eikä niistä ole vahvoja muistiedustuksia (ks. Serniclaes ym., 2004). Eniten prototyyppisen äänteen vasteesta oletettiin poikkeavan /y^{fr}/-ärsykkeen vasteen, koska se on kauimpana prototyyppistä, jolloin sitä ei välttämättä assimiloida niin hyvin äidinkielen äänteeseen (ks. Best ym., 1995; Kuhl ym., 1992). /y^{ge}/-äänteen prosessointi saattaa sen sijaan muistuttaa enemmän /y^{fh}/-vastetta. Dyslektikoilla muistiedustuksia ei ole tai ne ovat heikkoja, mutta allofonisen teorian mukaan he säilyttävät herkkyyden äidinkielen kannalta epäolennaisille foneettisille variaatioille (Serniclaes ym., 2004). Näin ollen voidaan olettaa, että dyslektiset lukijat reagoivat vahvemmin epäprototyyppisiin y-äänteisiin kuin kontrollit. Prototyyppiseen äänteeseen vaste on sen sijaan luultavasti heikompi kuin kontrolleilla, joilla on muistiedustus äänteestä. Tutkimustehtävänäni onkin LDN-vasteen eri prosessointivaiheita tarkastelemalla selvittää, miten dyslektisten lasten muistiedustukset prototyyppisistä äidinkielen äänteistä eroavat normaalisti lukevien lasten muistiedustuksista.

TUTKIMUSMENETELMÄT

Neurodys-projekti

Pro gradu -työni on osa laajempaa Neurodys-projektia (<http://www.neurodys.com>), joka pyrki selvittämään dysleksian perusteita eri näkökulmista. Projekti jakautui kolmeen alaryhmään: geneettiseen, ympäristö- ja neurotieteelliseen tutkimukseen. Oma tutkimukseni kuuluu neurotieteen alla toimineeseen EEG-tutkimukseen. EEG-tutkimukseen osallistui yhteensä neljä yliopistoa: Jyväskylän yliopisto Suomesta (Paavo Leppänen, EEG-tutkimuksen koordinaattori), Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale Tolousesta Ranskasta (Jean-Francois Démonet), Ludwig-Maximilians-Universität München Saksasta (Gerd Schulte-Körne, Neurodys-projektin johtaja) ja Institute for Psychology of the Hungarian Academy of Sciences Budapestista Unkarista (Valéria Csépe). EEG-tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten dyslektikot havaitsevat ja prosessoivat puheäänä verrattuna normaalisti lukeviin.

Tutkittavat

Tutkittavien valinta. Aineistoni muodostui EEG-tutkimukseen osallistuneiden suomalaislasten mittauksista. Mukaan valittiin 108 (62 poikaa, 46 tyttöä) tutkimuksen kriteerit täyttävää lasta. Lapset olivat mittausten aikana kolmannella tai neljännellä luokalla (iän keskiarvo 10 v 2 kk, vaihteluväli 8 v 5 kk – 11 v 7 kk). Osallistumisen edellytyksenä oli normaali kuulo, eikä lapsella saanut olla neurologisia tai psykologisia häiriöitä eikä EEG:hen vaikuttavaa lääkitystä. Vaatimuksena oli myös, että lapset eivät olleet asuneet Ranskassa, Saksassa tai Unkarissa yli vuoden ajan tai altistuneet näiden maiden kielille esimerkiksi kotona. Taustatiedot kerättiin lasten vanhemmilta kyselylomakkeella. Lasten älykkyydosamäärä mitattiin WISC-3:n testillä Similarities, Block Design ja Digit Span, ja sen keskiarvo oli 108 (vaihtelu 79–141). Lasten kuulo tutkittiin Sa51-audiometrillä mittaamalla heidän kykyään kuulla ääniä läheltä normaalia kuulokynnystä (20 dB) puheäänien normaaleilta taajuuksilta (250, 500, 1000, 2000 ja 4000 Hz). Testauksessa noudatettiin ASHA:n (American Speech-Language-Hearing Association) suosituksia. Kokeen

perusteella kaikilla lapsilla oli normaali kuulo (vasemman korvan kuulokynnyksen keskiarvo oli 3,5 dB ja oikean 2,1 dB).

Jako ryhmiin. Neurodys-projektiin valittiin 50 normaalisti lukevaa ja 58 dyslektistä lasta. Jako normaalisti lukeviin ja dyslektisiin tehtiin lukutaitoa mittaavan standardoidun suomalaisen lukusujuvuuden testin Lukilassen (sanalista, 2 minuutin aikana oikein luetut sanat) tulosten perusteella. Testin standardipistemäärät vaihtelevat välillä 1–14, ja korkeampi arvosana viittaa parempaan lukutaitoon. Normaaliiväestössä standardipisteiden keskiarvo on 10 (± 3 sp). Jotta ryhmät voitiin erotella selkeämmin toisistaan, jätettiin analyysin ulkopuolelle lapset, jotka saivat tuloksen 7. Kontrolliryhmä muodostettiin normaalisti lukevista lapsista, joiden standardipistemäärä oli 8 tai suurempi ($sp \geq -0.85$ keskihajontaa). Dyslektisten ryhmä muodostettiin lapsista, joiden standardipistemäärä oli 6 tai vähemmän ($sp \leq -1.25$).

Dyslektisten ryhmä jaettiin vielä alaryhmiin, koska haluttiin erotella heikosti lukevat lapset, joiden ongelmat olivat lievempiä, lapsista, joilla oli vaikeammanasteisia lukemisen vaikeuksia. Lapset, joiden standardipistemäärä oli 5 tai 6 ($-1.74 \text{ kh} \leq sp \leq -1.25 \text{ kh}$), luokiteltiin heikosti lukeviksi, ja lapset, joiden pistemäärä oli välillä 1–4 ($sp \leq -1.74 \text{ kh}$), dyslektisiksi lukijoiksi. Ryhmien tilastolliset kuvaukset on esitetty tarkemmin taulukossa 1. Kaikki ryhmät olivat mukana pääkomponenttianalyysissä, mutta tilastolliset jatkoanalyysit tehtiin vain kontrolliryhmälle ja dyslektisten lukijoiden ryhmälle, sillä tutkimuksessa haluttiin vertailla selvästi heikompia lukijoita normaalisti lukeviin.

TAULUKKO 1. Osallistujien määrä, sukupuoli, ikä ja älykkyydosamäärä alaryhmittäin

Ryhmä	N	Pojat (N)	Tytöt (N)	Iän keskiarvo	Iän vaihteluväli	ÄO:n keskiarvo
Kontrollit	50	25	25	10 v 1 kk	8 v 7 kk – 11 v 1 kk	111
Heikosti lukevat	36	25	11	10 v 1 kk	8 v 11 kk – 11 v 7 kk	104
Dyslektiset lukijat	22	12	10	10 v 4 kk	8 v 5 kk – 11 v 7 kk	106

Ärsykkeet

Käytetyt ärsykkeet. Ärsykkeinä käytettiin Neurodys-projektin puheääniärsykejä (ks. Honbolygó in press). Kuviossa 1 on esitetty vokaalikartta kokeeseen valituista ärsykeäänteistä ja niitä ympäröivistä äänteistä. Tutkimuksen poikkeavina ärsykkeinä käytettiin kolmea y-vokaalia:

suomalais-unkarilainen /y/, ranskalainen /y/ ja saksalainen /y/ (tästä eteenpäin /y^{fh}/, /y^{fr}/ ja /y^{ge}/). Ärsyke /y^{fh}/ valittiin edustamaan sekä suomalaista että unkarilaista y-äännettä, koska suomalaiset ja unkarilaiset arvioivat saman äänteen vastaavan parhaiten kotimaansa y-äännettä. Standardiärsykkeenä käytettiin kaikille kokeen kielille yhteistä i-äännettä, joka muodostettiin keskiarvona neljän kielen tyypillisistä i-formanttitaajuuksista (tästä eteenpäin /i^{euro}/). Ärsykkeiden kesto oli 150 millisekuntia ja korkeus laski lineaarisesti ärsykkeen alusta 230 hertsin korkeudesta 200 hertsiin ärsykkeen lopussa (taajuuden keskiarvo 215 Hz).

Ärsykkeiden piirteet. Vokaalit muodostuvat useasta formantista eli ääntöväylän resonanssista, jotka vaihtelevat taajuudeltaan (Aaltonen ym., 1997). Vokaalit voidaan erottaa toisistaan jo kahden ensimmäisen formantin taajuuden muutoksista. Kokeen /y/-ärsykkeet luotiin vaihtelemalla näitä kahta taajuudeltaan matalinta eli ensimmäistä ja toista formanttia. Formantit 3, 4 ja 5 olivat sen sijaan taajuudeltaan samat kaikille /y/-ärsykkeille. Ärsykkeiden keskinäinen ero voidaan laskea euklidisen etäisyyden avulla sijoittamalla ärsykkeiden formantit vokaalikarttaan, jossa yksi formantti vastaa yhtä ulottuvuutta. Esimerkiksi kahden matalimman formantin voidaan ajatella muodostavan keskenään kaksiulotteisen avaruuden, jossa ensimmäisen formantin taajuudet sijaitsevat y-akselilla ja toisen formantin arvot x-akselilla. Tässä kaksiulotteisessa avaruudessa eri ärsykkeiden keskinäinen etäisyys voidaan laskea seuraavan kaavan avulla (x:n ja y:n arvoiksi sijoitetaan mitattavien ärsykkeiden taajuudet formanteilla 1 ja 2):

$$d_e = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}. \quad (\text{Deza \& Deza, 2009})$$

Taulukossa 2 on esitetty kunkin ärsykkeen viisi ensimmäistä formanttia sekä niiden etäisyydet /i^{euro}/- ja /y^{fh}/-ärsykkeestä. Kuviossa 1 on esitetty ärsykkeiden sijainnit vokaalikartassa. Kuten taulukosta ja kuviosta näkyy, /y^{fh}/ on etäisyydeltään lähempänä ärsykettä /y^{ge}/ kuin ärsykettä /y^{fr}/. /y^{fr}/ ja /y^{ge}/ ovat puolestaan lähempänä toisiaan kuin /y^{fh}/-ärsykettä. Ärsyke /y^{fr}/ on /y/-äänteistä lähinnä /i^{euro}/-ärsykettä.

TAULUKKO 2. Ärsykkeiden formanttitaajuudet (Hz) ja euklidiset etäisyydet

Ärsyke	Formantit					Etäisyys (Hz)	
	F1	F2	F3	F4	F5	/i ^{euro} /:sta	/y ^{fh} /:sta
/i ^{euro} /	335	2638	3500	4500	5500		754
/y ^{fh} /	274	1886	2400	3500	4500	754	
/y ^{fr} /	250	2086	2400	3500	4500	559	201
/y ^{ge} /	250	2018	2400	3500	4500	626	134

Taulukossa on esitetty ärsykkeiden viiden ensimmäisen formantin taajuudet hertseinä sekä niiden euklidinen etäisyys ärsykkeestä /i^{euro}/ ja /y^{fh}/.

ERP-aineiston keruu ja muokkaus

Aineiston keruu. ERP-aineisto kerättiin Jyväskylän yliopiston psykologian laitoksen EEG-laboratoriossa vuosina 2006–2009. Vasteet kerättiin 129-kanavaisella GSN-HydroCel-sensoriverkolla AG-AgCl-elektrodeilla ja tallennettiin Netstation 4.2.1 -ohjelmalla (<http://www.egi.com/netstation.html>). Ärsykkeet esitettiin noin 70 dBA:n voimakkuudella Sennheiser-kuulokkeilla käyttäen E-Prime- ohjelmaa. Oikea äänenvoimakkuus varmistettiin kalibroimalla äänet ennen koetta Brüel and Kjaer -desibelimitarilla (tyyppi 2235). Elektrodioiden oikea sijainti tarkistettiin verkon asettamisen jälkeen magneettikenttiin perustuvalla Polhemus Fastrak -laitteistolla. Referenssinä käytettiin CZ-kanavaa. Elektrodioiden impedanssit mitattiin ennen koetta sekä koetilanteiden välissä ja pyrittiin pitämään alle 50 k Ω :n. Kerättävää aineistoa tarkkailtiin kokeen aikana ja elektrodioiden ihokontaktia korjattiin tarvittaessa. Ylimääräisiä koesarjoja kerättiin, mikäli aineisto näytti häiriöiseltä. Otantataajuus oli 500 hertsiä, ja ylipäästösuodatin (high pass filter) asetettiin 0,1 hertsiin ja alipäästösuodatin (low pass filter) 200 hertsiin. Silmänliikkeitä tarkkailtiin silmien alle, päälle ja sivuille sijoitetulla elektrodilla.

Koehenkilöt katsoivat kokeen aikana itse valitsemiaan videoita, jotka esitettiin äänettöminä ja ilman tekstitystä. Heitä kehoitettiin jättämään esitetyt ärsykkeet huomiotta. Kokeen aikana pidettiin tarpeen vaatiessa lyhyitä taukoja sekä koetilanteiden välissä lyhyt ruokatauko. Koetilanne kesti kokonaisuudessaan noin kaksi ja puoli tuntia.

ERP-aineiston esikäsittely. Aineisto keskiarvoistettiin BESA 5.1.8 -ohjelmalla (<http://www.besa.de/>) ja suodatettiin digitaalisesti analysointivaiheessa asettamalla ylipäästösuodatin 0,3 hertsiin (roll-off 12 dB/oktaavi, suodatintyyppinä zero phase) ja alipäästösuodatin 30 hertsiin (roll-off 12 dB/oktaavi, suodatintyyppinä zero phase). Imusuodatin (notch filter) asetettiin 50 hertsiin (leveys 2,0 Hz:iin) sähköisten häiriöäänten vaimentamiseksi.

Aineistoa tarkasteltiin silmämääräisesti koehenkilöittäin ja hyvin häiriöiset kanavat merkittiin huonoiksi ja interpoloitiin keskiarvoistuksen jälkeen BESA:n spherical spline interpolation -metodin avulla (Perrin, Pernier, Bertrand, & Echalié, 1989). Silmänräpäytysten aiheuttamat heilahdukset huomioitiin korjaamalla ne yksilöllisesti kultakin koehenkilöltä BESA-ohjelman pääkomponenttianalyysillä (PCA). Tätä varten aineistosta etsittiin manuaalisesti silmänräpäytysten aiheuttamia heilahduksia (valittujen heilahdusten määrä vaihteli välillä 20–200 mallia), joita käytettiin pääkomponenttianalyysin malleina korjattaessa heilahduksia. Aineisto keskiarvoistettiin

aikaväliltä -50–600 millisekuntia ärsykkeen esittämisestä ja vertauskohtana (baseline) käytettiin ajankohtaa -50 millisekuntia. EEG-jaksot keskiarvoistettiin poikkeavilta ärsykkeiltä sekä juuri niitä edeltäviltä standardiärsykkeiltä. Valitsemalla devianttiärsykkeitä edeltävät standardiärsykkeet tasapainotettiin signaali–häiriö-suhdetta, sillä deviantti- ja standardiärsykeitä oli tällöin yhtä paljon. Lisäksi varmistuttiin siitä, että standardiärsykkeestä oli useamman toiston vuoksi ehtinyt muodostua muistijälki. Keskiarvoistuksen ulkopuolelle jätettiin sellaiset EEG-jaksot, joissa ilmeni yli ± 200 mikrovoltin jänniteaaltoja tai nopeita 115 mikrovoltia ylittäviä jännitemuutoksia. Standardiärsykkeistä kerättyjen EEG-jaksojen keskiarvo oli 119 hyväksyttyä aikasarjaa (vaihteluväli 79–158) ja devianttiärsykkeistä kerättyjen EEG-jaksojen keskiarvot $/y^{fh}/$ 119 (vaihteluväli 99–136), $/y^{fr}/$ 119 (vaihteluväli 94–129) ja $/y^{ge}/$ 120 (vaihteluväli 80–157).

Erotuskäyrät ja CSD-muunnos. Devianttiärsykkeen vasteet vähennettiin standardiärsykkeiden vasteista, jotta saatiin aikaan standardi- ja devianttiärsykkeen välistä eroa kuvaava erotuskäyrä. Kullekin lukutaitoryhmälle laskettiin omat standardi-, deviantti- ja erotuskäyrät yksilöittäin. Keskiarvoistettu aineisto muunnettiin BESA-ohjelmalla CSD-muotoon (current source density) CSD-Laplacian (10-10) -muunnoksella, jolloin 128 kanavan ERP:t inerpoloitiin 81 kanavalle. CSD-muunnosta käytetään Kayserin ja Tenken (2006) mukaan terävöittämään ERP-sähkökäyrien topografioita. Se estimoii kallon pinnan alaisen sähköpotentiaalinn päänahan pinnalta mitatuista vasteista (Kayser & Tenke, 2006). CSD vahvistaa pinnallisista lähteistä muodostuvaa signaalia vähentämällä kudoksen vaikutusta (Srinivasan, 2005). Perrin (1989) on kuvannut tarkemmin CSD-muunnoksen algoritmin. Tilastolliset analyysit tehtiin vain CSD-muotoisille erotuskäyriille SPSS:n versiolla 15. Tulokset-luvussa erotusvasteista on käytetty devianttiärsykkeiden nimityksiä ($/y^{fh}/$, $/y^{fr}/$ ja $/y^{ge}/$).

Aineiston analyysi

Pääkomponenttianalyysi (PCA). CSD-muunnetuille ERP-sähkökäyriille tehtiin temporaalinen pääkomponenttianalyysi, jotta saatiin paikallistettua aikaikkunat, joilla LDN-vasteen oletettiin ilmenevän. Dienin ja Frishkoffin (2005) mukaan temporaalinen pääkomponenttianalyysi yhdistelee ajan suhteen systemaattisesti vaihtelevaa aineistoa erillisiksi komponenteiksi, jolloin ajallisesti samanaikaiset, mutta topografialtaan vaihtelevat aktivaatiot yhdistyvät. Pääkomponenttianalyysi

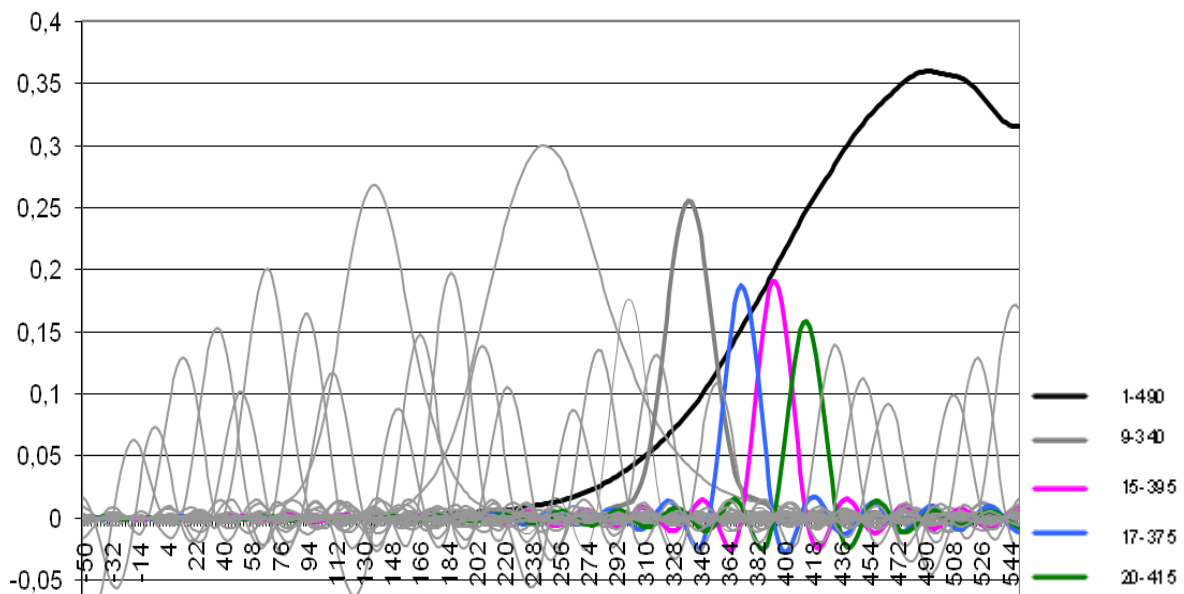
yhdistää siis muuttujat aineiston kovarianssia hyödyntäen lineaarisiksi kombinaatioiksi. Tutkimuksessa käytettiin PCA:ta, koska valintaa ei haluttu perustaa aaltomuotojen huippukohtien latensseihin, jotka voivat olla harhaanjohtavia (Luck, 2005). Tarkoituksena oli etsiä aineistosta aikapisteet, joilla esiintyi yhdenmukaista vaihtelua, ja käyttää niitä edustamaan ERP-komponentteja, joiden oletetaan ilmentävän tiettyjä aivoprosesseja (ks. Dien & Frishkoff, 2005). Tällainen analyysi on hyödyllistä erityisesti tutkittaessa LDN-vasteita, jotka ovat pitkäkestoisia (ks. Čeponienė ym., 2004) eivätkä välttämättä muodosta selvärajaisia huippua (ks. esim. Hämäläinen ym., 2008). LDN:n hajanaisuus näkyykin aineistosta (ks. kuvio 2).

PCA:ssa käytettiin muuttujina 325:tä aikapistettä (aikaväli -50–600 ms, otantataajuus 500 Hz) ja havaintoyksikköinä 88 290:tä keskiarvoistettua erotuskäyrää (109 koehenkilöä x 10 ärsyketyyppeä x 81 elektrodi¹). PCA:n tuottamista ratkaisuista valittiin 31 ensimmäistä komponenttia, jotka yhdessä selittivät 99 prosenttia aineiston varianssista. Valitut komponentit rotatoitiin käyttämällä promax-rotatiota. Promax-rotointi valittiin, koska se sallii komponenttien vapaan korreloinnin eikä siten pakota keskenään korreloivia muuttujia samaan komponenttiin toisin kuin esimerkiksi varimax-rotatio. Vertailun vuoksi tehtiin myös varimax-rotatio ja havaittiin, että promax-rotatio erotteli paremmin komponentteja toisistaan. Rotatoidujen aineistojen topografiaa verrattaessa huomattiin myös, että promax-rotatoitu aineisto vastasi paremmin ERP:n jännitepotentiaaleja, kun taas varimax näytti tuottavan aineistoon ylimääräisiä latauksia. Varimax-rotatio pyrkii minimoimaan faktorien päällekkäisyyttä (Kayser & Tenke, 2003) ja tuottaa faktoriratkaisuja, jotka edustavat faktorilatausten ääripäitä eli ovat lähellä nollaa olevia tai suuria latauksia (Dien & Frishkoff, 2005). Promax-rotatio saattaakin sopia paremmin fysiologisen ERP-aineiston käsittelyyn, sillä ERP-aineiston komponentit todennäköisesti korreloivat keskenään (ks. esim. Dien, Spencer & Donchin, 2003). Pääkomponenttianalyysin tuottamia faktoripistemääriä käytettiin aineistona tilastoanalyysissä. Faktoripistemäärä kuvaa kunkin yksittäisen havainnon latautumista tietylle komponentille. Faktoripistemäärät kuvastavat, miten koehenkilöiden, ärsykkeiden ja kanavan sijainti vaihtelevat yhdessä (Dien & Frishkoff, 2005).

Pääkomponenttianalyysin tuottamista komponenteista valittiin viisi komponenttia aikaikkunalta, jolla LDN-vasteen on raportoitu esiintyvän (ks. esim. Alonso-Bua ym., 2005; Korpilahti ym., 2001). Valinta tehtiin vertaamalla komponenttien topografisia jakaumia ja

¹ Huom! Pääkomponenttianalyysissä oli mukana ylimääräinen koehenkilö, joka poistettiin jatkoanalyysistä alaryhmien jaottelun jälkeen, koska koehenkilön Lukilassesta saama pistemäärä oli 7. Ärsyketyypeissä olivat mukana puheääniärsykkeiden lisäksi myös ei-puheäänteiset ärsykkeet sekä eq-tilanteet (koasetelmat, joissa esiintyi saman verran deviantti- ja standardiärsykeitä), joita ei ole raportoitu tässä tutkielmassa.

huippujen latensseja yksittäisten koehenkilöiden aineistosta keskiarvoistettuun ERP-jännitepotentiaaliaineistoon (field potential) sekä CSD-muunnettuun aineistoon. Näin voitiin varmistaa, että myös jännitepotentiaaliaineistossa syntyi vaihteluita samoilla aikaikkunoilla, joille valittujen komponenttien huiput osuivat. Vain komponentit, jotka ylittivät 0,15 mikrovoltin rajan, valittiin jatkotarkasteluun. Aikaisin komponentti ilmeni aikaikkunalla 340 millisekuntia ja myöhäisin 490 millisekuntia. Suuri myöhäinen komponentti vaikutti myös edustavan todellista aivotoimintaa, sillä ERP-jännitepotentiaalikäyrissä ilmeni vielä LDN:n kaltaista vaihtelua tällä aikaikkunalla. PCA:ssa erottui 0,15 mikrovoltin rajan ylittävä komponentti myös noin 300 millisekunnin kohdalla, mutta se jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle, koska aktivaatio oli erotuskäyrien perusteella heikkoa tällä aikaikkunalla. Valitut LDN-komponentit on esitetty kuviossa 2. Komponentit nimettiin esiintymisjärjestyksen ja huippukohdan latenssin mukaan: 9–340, 17–375, 15–395, 20–415 ja 1–490.



KUVIO 2. Temporaaalisen pääkomponenttianalyysin tuottamien komponenttien faktorilataukset. X-akselilla on esitetty aika millisekunteina ja y-akselilla lataukset mikrovoltteina. Jatkotarkasteluun valitut komponentit on korostettu värillä.

Aivoalueiden valinnat. Tilastollisia analyysejä varten CSD-muunnoksen tuottamasta 81 kanavasta valittiin vain kanavat, joilla havaittiin selkeintä aktivaatiota. Kanavavalinnat tehtiin topografisen tarkastelun ja tilastollisten testien perusteella kontrolliryhmän mukaan. Tarkasteltavat aivoalueet valittiin kontrolliryhmän mukaan, koska näiden ajateltiin edustavan normaalisti lukevan lapsen aivotoimintaa, johon muita ryhmiä haluttiin verrata. CSD-muunnetun erotusvasteen eroavuutta nollasta eri kanavilla testattiin riippumattoman otannan t-testillä. Topografista tarkastelua varten faktoripistemäärät aggregoitiin eli laskettiin niiden keskiarvot kullekin ryhmälle, ärsykkeelle ja

komponentille, minkä jälkeen ne tuotiin BESA-ohjelmalle. T-testituloksia verrattiin faktoripistemääristä aggregoituihin kuviin. T-testein havaitut tilastolliset merkitsevyydet vastasivat pitkälti kuvista havaittuja kanavien aktivaatioita. Joitakin kuvien perusteella aktiivisia kanavia jätettiin kuitenkin pois, koska ne eivät olleet tilastollisesti merkitseviä, ja vastaavasti joitakin merkitseviä kanavia ei valittu, koska ne näyttivät kuvien perusteella muodostavan yksittäisiä aktivaatioalueita ja ilmenivät satunnaisesti vain joillakin komponenteilla. Lisäksi joitakin kanavia, jotka eivät kuvissa nousseet esiin, otettiin mukaan tarkasteluun, koska ne erosivat merkitsevästi nollasta ja vaihtelivat eri tavalla ärsykkeiden välillä kuvastaen siten kielten vasteiden välisiä eroja. Kuvien perusteella näytti siltä, että kanavat muodostivat ryppäitä, joilla oli keskenään samantapainen aktivaatio. Tämän vuoksi kullekin komponentille valittiin erilliset kanava-alueet, jotka otettiin mukaan tilastollisiin analyyseihin. Komponenttien kanavat ja t-testien tulokset on kuvattu tulososassa. Kanavaryppäät on nimetty aivoalueen ja vasteen polariteetin mukaan kontrolliryhmän /y^{fh}/-tilanteen perusteella (ks. esim. taulukko 3).

Tilastolliset analyysit. Tilastolliset analyysit tehtiin kontrolliryhmän ja dyslektisten lukijoiden välillä. Heikosti lukevat jätettiin analyysien ulkopuolelle, koska haluttiin tarkastella kontrolliryhmän ja selvästi dyslektisten lukijoiden välisiä eroja. Näin varmistuttiin, että normaalisti lukevia verrattiin lapsiin, joilla oli selviä ja vaikeammanasteisia lukemisen ongelmia. Ryhmien välisiä eroja testattiin MANOVAn toistettujen mittausten menetelmällä. Tarkastelussa huomioitiin vain kieleen, hemisfääriin (hem) ja ryhmään liittyvät yhdys- ja päävaikutukset. Kanavan sijaintiin (ryppään sisällä) liittyvät vaikutukset jätettiin huomiotta, koska eri aivoalueita haluttiin vertailla yhtenäisinä kanavaryppäinä. Kanavaryppäät on nimetty kontrolliryhmän /y^{fh}/-erotusvasteessa aktivoituvan aivoalueen ja sen polariteetin mukaan. Analyysit tehtiin aina kullekin komponentille ja komponenttien kanavaryppäille erikseen.

Ärsykkeen /y^{fh}/ erotusvasteelle tehtiin erikseen MANOVA-analyysi, koska haluttiin selvittää, miten ryhmät erosivat natiivin ärsykkeen prosessoinnissa. Ryhmäeroja tarkasteltiin siis ensin erikseen /y^{fh}/-vasteen MANOVA-vertailussa (hem (2 = vasen, oikea) x lokaatio x ryhmä (2 = kontrolliryhmä, dyslektiset lukijat)). Mikäli merkitseviä hem x ryhmä -yhdysvaikutuksia löytyi, verrattiin ryhmiä kummallakin hemisfäärillä erikseen, jotta saatiin selville, kummalla hemisfäärillä ryhmät erosivat. Tämän lisäksi ryhmien eroa tarkasteltiin kaikkien kielten välillä MANOVA-vertailussa (kieli (/y^{fh}/ /y^{fr}/ /y^{ge}/) x hem (2) x lokaatio x ryhmä (2)). Jos merkitseviä kieli x hem x ryhmä -yhdysvaikutuksia tai kieli x ryhmä -yhdysvaikutuksia ilmeni, selvitettiin erityisillä kontrastivertailuilla tarkemmin, minkä kielen erotusvasteet erosivat /y^{fh}/-vasteesta. Jatkoanalyysit tehtiin vain niiden kieliparien vasteille, jotka erosivat merkitsevästi keskenään. Mikäli eroa ei

pystytty paikallistamaan tiettyyn kontrastiin, tehtiin jatkoanalyysit vertailemalla sekä /y^{fr}/- että /y^{ge}/- vastetta /yth/-vasteeseen. Niiden kieliparien osalta, joissa kontrastivertailu paljasti merkitseviä kieli x ryhmä- tai hem x ryhmä -yhdysvaikutuksia, selvitettiin vielä ryhmien eroa kussakin kielessä tai hemisfäärillä erikseen. Merkitseviä kieli x hem x ryhmä -yhdysvaikutuksia puolestaan tarkasteltiin vertaamalla ryhmiä ja kieliä ensin kummallakin hemisfäärillä erikseen. Niillä hemisfääreillä, joilla ilmeni merkitseviä kieli x ryhmä -yhdysvaikutuksia, testattiin vielä ryhmien eroa kussakin verrattavassa kielessä. Näin saatiin selville, millä hemisfäärillä ryhmät erosivat ja miten ryhmät erosivat kunkin kielen vasteissa kyseisellä hemisfäärillä. MANOVA-analyysit tehtiin kullekin kanavaryypäälle erikseen. Analyysit tehtiin samalla tavalla kaikille komponenteille.

Ryhmien välisten erojen lisäksi testattiin ryhmien sisäisellä vertailulla, miten kielten vasteet erosivat toisistaan. Ryhmien sisäisiä eroja testattiin MANOVA-vertailulla (kieli (3) x hem (2) x lokaatio), joka tehtiin kullekin kanavaryypäälle erikseen. Mikäli merkitseviä kieli x hem -yhdysvaikutuksia havaittiin, tarkasteltiin kielten vasteiden välisiä eroja ensin kummallakin hemisfäärillä erikseen ja sitten hemisfäärien välisiä eroja kussakin vertailtavassa kielessä erikseen. Vain niiden kielten vasteita tarkasteltiin, joiden havaittiin eroavan kontrastivertailussa.

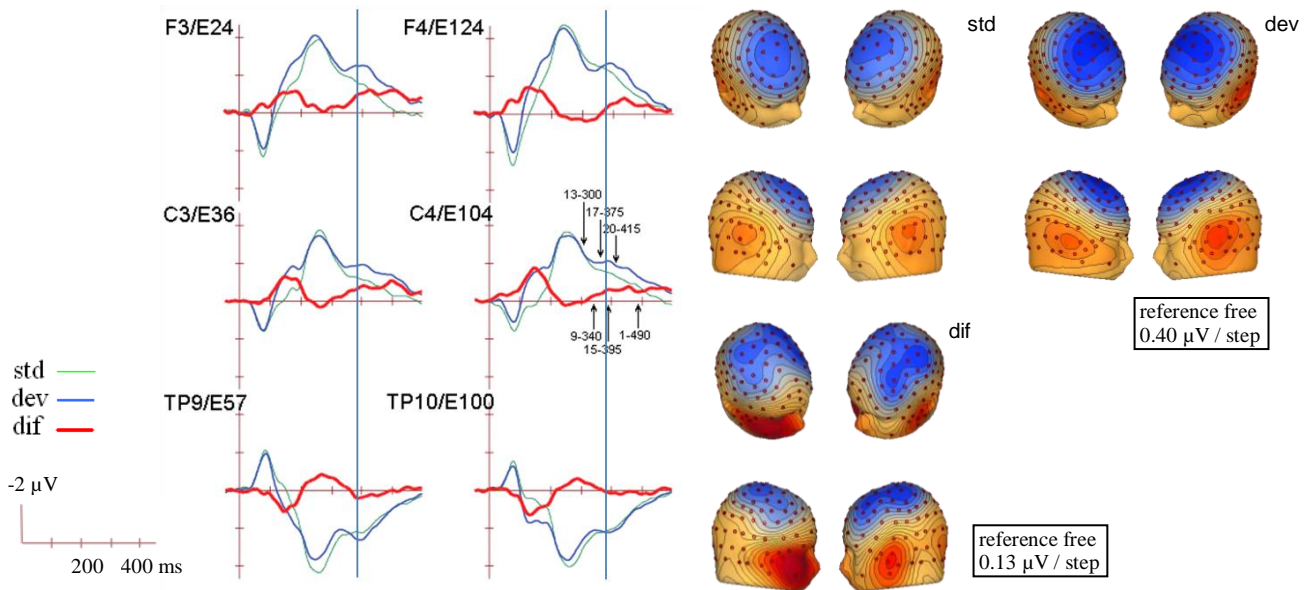
Faktoripisteiden odotettiin jakautuvan normaalisti, koska aineisto oli fysiologista. Analyysien alfataso oli 0.05.

TULOKSET

ERP-sähkökäyrät

Kontrolliryhmän ERP-jännitepotentiaaliaineiston (field potential) keskiarvoistetut standardi- ja devianttiärsykkeet synnyttivät P1- ja N1-vasteet noin 100 millisekuntia ärsykkeen esittämisen jälkeen (ks. kuvio 3). Vasteet alkoivat erota toisistaan noin 140 millisekunnin kohdalla, jolloin /y^{fn}/-äänteen devianttikäyrässä oli havaittavissa miss match negativity -vaste (MMN), kun taas standardikäyrässä negatiivinen piikki kohosi hitaammin muodostaen N250-vasteen. MMN peittyi noin 200 millisekunnin kohdalla N250-vasteen huipun alle. Late discriminative negativity -vaste (LDN) oli havaittavissa noin 340 millisekuntia ärsykkeen esittämisen jälkeen, kun käyrät alkoivat jälleen hieman erota devianttikäyrän kääntyessä nousuun. Negatiivisuus jatkui noin 490 millisekuntiin saakka. LDN oli selkein frontaali- ja sentraalikanavilla ja erottui hyvin varsinkin vasemmalla hemisfäärillä. Mastoideilla (TP9/TP10) käyrät eivät juuri eronneet toisistaan.

Erotuskäyrä ilmentää standardi- ja devianttivasteiden välistä eroa. Erotuskäyrän amplitudi on nolla, kun standardi ja deviantti eivät eroa toisistaan. Kontrolliryhmän erotuskäyrä osoitti, että LDN-aktivaatio oli lähellä nollaa 340 millisekunnin kohdalla, ja negatiivista aktivaatiota olikin tällä aikaikkunalla havaittavissa lähinnä parietaalikanavilla. Se kuitenkin levisi kohti frontaalialueita varsinkin vasemmalla hemisfäärillä 375 millisekunnin kohdalla ja vahvistui edelleen frontaalialueilla 395 millisekunnin kohdalla. Aikaikkunalla 415 millisekuntia negatiivista aktivaatiota näkyi frontaali- ja sentraalialueilla molemmilla hemisfäreillä, ja erotuskäyrän korkein amplitudi ilmeni tällä aikaikkunalla F3-kanavalla. Negatiivisuus säilyi 490 millisekuntiin saakka ja alkoi sitten hiipua. Erotuskäyrässä ilmeni toinen korkea piikki frontaali- ja sentraalikanavilla vasemmalla puolella noin 500 millisekuntia ärsykkeen esittämisestä. Topografiakuvista ilmeni, että LDN näkyi fronto-sentraalisena negatiivisuutena ja temporaalisena positiivisuutena 395 millisekunnin kohdalla.



KUVIO 3. Kontrolliryhmän (N=50) keskiarvoistetut standardi-, deviantti- ja erotuskäyrät frontosentraalisilta kanavilta (F3, F4, C3, C4) ja Sylvian uurteen alapuolelta mastoideilta (TP9/TP10) sekä ERP-vasteiden jännitepotentiaalain topografiakuva ajanhetkeltä 395 ms.

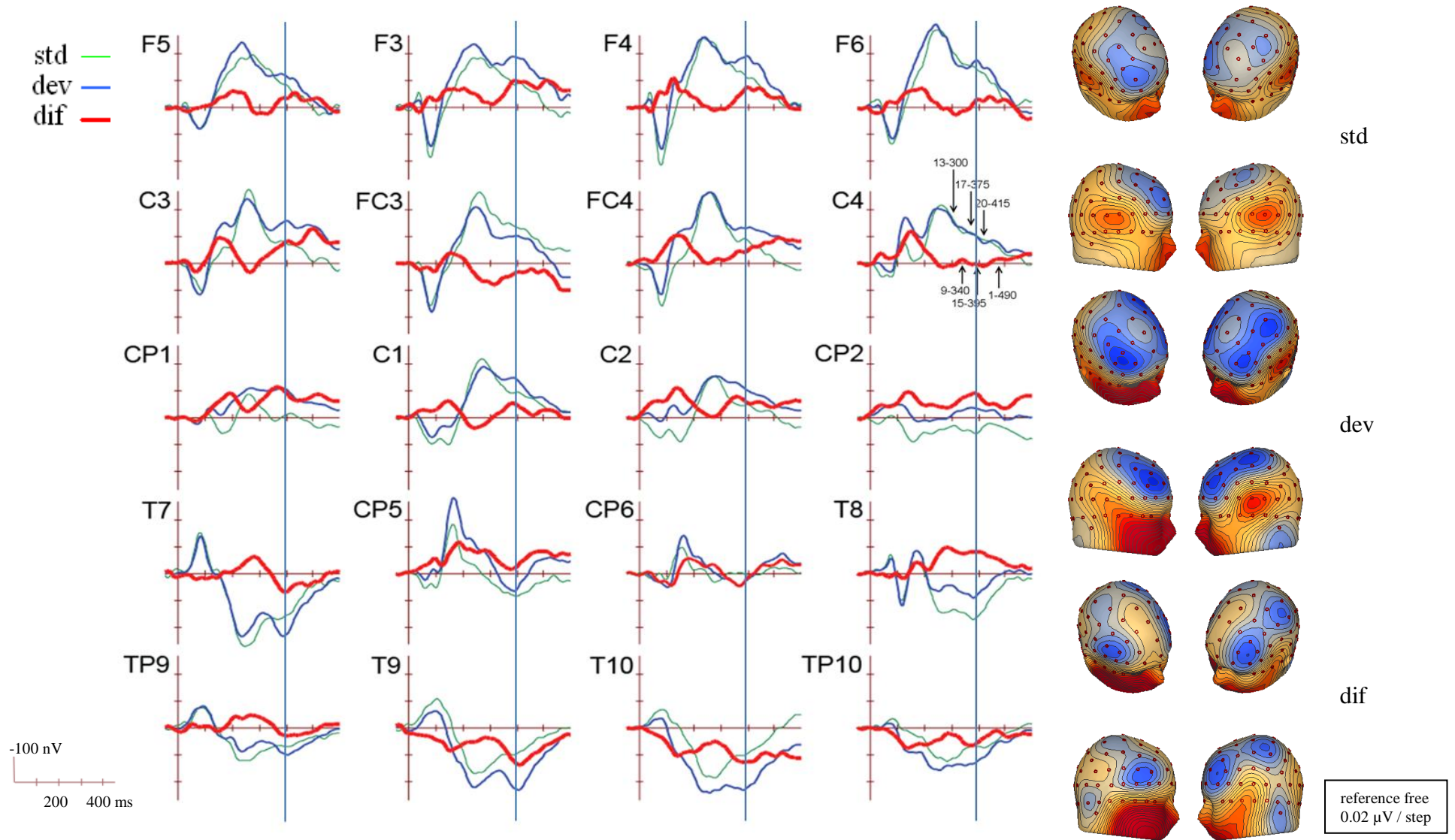
Huom! Erotuskäyrän topografiakuvassa on käytetty suurempaa vahvistusta (0,13 μV). std = standardi, dev = deviantti, dif = erotusvaste

CSD-muunnetun aineiston sähkökäyrät

CSD-muunnos tiivistä aineistoa ja keskitti aktivaatiot tarkemmin rajatulle alueelle (ks. kuvio 4). Frontaalikanavat muistuttivat CSD-muunnetuissa käyrissä paljon ERP-jännitepotentiaaliaineistoa, mutta muunnos näytti tiivistäneen aineistoon myös jonkin verran häiriöitä. Sentraalikanavilla näkyi enemmän muutosta, ja esimerkiksi C3-kanavan huiput olivat terävämpiä kuin ERP-jännitepotentiaaliaineistossa. C4-kanavalla standardin ja deviantin vasteet eivät sen sijaan eronneet toisistaan juuri lainkaan LDN:n aikaikkunalla toisin kuin jännitepotentiaalikäyrissä. Muilla sentraalikanavilla käyrät kuitenkin erosivat enemmän. LDN ilmenikin vahvana negatiivisena aktivaationa frontaalikanavilla ja vasemmanpuoleisilla sentraalikanavilla. CSD-muunnos paljasti myös enemmän eroa mastoideilla (TP9/TP10) kuin jännitepotentiaaliaineisto. LDN:n amplitudi olikin korkein temporaalikanavilla, joissa vaste näkyi positiivisena piikkinä deviantti- ja erotuskäyrissä noin 400 millisekunnin kohdalla. Erotusvasteen topografiakuvassa negatiivinen ja positiivinen aktivaatio muodostivat dipolin temporaalialueella oikealla hemisfäärillä. Vasemmalla puolella negatiivinen aktivaatio keskittyi enemmän sentraalialueelle ja temporaalialueen positiivinen aktivaatio oli heikompaa.

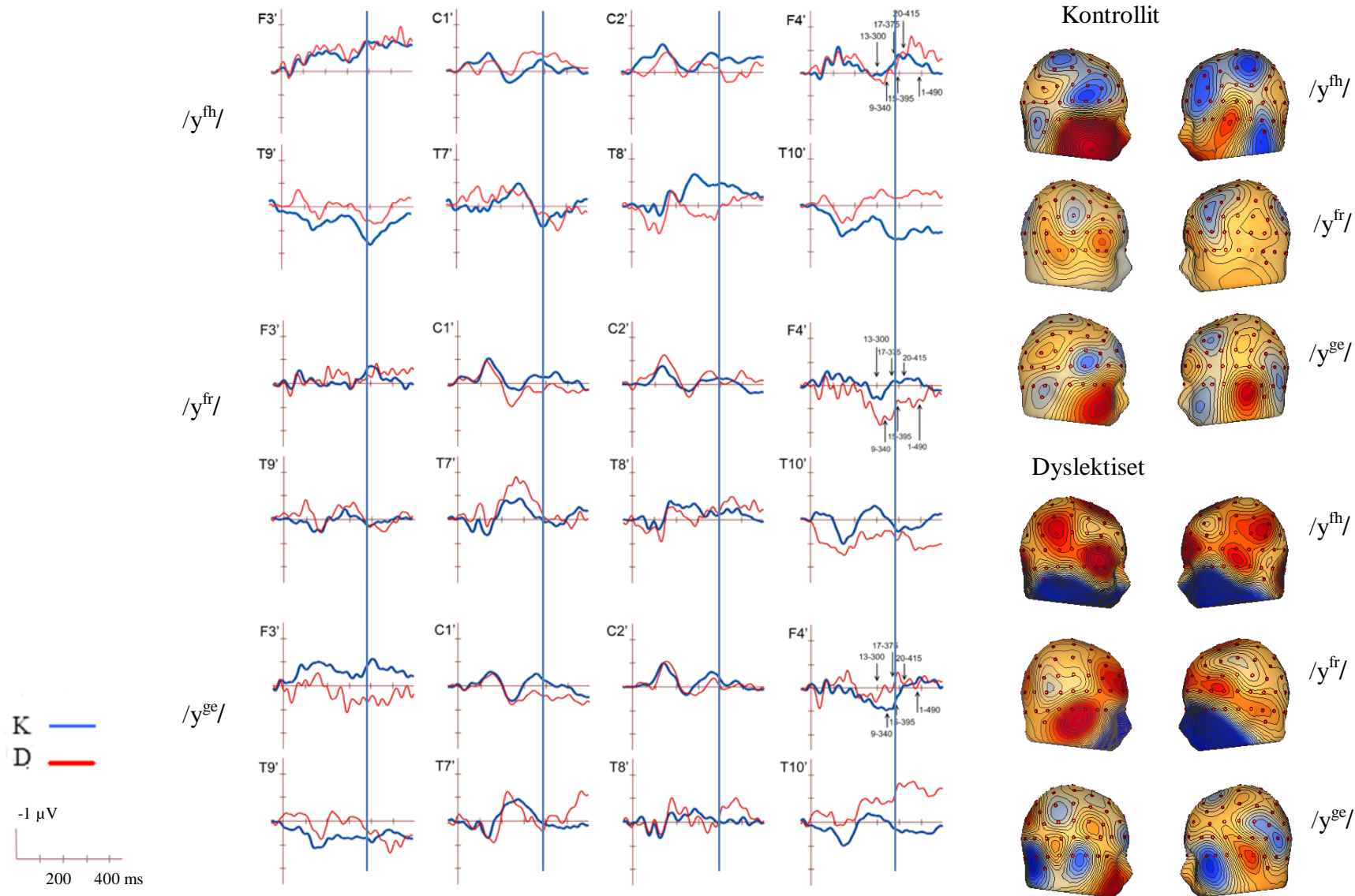
Ryhmäerot CSD-muunnetun aineiston sähkökäyrissä

Kontrolliryhmän LDN ilmeni erotuskäyrissä selkeimmin /y^{fh}/-äänteen vasteessa, jossa erottui vahvoja aktivaatioita frontaali- ja temporaalikanavilla (ks. kuvio 5). Muiden äänteiden vasteet olivat heikkoja. Dyslektisillä lukijoilla /y^{fh}/-vasteen aktivaatio näkyi lähinnä frontaalikanavilla ja se oli F4-kanavalla aikaikkunalta 415 millisekuntia alkaen jopa kontrolleja suurempi, kun taas temporaalisesti vasteet olivat kontrolleja pienempiä. Dyslektisillä lukijoilla erottui yhtä vahvoja vasteita /y^{fr}/-äänteeseen kuin /y^{fh}/-äänteeseenkin oikean hemisfäärin frontaali- ja temporaalikanavilla, mutta aktivaatiot olivat negatiivisia /y^{fh}/-äänteeseen, kun taas positiivisia /y^{fr}/-äänteeseen. /y^{ge}/-äänteen vasteet olivat dyslektisillä lukijoilla suuria erityisesti temporaalikanavilla molemmilla hemisfääreillä. Tämän ryhmän korkein aktivaatio syntyi /y^{ge}/-äänteeseen kanavalla T10, mutta vaste oli negatiivinen toisin kuin kontrolliryhmällä, jolla temporaalivasteet olivat positiivisia. Kontrolleilla /y^{ge}/-äänteeseen ilmeni aktivaatiota lähinnä F3-kanavalla ja se oli negatiivista.



KUVIO 4. Kontrolliryhmän (N = 50) CSD-muunnetun keskiarvoistetun aineiston standardi-, deviantti- ja erotuskäyrät sekä topografiakuvat (aikaikkuna 395 ms). PCA-komponentit on merkitty nuolilla.

Huom. std = standardi, dev = deviantti, dif = erotuskäyrä



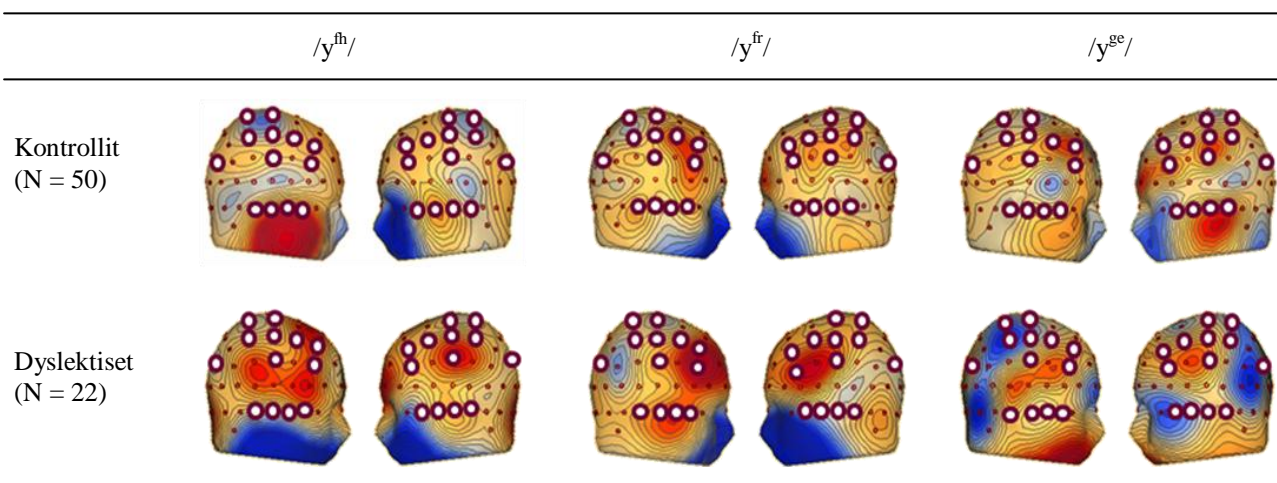
KUVIO 5. CSD-muunnetun aineiston erotuskäyrät kontrolli- ja dyslektisten lukijoiden ryhmässä ärsykeittään sekä erotusvasteen topografiakuvat aikaikkunalta 395 ms.

huom. K = Kontrollit (N = 50), D = Dyslektiset lukijat (N = 22)

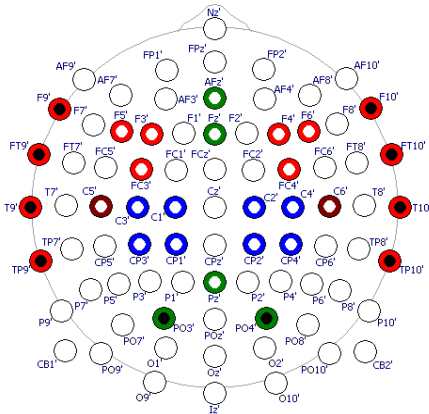
Komponentti 9-340

Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat. Aikaikkunalla 340 millisekuntia kontroleilla ilmeni /y^{fh}/-äänteen erotusvasteessa temporaalialueella positiivisen ja negatiivisen vasteen muodostama dipoli oikealla hemisfäärillä (ks. kuvio 6). Vasemmalla hemisfäärillä ei ilmennyt vastaavanlaista laajaa positiivista aktivaatiota temporaalialueella, mutta negatiivinen vaste näkyi myös vasemmalla. Sentraalialueilla näkyi vahvaa negatiivista aktivaatiota kanavilla CP1 ja C2 (ks. taulukko 3). /y^{fr}/-vasteessa havaittiin lähinnä positiivista aktivaatiota oikealla frontaalialueella, mutta muuten aktivaatiot olivat heikkoja. /y^{ge}/-vasteessa erottui positiivista aktivaatiota frontaalisesti ja vasemmalla hemisfäärillä myös positiivista temporaalista aktivaatiota.

Dyslektisillä lukijoilla näytti kuvien perusteella syntyvän /y^{fh}/-äänteeseen kontrollien vasteista poikkeavaa positiivista aktivaatiota frontaalialueilla ja ylempänä temporaalialueilla. Negatiivista aktivaatiota temporaalialueilla ilmeni lähinnä testattujen kanavien alapuolella. T-testit osoittivat kuitenkin, että LDN-vastetta ei dyslektisillä lukijoilla ilmennyt verratuilla kanavilla /y^{fh}/-vasteessa, sillä minkään kanavan aktivaatio ei eronnut merkitsevästi nolasta ($p > .05$). /y^{fr}/-vasteessa näkyi vahvaa positiivista aktivaatiota frontaalialueilla molemmilla hemisfäreillä, mutta oikealla puolella erottui myös vahva positiivinen vaste temporaalialueella. Vasteet näyttivät vahvemmilta kuin kontrolliryhmällä. /y^{ge}/-vasteessa erottui positiivista aktivaatiota frontaalisesti kuten kontroleillakin, mutta sentraali- ja parietaalialueilla havaitut vahvat negatiiviset aktivaatiot poikkesivat huomattavasti kontroleista.



KUVIO 6. Pääkomponenttianalyysin tuottamien faktoripistemäärien keskiarvoistetut topografiset jakaumat CSD-muunnetuille erotusvasteille komponentilla 9-340 kuvattuna kunkin äänteen sekä ryhmän osalta.



KUVIO 7. Komponentin 9-340 valitut kanavat. Kanavaryppäät on korostettu eri väreillä.

TAULUKKO 3. Komponentin 9-340 valittujen kanavien CSD-erotuskäyrien eroavuus nolasta kontrolliryhmässä testattuna yksisuuntaisella t-testillä

Komp. 9-340	Kieli Kanava	/y ^{fh} /		/y ^{fr} /		/y ^{ge} /	
		V	O	V	O	V	O
<i>Frontaalinen positiivisuus</i>	F3/F4						**
	F5/F6				*	*	
	FC3/FC4				**		*
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	F9/F10		*				
	FT9/FT10	**	*				
	T9/T10						
	TP9/TP10						*
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	C1/C2		**			**	
	C3/C4						
	CP1/CP2	***					
	CP3/CP4						
<i>Sentraalinen positiivisuus</i>	C5/C6					**	
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	PO3/PO4			*	*		
<i>Keskilinjän positiivisuus</i>	AFZ						*
	FZ	*					
	PZ	**					

huom! * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä. *Frontaalisessa positiivisuudessa* (ks. taulukko 3) ei havaittu ryhmäeroja. *Temporaalisessa positiivisuudessa* /y^{fh}/-vasteen vertailussa (hem (2) × lokaatio (4) × ryhmä (2)) ilmeni ryhmän päävaikutus (ks. taulukko 4). Vaste oli suurempi kontrolleilla kuin dyslektisillä lukijoilla. Äänteiden vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio (4) × ryhmä (2)) ilmeni tällä alueella myös kieli × ryhmä -yhdysvaikutus, joka oli merkitsevä vain /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-vasteiden välillä (ks. taulukko 5). *Sentraalisessa negatiivisuudessa* ja *sentraalisessa positiivisuudessa* ei havaittu ryhmäeroja. *Parietaalisessa positiivisuudessa* ilmeni /y^{fh}/-vasteen vertailussa ryhmän päävaikutus, joka syntyi siitä, että kontrolleilla oli suuremmat vasteet kuin dyslektisillä lukijoilla (ks. taulukko 4). MANOVassa ilmeni tällä alueella myös kieli × ryhmä -yhdysvaikutus (F(2,69) = 3,60, p < .05), joka oli merkitsevä molempien kieliparien välillä (ks. Taulukko 5). *Keskilinjän positiivisuudessa* paljastui kieli × ryhmä -yhdysvaikutus /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä (ks. taulukko 5). Ryhmät eivät eronneet merkitsevästi toisistaan kummankaan kielen vastetta erikseen vertailtaessa.

TAULUKKO 4. Merkitsevät ryhmäerot /y^{fh}/-vasteessa komponentilla 9-340

Alue	Yhteys	Jatkoanalyysit	
		Suunta	F
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	ryhmä	K > D	4,96*
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	ryhmä	K > D	4,70*

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001, df: K vs D = 1,70

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), df = vapausaste

TAULUKKO 5. Ryhmien ja kielten väliset vertailut komponentilla 9-340

Alue	Yhteys	Vertailu		Jatkoanalyysi	
		Kontrasti	F(df = 2,105)	suunta	F
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	kieli × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{fr} /	4,48*	K > D (/y ^{fh} /)	4,96*
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	kieli × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{fr} /	6,22*	K > D (/y ^{fh} /)	4,70*
	kieli × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	4,89*	K > D (/y ^{fh} /)	4,70*
<i>Keskilinjän positiivisuus</i>	kieli × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	6,28*	ns.	ns.

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001 df: K vs D = 1,70

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), df = vapausaste, ns. = nonsignificant (ei-merkitsevä)

Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä. Ryhmien sisäisessä vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio) eroja ilmeni vain kontrolliryhmällä (ks. taulukko 6). *Frontaalissa positiivisuudessa* ilmeni MANOVAssa merkitsevä hemisfäärin päävaikutus (F(1,49) = 4,11, p < .05), joka syntyi siitä, että positiivinen aktivaatio oli vahvempi oikealla kuin vasemmalla yli kaikkien kielten. *Temporaalisessa positiivisuudessa* ilmeni MANOVAssa merkitsevä kielen päävaikutus (F(2,48) = 5,06, p < .05). Ero oli merkitsevä vain /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-vasteiden välillä ja näkyi suurempana positiivisuutena /y^{fh}/-äänteeseen. Tällä alueella ilmeni myös /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä kieli × hem -yhdysvaikutus. Kielten vasteiden välinen ero oli merkitsevä vain oikealla hemisfäärillä ja näkyi suurempana vasteena /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen. *Sentraalisessa negatiivisuudessa* havaittiin kielen päävaikutus /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä. Äänten /y^{fh}/-vaste oli negatiivisempi kuin /y^{ge}/-äänten vaste. *Parietaalisessa positiivisuudessa* havaittiin kielen päävaikutus /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-äänteiden välillä, mikä näkyi suurempana aktivaationa /y^{fh}/-vasteessa. *Keskilinjän positiivisuudessa* näkyi MANOVAssa merkitsevä kielen päävaikutus (F(2,48) = 6,76, p < .01), joka syntyi siitä, että /y^{fh}/-vaste oli positiivisempi kuin /y^{ge}/-vaste.

TAULUKKO 6. Ryhmän sisäiset vertailut komponentilla 9-340

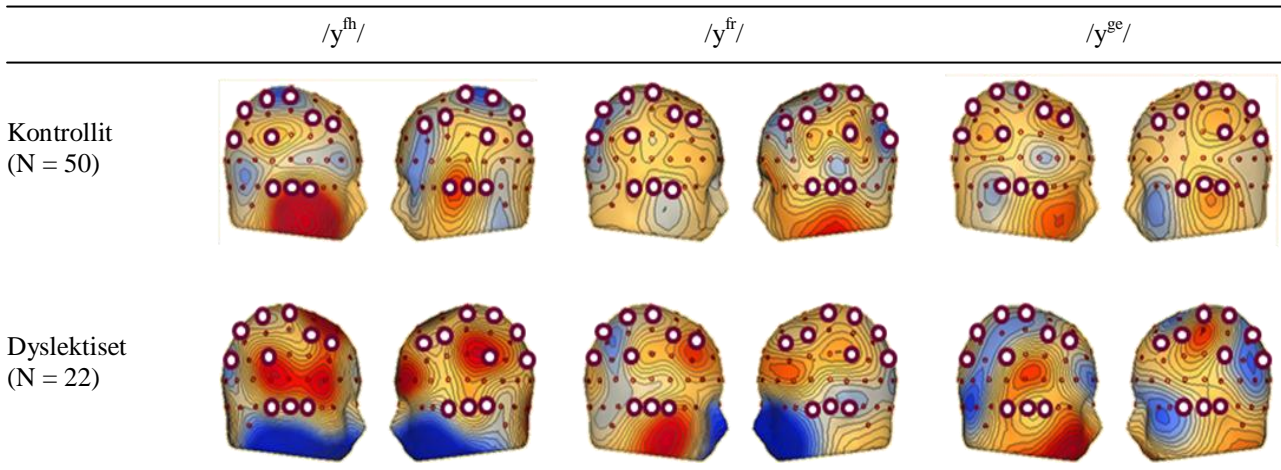
Alue	Yhteys	Vertailut			Jatkoanalyysi	
		ryhmä	Kontrasti	F (df = 2,105)	suunta	F
<i>Frontaalinen positiivisuus</i>	hem	K	V < O	4,11*	-	-
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y th / > /y ^{fr} /	10,31**	-	-
	kieli × hem	K	/y th / vs /y ^{ge} /	4,71*	O: /y th / > /y ^{ge} /	7,16*
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	kieli	K	/y th / > /y ^{ge} /	4,43*	-	-
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y th / > /y ^{fr} /	6,11*	-	-
<i>Keskilinjän positiivisuus</i>	kieli	K	/y th / > /y ^{ge} /	11,92**	-	-

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001, df: K = 1,49,

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, O = oikea hemisfääri, V = vasen hemisfääri, df = vapausaste

Komponentti 17-375

Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat. Aikaikkunalla 375 millisekuntia vasteet säilyivät melko samanlaisina edelliseen aikaikkunaan nähden (ks. kuvio 8). Kontrolleilla /yth/-äänteeseen muodostui nyt kuitenkin negatiivista aktivaatiota myös frontaalisesti F3-kanavan alueella (ks. taulukko 7). Temporaalialueen negatiivinen aktivaatio puolestaan heikkeni vasemmalla hemisfäärillä. Dyslektisillä lukijoilla näkyi /yth/-vasteessa aiemman kaltaisia aktivaatioita, mutta ainoastaan kanavan PO4 aktivaatio erosi merkitsevästi nolasta (t = -2.73, p < .05). Kontrolleilla /y^{fr}/-vasteen aktivaatiot heikkenivät ja lähinnä parietaalialueilla ilmeni heikkoa negatiivista aktivaatiota. Dyslektisillä lukijoilla /y^{fr}/-vasteessa aiemmin vahvana havaittu frontaalinen aktivaatio heikkeni, mutta säilyi edelleen positiivisena. Myös temporaalialueen positiivisuus säilyi. /y^{ge}/-vasteen aktivaatiot heikkenivät hieman molemmilla ryhmillä, mutta muistuttivat edellistä aikaikkunaa.

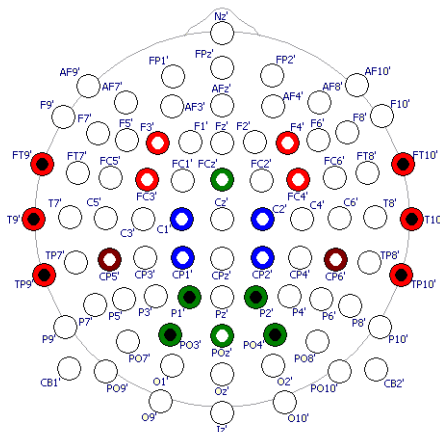


KUVIO 8. Pääkomponenttianalyysin tuottamien faktoripistemäärien keskiarvoistetut topografiset jakaumat CSD-muunnetuille erotusvasteille komponentilla 17-375 kuvattuna kunkin äänten sekä ryhmän osalta.

TAULUKKO 7. Komponentin 17-375 valittujen kanavien CSD-erotuskäyrien eroavuus nolasta kontrolliryhmässä testattuna yksisuuntaisella t-testillä

Komp. 17-375	Kanava	/y ^{fh} /		/y ^{fr} /		/y ^{ge} /	
		V	O	V	O	V	O
Frontaalinen negatiivisuus	F3/F4	*					**
	FC3/FC4						**
Temporaalinen positiivisuus	FT9/FT10	**	**				
	T9/T10		**				
	TP9/TP10						*
Sentraalinen negatiivisuus	C1/C2	*	**				*
	CP1/CP2		**				*
Sentraalinen positiivisuus	CP5/CP6		**	*			
Parietaalinen positiivisuus	P1/P2					*	
	PO3/PO4			**	*		
Keskilinjan positiivisuus	FCZ	**	*				
	POZ		*				

huom! * p < .05, ** p < .01, *** p < .001



KUVIO 9. Komponentin 17-375 valitut kanavat. Kanavaryypit on korostettu eri väreillä.

Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä. *Frontaalisen negatiivisuuden* (ks. taulukko 7) äänten vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio (2) × ryhmä (2)) ilmeni MANOVAssa kieli × hem × ryhmä -yhdysvaikutus ($F(2,69) = 6,14, p < .01$), joka oli merkitsevä vain /y^{fh}/-/y^{ge}/-kontrastissa (ks. taulukko 9). Kielten vasteiden välinen ero oli merkitsevä oikealla hemisfäärillä, jossa dyslektisillä lukijoilla oli suurempi negatiivinen aktivaatio /y^{ge}/-äänteeseen kuin kontrolleilla. Kuvista näkyikin, että kontrollien vaste oli tällä alueella vahvasti positiivinen. *Temporaalisessa positiivisuudessa* ilmeni /y^{fh}/-vasteen vertailussa (hem (2) × lokaatio (3) × ryhmä (2)) ryhmän päävaikutus, joka näkyi suurempana aktivaationa kontrolliryhmässä kuin dyslektisten lukijoiden ryhmässä (ks. taulukko 8). Ryhmäeroja ei havaittu *sentraalisessa negatiivisuudessa* tai *positiivisuudessa*. *Parietaalisessa negatiivisuudessa* havaittiin MANOVAssa kieli × hem × ryhmä

-yhdysvaikutus ($F(2,69) = 3,72, p < .05$), joka oli merkitsevä vain /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä (ks. taulukko 9). Ryhmät eivät eronneet toisistaan kumpaakaan hemisfääriä erikseen tarkasteltaessa. *Keskilinjän positiivisuudessa* ei havaittu ryhmäeroja.

TAULUKKO 8. Merkitsevät ryhmäerot /y^{fh}/-vasteessa komponentilla 17-375

Alue	Yhteys	Jatkoanalyysit	
		Suunta	F
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	ryhmä	K > D	6,64*

Huom! * $p < .01$, ** $p < .05$, *** $p < .001$, df: K vs D = 1,70

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), df = vapausaste

TAULUKKO 9. Ryhmien ja kielten väliset vertailut komponentilla 17-375

Alue	Yhteys	Vertailut		Jatkoanalyysi	
		Kontrasti	F(df = 2,105)	Suunta	F
<i>Frontaalinen Negatiivisuus</i>	kieli × hem × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	12,27**	K < D (/y ^{ge} / O)	4,57*
<i>Parietaalinen Negatiivisuus</i>	kieli × hem × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	7,25**	ns.	ns.

Huom! * $p < .01$, ** $p < .05$, *** $p < .001$ df: K vs D = 1,70

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), df = vapausaste, ns. = nonsignificant (ei-merkitsevä)

Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä. Ryhmien sisäisessä vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio) eroja havaittiin lähinnä kontrolliryhmässä. *Frontaaliosessa negatiivisuudessa* kontrolliryhmällä ilmeni kielen päävaikutus /y^{fh}/- /y^{ge}/-kontrastin välillä ja se näkyi negatiivisempuna vasteena /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen (ks. taulukko 10). Lisäksi MANOVAssa ilmeni merkitsevä kieli × hem -yhdysvaikutus ($F(2,48) = 6,18, p < .01$), joka osoittautui merkitseväksi vain /y^{fh}/- /y^{ge}/-vertailussa. Kielten välinen ero oli merkitsevä oikealla hemisfäärillä, jossa se ilmeni negatiivisempuna vasteena /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen. /y^{ge}/-vaste oli negatiivisempi vasemmalla kuin oikealla hemisfäärillä, mutta /y^{fh}/-vaste ei eronnut hemisfäärien välillä. Tällä alueella havaittiin MANOVAssa myös hemisfäärin päävaikutus ($F(1,49) = 7,62, p < .05$), joka näkyi yli kaikkien kielten negatiivisempuna vasteena vasemmalla kuin oikealla hemisfäärillä. *Temporaalisessa positiivisuudessa* kontrolliryhmän MANOVAssa havaittiin merkitsevä kielen päävaikutus ($F(2,48) = 4,40, p < .05$), joka ilmeni molemmissa kielivertailuissa siten, että /y^{fh}/-vaste oli suurempi kuin muiden kielten vasteet. *Sentraalisessa negatiivisuudessa* ilmeni kontrolleilla MANOVAssa merkitsevä kielen päävaikutus ($F(2,48) = 6,82, p < .01$), joka näkyi molemmissa kielipareissa suurempa /y^{fh}/-vasteena. *Sentraalisessa positiivisuudessa* havaittiin kontrolleilla kieli × hem -yhdysvaikutus /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-vasteiden välillä. Kielten vasteet eivät eronneet toisistaan merkitsevästi kummallakaan hemisfäärillä, eivätkä hemisfäärien vasteet eronneet toisistaan kumpaakaan kieltä erikseen tarkasteltaessa. *Parietaalisessa positiivisuudessa* kontrolleilla ilmeni MANOVAssa kielen päävaikutus ($F = 4,74, p < .05$), joka oli merkitsevä vain /y^{fh}/- /y^{fr}/-vertailussa ja näkyi positiivisempuna vasteena /y^{fh}/- kuin /y^{fr}/-äänteeseen. Dyslektisillä lukijoilla ilmeni kieli ×

hem -yhdyksvaikutus /y^{fh}/-/y^{ge}/-kontrastissa. Kielten vasteet eivät eronneet toisistaan kummallakaan hemisfäärillä tai hemisfäärit kummankaan kielen vasteita erikseen tarkasteltaessa.

TAULUKKO 10. Ryhmän sisäiset vertailut komponentilla 17-375

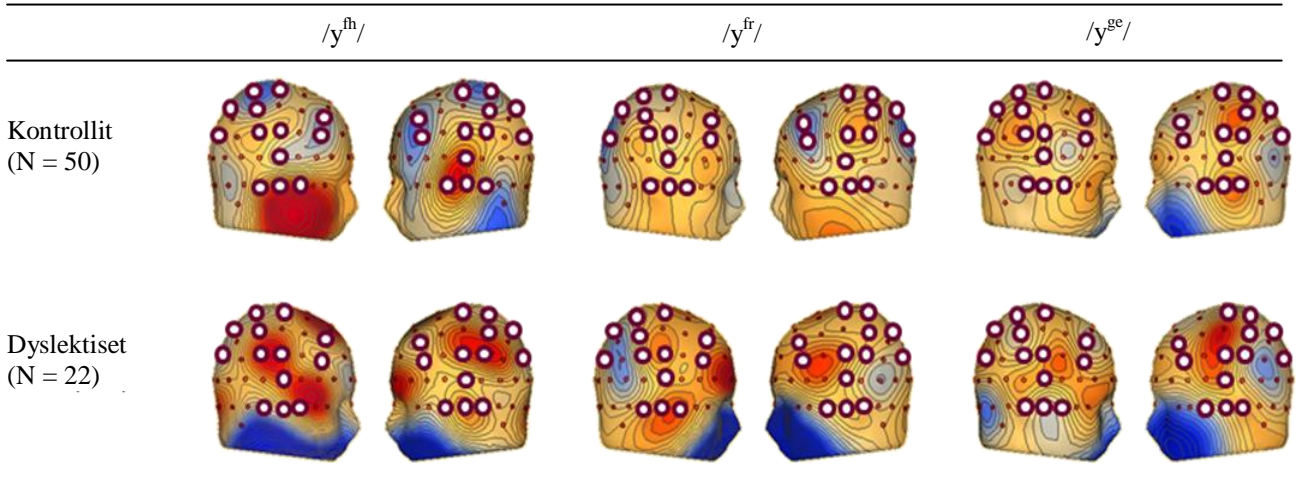
Alue	Yhteys	Vertailut			Jatkoanalyysi	
		ryhmä	Kontrasti	F(df = 2,105)	suunta	F
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	hem	K	V > O	7,62**	-	-
	kieli × hem	K	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	12,62**	O, /y ^{fh} / > /y ^{ge} / /y ^{ge} /, V > O	13,06** 18,90***
	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{ge} /	4,08*	-	-
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{fr} /	8,55**	-	-
			/y ^{fh} / > /y ^{ge} /	5,34*	-	-
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{fr} /	13,82**	-	-
			/y ^{fh} / > /y ^{ge} /	4,09*	-	-
<i>Sentraalinen positiivisuus</i>	kieli × hem	K	/y ^{fh} / vs /y ^{fr} /	4,71*	ns.	ns.
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{fr} /	6,51*	-	-
	kieli × hem	D	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	5,29*	ns.	ns.

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001, df: K = 1,49, D = 1,21,

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, O = oikea hemisfääri, V = vasen hemisfääri, ns. = nonsignificant (ei-merkitsevä), df = vapausaste

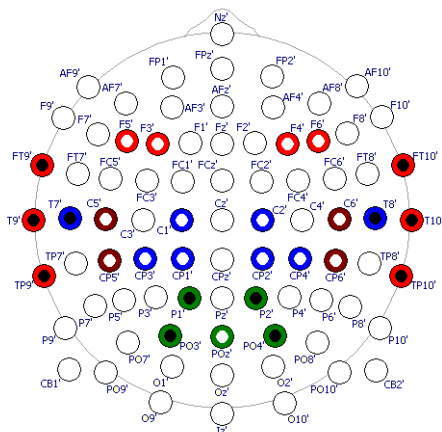
Komponentti 15-395

Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat. Kontrolleilla vasteet säilyivät aikaikkunalla 395 millisekuntia lähes samanlaisina kuin aiemmin (ks. kuvio 10). Dyslektisillä lukijoilla /y^{fh}/-vaste kuitenkin poikkesi osittain aiemmasta, sillä vaikka positiivista aktivaatiota erottui edelleen, oli frontaalinen aktivaatio siirtynyt hieman alemmas ja temporaalinen taas ylemmäs kohti sentraalialueita. Huolimatta vahvan näköisistä aktivaatioista dyslektisillä lukijoilla /y^{fh}/-vasteen verratuista kanavista kuitenkin vain C6-kanavan aktivaatio erosi tilastollisesti merkitsevästi nolasta (t = 2,30, p < .05). Ryhmät näyttivätkin poikkeavan toisistaan edelleen eniten /y^{fh}/-vasteen aktivaatiossa, sillä kontrolleilla näkyi dyslektisistä lukijoista poiketen negatiivisia vasteita F3- ja F4- sekä sentraalikanavilla (ks. taulukko 11). Kontrolleilla säilyi edelleen myös vahva temporaalinen aktivaatio oikealla. Kontrolleilla alkoi /y^{fr}/-vasteessa erottua negatiivista frontaalista aktivaatiota vasemmalla hemisfäärillä. Dyslektisillä lukijoilla aiemmin /y^{fr}/-vasteessa havaittu positiivinen frontaalinen aktivaatio oli siirtynyt edemmäs ja temporaalialueen positiivinen aktivaatio puolestaan hieman ylemmäs edelliseen aikaikkunaan nähden. Kontrolleilla /y^{ge}/-vasteen positiivinen frontaalinen aktivaatio näytti heikentyneen oikealla hemisfäärillä. CP3- ja CP5-kanavien positiivinen aktivaatio sen sijaan vahvistui. Dyslektisillä lukijoilla /y^{ge}/-vasteen negatiiviset aktivaatiot parietaalialueilla näyttivät heikkenevän.



KUVIO 10. Pääkomponenttianalyysin tuottamien faktoripistemäärien keskiarvoistetut topografiset jakaumat CSD-muunnetuille erotuvasteille komponentilla 15-395 kuvattuna kunkin äänteen sekä ryhmän osalta.

TAULUKKO 11. Komponentin 15-395 valittujen kanavien faktoripistemäärien eroavuus nolasta kontrolliryhmässä testattuna yksisuuntaisella t-testillä.



KUVIO 11. Komponentin 15-395 valitut kanavat. Kanavaryppäät on korostettu eri väreillä.

Komp. 15-395	Kieli Kanava	/y ^h /		/y ^r /		/y ^{ge} /	
		V	O	V	O	V	O
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	F3/F4	**	*	*		*	*
	F5/F6			**			
<i>Ylempi temporaalialue</i>	T7/T8	**					
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	FT9/FT10	**	**				
	T9/T10	**	**			*	
	TP9/TP10			*			
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	C1/C2			**			
	CP1/CP2	*	**				
	CP3/CP4			**			
<i>Sentraalinen positiivisuus</i>	CP5/CP6						*
	C5/C6						*
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	PO3/PO4			**	**		
	P1/P2				*		
<i>Keskilinjän positiivisuus</i>	POZ			**			

huom! * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä. *Frontaalisessa negatiivisuudessa* (ks. taulukko 11) ei havaittu merkitseviä ryhmäeroja. *Ylemmällä temporaalialueella* ilmeni /y^h/-vasteen vertailussa (hem (2) × ryhmä (2)) MANOVassa merkitsevä hem × ryhmä -yhdysvaikutus (F(1,70) = 6,37, p < .05) (ks. taulukko 12). Tämä näkyi kontrolliryhmässä suurempana positiivisena aktivaationa vasemmalla kuin oikealla hemisfäärillä, kun taas dyslektisillä lukijoilla hemisfäärien aktivaatiot eivät eronneet. Ryhmät eivät eronneet toisistaan hemisfäärejä erikseen tarkasteltaessa. Tällä alueella

ilmeni merkitsevä kieli \times hem \times ryhmä -yhdysvaikutus /y^{fh}/-/y^{ge}/-vertailussa (ks. taulukko 13). Ero oli merkitsevä vain vasemmalla hemisfäärillä, mutta ryhmät eivät eronneet kummankaan kielen vasteessa tällä hemisfäärillä. *Temporaalisessa positiivisuudessa* ilmeni /y^{fh}/-vasteen vertailussa merkitsevä ryhmän päävaikutus, joka näkyi kontrollien dyslektisiä lukijoita suurempana aktivaationa (ks. taulukko 12). Ryhmäeroja ei havaittu *sentraalisessa negatiivisuudessa*, *sentraalisessa positiivisuudessa*, *parietaalisessa positiivisuudessa* eikä *keskilinjan positiivisuudessa*.

TAULUKKO 12. Merkitsevät ryhmäerot /y^{fh}/-vasteessa komponentilla 15-395

Alue	Yhteys	Jatkoanalyysit	
		Suunta	F
<i>Ylempi temporaalialue</i>	hem \times ryhmä	K: V > O	12,14**
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	ryhmä	K > D	4,43*

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001, df: K vs D = 1,70
K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), df = vapausaste

TAULUKKO 13. Ryhmien ja ärsykkeiden väliset vertailut komponentilla 15-395

Alue	Yhteys	Vertailut		Jatkoanalyysi	
		Kontrasti	F	Suunta	F
<i>Ylempi temporaalialue</i>	kieli \times hem \times ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	5,97*	K vs D (V)	6,21*

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001 df: K vs D = 1,70
K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, V = vasen hemisfääri, O = oikea hemisfääri, df = vapausaste

Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä. Ryhmien sisäisessä vertailussa (kieli (3) \times hem (2) \times lokaatio) havaittiin eroja vain kontrolliryhmässä (ks. taulukko 14). *Frontaalisessa negatiivisuudessa* havaittiin MANOVAssa merkitsevä hemisfäärin päävaikutus (F(1,49) = 4,73, p < .05), joka näkyi siten, että vasemman puolen vaste oli negatiivisempi kuin oikean. *Ylemmällä temporaalialueella* ilmeni MANOVAssa merkitsevä kieli \times hem -yhdysvaikutus (F(2,48) = 3,98, p < .05). Kieliero oli merkitsevä vain vasemmalla hemisfäärillä, jossa aktivaatio oli positiivisempi /y^{fh}/-äänteeseen kuin muihin äänteisiin. Lisäksi vaste oli positiivisempi /y^{fh}/-äänteeseen vasemmalla kuin oikealla hemisfäärillä. *Temporaalisessa positiivisuudessa* ilmeni kielen päävaikutus /y^{fh}/-/y^{ge}/-vertailussa ja se syntyi positiivisemmasta vasteesta /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen. *Sentraalisessa negatiivisuudessa* ilmeni MANOVAssa merkitsevä kielen päävaikutus (F(2,48) = 7,92, p < .01). Ero oli merkitsevä molemmissa kielivertailuissa ja näkyi negatiivisempänä vasteena /y^{fh}/-äänteeseen kuin muihin äänteisiin. *Parietaalisessa positiivisuudessa* ilmeni MANOVAssa merkitsevä kielen päävaikutus (F(2,48) = 5,09, p < .05), joka näkyi /y^{fh}/-/y^{fr}/-vertailussa positiivisempänä vasteena /y^{fh}/-äänteeseen.

TAULUKKO 14. Ryhmän sisäiset vertailut komponentissa 15-395

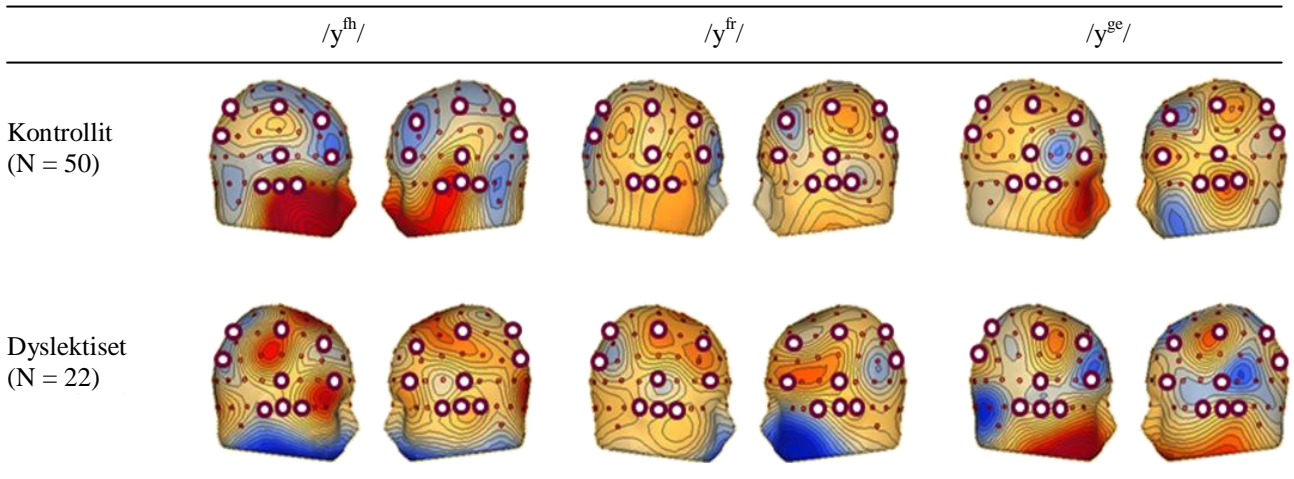
Alue	Yhteys	Vertailut			Jatkoanalyysi	
		ryhmä	Kontrasti	F(df = 2,105)	Suunta	F
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	hem	K	V > O	4,73*	-	-
<i>Ylempi temporaalialue</i>	kieli × hem	K	/y ^h / vs /y ^{fr} /	4,88*	V: /y ^h / > /y ^{fr} /	5,10*
	kieli × hem	K	/y ^h / vs /y ^{ge} /	6,93*	/y ^h / V > O V: /y ^h / > /y ^{ge} /	12,14** 6,56* 12,14**
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y ^h / > /y ^{ge} /	5,47*	-	-
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	kieli	K	/y ^h / > /y ^{fr} /	11,39**	-	-
			/y ^h / > /y ^{ge} /	15,80***	-	-
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y ^h / > /y ^{fr} /	7,16*	-	-

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001, df: K = 1,49, D = 1,21,

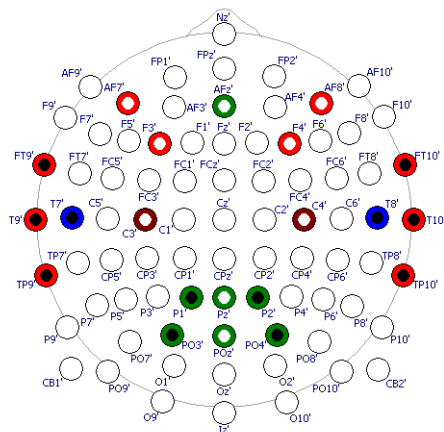
K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, O = oikea hemisfääri, V = vasen hemisfääri, df = vapausaste

Komponentti 20-415

Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat. Aikaikkunalla 415 millisekuntia vasteet poikkesivat enemmän aiemmasta varsinkin kontroleilla, joilla /y^h/-vasteen frontaalinen aktivaatio näytti levinneen laajemmalle alueelle (ks. kuvio 12). Aktivaatio myös heikkeni, sillä se oli tilastollisesti merkitsevää vain F3-kanavalla (ks. taulukko 15). Myös sentraalikanavien aktivaatio heikkeni. Dyslektisillä lukijoilla /y^h/-vasteen positiiviset aktivaatiot jakautuivat nyt frontaaliseksi ja sentraaliseksi aktivaatioksi. Verrattuista kanavista kuitenkin vain kanavan P2 aktivaatio erosi merkitsevästi nolasta (t = -2,20, p < .05). /y^{fr}/-vaste oli kontroleilla heikko ja muistutti aiempaa aikaikkunaa. Dyslektisillä lukijoilla aiemmin havaitut vahvat positiiviset frontaaliset ja temporaaliset aktivaatiot heikkenivät. Kontroleilla /y^{ge}/-vasteessa frontaalialueiden aktivaatio vaihtui negatiiviseksi ja vahvistui varsinkin vasemmalla hemisfäärillä. Myös dyslektisillä lukijoilla negatiivinen aktivaatio näytti vahvistuneen.



KUVIO 12. Pääkomponenttianalyysin tuottamien faktoripistemäärien keskiarvoistetut topografiset jakaumat CSD-muunnetuille erotusvasteille komponentilla 20-415 kuvattuna kunkin äänteen sekä ryhmän osalta.



KUVIO 13. Komponentin 20-415 valitut kanavat. Kanavaryppäät on korostettu eri väreillä.

TAULUKKO 15. Komponentin 20-415 valittujen kanavien CSD-erotuskäyrien eroavuus nolosta kontrolliryhmässä testattuna yksisuuntaisella t-testillä

Komp. 20-415	Kanava	/y ^{fh} /		/y ^{fr} /		/y ^{ge} /	
		V	O	V	O	V	O
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	F3/F4	*		*		**	
	AF7/AF8					*	
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	FT9/FT10	***	**				
	T9/T10	***	**			*	
	TP9/TP10					**	
<i>Temporaalinen negatiivisuus</i>	T7/T8		**				
<i>Sentraalinen positiivisuus</i>	C3/C4						*
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	P1/P2		*		*		
	PO3/PO4				**		
<i>Keskilinjan positiivisuus</i>	AFZ						*
	PZ	*					
	POZ				*		

huom! * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä. *Frontaalisessa negatiivisuudessa* (ks. taulukko 15) ilmeni äänteiden vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio (2) × ryhmä) merkitsevä kieli × ryhmä -yhdysvaikutus /y^{fh}/-/y^{ge}/-kontrastissa (ks. taulukko 17). Ryhmät eivät eronneet kummankaan kielen vasteiden osalta merkitsevästi toisistaan, kun vasteita tarkasteltiin erikseen. *Temporaalisessa negatiivisuudessa* ei ilmennyt merkitseviä ryhmäeroja. *Temporaalisessa positiivisuudessa* ilmeni /y^{fh}/-vasteen vertailussa (hem (2) × lokaatio (3) × ryhmä (2)) merkitsevä ryhmän päävaikutus, joka näkyi kontrollien dyslektisiä lukijoita positiivisempuna vasteena (ks. taulukko 16). Tällä alueella ilmeni myös kielten ja ryhmien välisessä vertailussa merkitsevä ryhmän päävaikutus, joka näkyi yli kaikkien kielten kontrolliryhmän dyslektisiä lukijoita suurempuna vasteena (ks. taulukko 17).

Sentraalisessa, parietaalisessa ja keskilinan positiivisuudessa ei havaittu merkitseviä ryhmäeroja.

TAULUKKO 16. Merkitsevät ryhmäerot /y^{fh}/-vasteessa komponentilla 20-415

Alue	Yhteys	Jatkoanalyysit	
		Suunta	F
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	ryhmä	K > D	7,49**

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001, df: K vs D = 1,70

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), df = vapausaste

TAULUKKO 17. Ryhmien ja ärsykkeiden väliset vertailut komponentilla 20-415

Alue	Yhteys	Vertailut		
		Kontrasti	F(df = 2,105)	Jatkoanalyysi Suunta
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	kieli × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	4,59*	-
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	ryhmä	K > D	6,90*	-

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001 df: K vs D = 1,70

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, V = vasen hemisfääri,

O = oikea hemisfääri, df = vapausaste

Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä. Ryhmien sisäisessä vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio) eroja ilmeni vain kontrolliryhmällä (ks. taulukko 18). *Frontaalissa negatiivisuudessa* havaittiin kielen päävaikutus /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-kontrastin välillä ja se näkyi suurempana aktivaationa /y^{fh}/-äänteeseen kuin /y^{ge}/-äänteeseen. *Temporaalisessa negatiivisuudessa* ilmeni MANOVAssa merkitsevä kieli × hem -yhdysvaikutus (F(2,48) = 3,65, p < .05). Kontrastivertailussa ero oli merkitsevä vain /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä. Kielten välinen ero ei ollut merkitsevä kumpaakaan hemisfääriä erikseen tarkasteltaessa. Vaste oli kuitenkin negatiivisempi /y^{fh}/-äänteeseen oikealla kuin vasemmalla. *Temporaalisessa positiivisuudessa* havaittiin MANOVAssa merkitsevä kielen päävaikutus (F(2,48) = 4,99, p < .05). Erot olivat merkitseviä molempien kielikontrastien vertailuissa ja näkyivät positiivisempana vasteena /y^{fh}/-äänteeseen kuin muihin äänneisiin. Myös kieli × hem -yhdysvaikutus oli MANOVA-analyysissä merkitsevä (F(2,48) = 3,96, p < .05). /y^{fh}/- /y^{fr}/-kontrastin vertailussa ero oli merkitsevä vasemmalla hemisfäärillä, jossa se näkyi positiivisempana vasteena /y^{fh}/-äänteeseen. /y^{fh}/- /y^{ge}/-kontrastin välisessä vertailussa ero oli puolestaan merkitsevä oikealla puolella ja näkyi positiivisempana vasteena /y^{fh}/-äänteeseen. /y^{ge}/-vaste oli positiivisempi vasemmalla kuin oikealla, mutta muiden kielen vasteissa ei havaittu hemisfäärieroja. *Sentraalisessa negatiivisuudessa* huomattiin kielen päävaikutus /y^{fh}/- /y^{ge}/-kontrastin vertailussa. Aktivaatio oli suurempaa /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen. *Parietaalisessa positiivisuudessa* ilmeni kielen päävaikutus /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-vasteiden välisessä kontrastivertailussa. Vaste oli suurempi /y^{fh}/-äänteeseen. Myös kieli × hem -yhdysvaikutus oli merkitsevä tämän kieliparin välillä ja näkyi oikealla hemisfäärillä suurempana vasteena /y^{fh}/-äänteeseen kuin /y^{fr}/-äänteeseen. *Keskilinan positiivisuudessa* ilmeni MANOVAssa merkitsevä

kielen päävaikutus ($F(2,48) = 3,31, p < .05$). Ero oli merkitsevä molempien kieliparien välillä ja näkyi positiivisempaan vasteena /y^{fh}/-äänteeseen kuin muihin äänteisiin.

TAULUKKO 18. Ryhmän sisäiset vertailut komponentilla 20-415

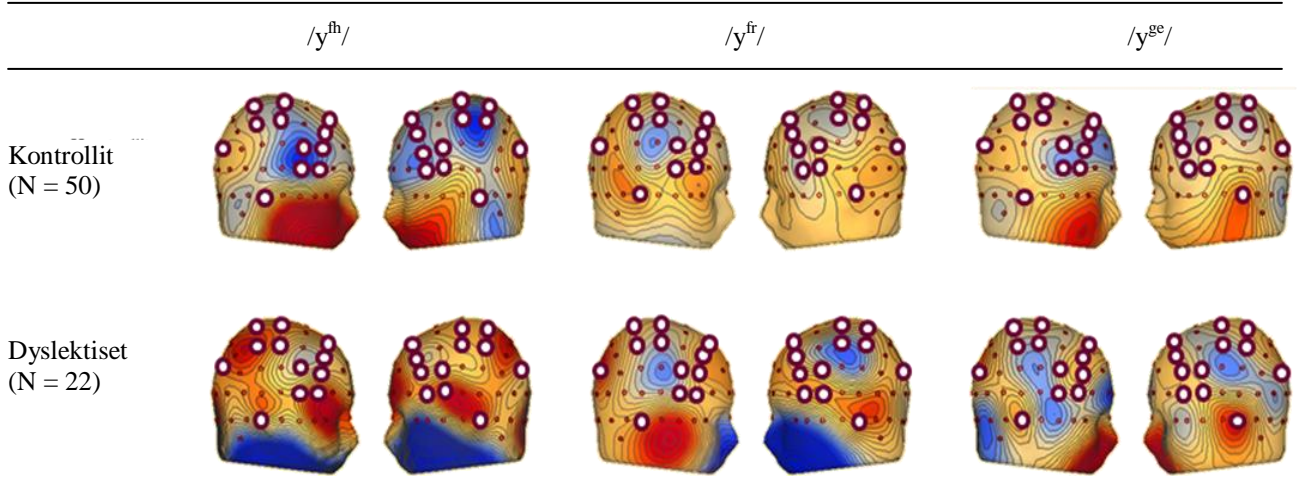
Alue	Yhteys	Vertailut		Jatkoanalyysi		
		ryhmä	Kontrasti	F(df = 2,105)	Suunta	F
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{ge} /	5,76*	-	-
<i>Temporaalinen negatiivisuus</i>	kieli × hem	K	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	6,14*	/y ^{fh} /: V < O	13,05**
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{fr} /	9,25**	-	-
			/y ^{fh} / > /y ^{ge} /	5,23*	-	-
	kieli × hem	K	/y ^{fh} / vs /y ^{fr} /	ns.	V /y ^{fh} / > /y ^{fr} /	14,96***
	kieli × hem	K	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	ns.	O /y ^{fh} / > /y ^{ge} /	7,75**
					/y ^{ge} /: V > O	5,64*
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{ge} /	4,12*	-	-
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{fr} /	4,85*	-	-
	kieli × hem	K	/y ^{fh} / vs /y ^{fr} /	4,91*	O: /y ^{fh} / > /y ^{fr} /	9,42**
<i>Keskilinjän positiivisuus</i>	kieli	K	/y ^{fh} / > /y ^{fr} /	4,39*	-	-
			/y ^{fh} / > /y ^{ge} /	5,22*	-	-

Huom! * p < .01, ** p < .05, *** p < .001, df: K = 1,49, D = 1,21,

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, O = oikea hemisfääri, V = vasen hemisfääri, ns. = nonsignificant (ei-merkitsevä)

Komponentti 1-490

Erotusvasteiden faktoripistemäärien topografiset jakaumat. Kontrolleilla suurin ero aiempaan aikaikkunaan 490 millisekuntia näkyi /y^{fh}/-vasteessa, jossa frontaali- ja sentraalialueiden negatiiviset aktivaatiot vahvistuivat huomattavasti aiempaan aikaikkunaan nähden (ks. kuvio 14 ja taulukko 19). Äänten /y^{fh}/-vaste poikkesi jälleen eniten ryhmien välillä. Dyslektisillä lukijoilla /y^{fh}/-vasteen aiemmin sentraalialueella havaittu positiivinen vaste näytti siirtyneen kohti parietaalialueita. Frontaalialueella näkyi myös edelleen positiivisia vasteita, jotka erosivatkin nyt merkitsevästi nolasta FT7- ja FC6-kanavilla (t-arvot -2,14–2,39, p < .05). /y^{fr}/-vasteessa molempien ryhmien negatiiviset sentraalivasteet vahvistui ja ryhmät muistuttivat toisiaan lukuun ottamatta dyslektisten lukijoiden vahvaa positiivista temporaalista aktivaatiota oikealla hemisfäärillä. Ryhmien /y^{ge}/-vasteet näyttivät melko samanlaisilta, mutta dyslektisillä lukijoilla frontaalinen aktivaatio ilmeni alempana ja levisi kohti sentraalialueita.

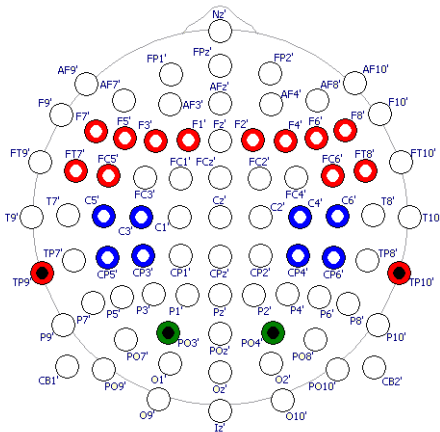


Kuvio 14. Pääkomponenttianalyysin tuottamien faktoripistemäärien keskiarvoistetut topografiset jakaumat CSD-muunnetuilla erotusvasteille komponentilla 1-490 kuvattuna kunkin äänten sekä ryhmän osalta.

TAULUKKO 19. Komponentin 1-490 valittujen kanavien CSD-erotuskäyrien eroavuus nolasta kontrolliryhmässä testattuna yksisuuntaisella t-testillä

Komp. 1-495	Kieli Kanava	/y ^{fh} /		/y ^{fr} /		/y ^{ge} /	
		V	O	V	O	V	O
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	F1/F2	*					
	F3/F4	**				*	
	F5/F6						*
	F7/F8			*			
	FC5/FC6		**				
	FT7/FT8		*				
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	TP9/TP10					*	
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	C3/C4	**		*			
	C5/C6			*			
	CP3/CP4	**					
	CP5/CP6	**				*	
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	PO3/PO4	*					*

huom! * p < .05, ** p < .01, *** p < .001



KUVIO 15. Komponentin 1-490 valitut kanavat. Kanavaryppäät on korostettu eri väreillä.

Ryhmäerot kielten ja hemisfäärien välillä. *Frontaalisen negatiivisuuden* (ks. taulukko 19) ja *temporaalisen positiivisuuden* alueilla ei havaittu merkitseviä ryhmäeroja. *Sentraalisessa negatiivisuudessa* ilmeni äänten vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio (4) × ryhmä (2)) MANOVAssa merkitsevä kieli × ryhmä -yhdysvaikutus ($F(2,69) = 3,87, p < .05$). Ero oli merkitsevä vain /y^{fh}/-/y^{ge}/-kontrastin vertailussa ja ilmeni /y^{ge}/-vasteessa negatiivisempaan aktivaationa dyslektisillä lukijoilla kuin kontrolliryhmällä (ks. taulukko 21). Äänten /y^{fh}/ vaste ei eronnut ryhmien välillä. *Parietaalisessa positiivisuudessa* ilmeni /y^{fh}/-vasteen vertailussa (hem (2) × ryhmä (2)) merkitsevä ryhmän päävaikutus, joka näkyi kontrolliryhmällä dyslektisiä lukijoita positiivisempaan vasteena (ks. taulukko 20). MANOVAssa ilmeni tällä alueella merkitsevä kieli ×

ryhmä -yhdysvaikutus ($F(2,69) = 3,89, p < .05$). Ero oli merkitsevä vain /y^{fh}/-/y^{fr}/-kontrastissa (ks. taulukko 21). Kontrolleilla oli positiivisempi vaste /y^{fh}/-äänteeseen kuin dyslektisillä lukijoilla, mutta /y^{fr}/-vaste ei eronnut ryhmien välillä sitä erikseen tarkasteltaessa. Myös hem × ryhmä -yhdysvaikutus oli MANOVAssa merkitsevä ($F(1,70) = 6,67, p < .05$). Ryhmät eivät eronneet toisistaan kumpaakaan hemisfääriä erikseen testattaessa (ks. taulukko 21).

TAULUKKO 20. Merkitsevät ryhmäerot /y^{fh}/-vasteessa komponentilla 1-490

Alue	Yhteys	Jatkoanalyysit	
		Suunta	F
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	ryhmä	K > D	4,31*

Huom! * $p < .01$, ** $p < .05$, *** $p < .001$, df: K vs D = 1,70, K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), df = vapausaste

TAULUKKO 21. Ryhmien ja ärsykkeiden väliset vertailut komponentilla 1-490

Alue	Yhteys	Vertailu		Jatkoanalyysi	
		Kontrasti	F	Suunta	F
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	kieli × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{ge} /	7,54**	K < D (/y ^{ge} /)	6,50*
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	kieli × ryhmä	/y ^{fh} / vs /y ^{fr} /	7,06*	K > D (/y ^{fh} /)	4,31*
	kieli × ryhmä	V vs O	6,67*	ns.	ns.

Huom! * $p < .01$, ** $p < .05$, *** $p < .001$ df: K vs D = 1,70, K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, V = vasen hemisfääri, O = oikea hemisfääri, ns. = nonsignificant (ei-merkitsevä), df = vapausaste

Ryhmien sisäiset erot kielten ja hemisfäärien välillä. Ryhmien sisäisessä vertailussa (kieli (3) × hem (2) × lokaatio (6)) havaittiin *frontaalissa negatiivisuudessa* kielen päävaikutus sekä kontrolleilla että dyslektisillä lukijoilla (ks. taulukko 22). Kontrolleilla ero oli merkitsevä vain /y^{fh}/-/y^{fr}/-kontrastissa ja ilmeni negatiivisempänä vasteena /y^{fh}/-äänteeseen. Dyslektisillä lukijoilla ero oli merkitsevä /y^{fh}/-/y^{ge}/-kontrastissa ja näkyi negatiivisempänä vasteena /y^{fh}/-äänteeseen. *Temporaalisessa positiivisuudessa* ilmeni kontrolleilla kieli × hem -yhdysvaikutus /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä. /y^{ge}/-vaste oli positiivisempi vasemmalla kuin oikealla hemisfäärillä, mutta /y^{fh}/-vasteessa ei havaittu hemisfäärieroa. Kielten vasteet eivät eronneet toisistaan kumpaakaan hemisfääriä erikseen testattaessa. *Sentraalisessa negatiivisuudessa* kontrolleilla havaittiin kielen päävaikutus /y^{fh}/-/y^{ge}/-kontrastissa ja se näkyi negatiivisempänä vasteena /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen. Kontrolleilla kieli × hem -yhdysvaikutus oli merkitsevä MANOVAssa ($F(2,48) = 4,51, p < .05$) ja näkyi /y^{fh}/-vasteessa suurempana aktivaationa vasemmalla kuin oikealla, kun taas /y^{ge}/-vasteessa hemisfäärit eivät eronneet. Dyslektisillä lukijoilla ilmeni MANOVAssa merkitsevä kielen päävaikutus ($F(2,20) = 3,62, p < .05$). Ero oli merkitsevä vain /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-vasteiden vertailussa ja näkyi negatiivisempänä vasteena /y^{fr}/- kuin /y^{fh}/-äänteeseen. *Parietaalisessa positiivisuudessa* dyslektisillä lukijoilla ilmeni kielen päävaikutus /y^{fh}/-/y^{fr}/-kontrastissa ja se näkyi siten, että /y^{fr}/-

äänteeseen syntyi positiivisempi vaste. Dyslektisillä lukijoilla hemisfäärin päävaikutus oli MANOVassa merkitsevä ($F(1,21) = 5,26, p < .05$) ja näkyi yli kaikkien kielten positiivisempänä vasteena oikealla hemisfäärillä.

TAULUKKO 22. Ryhmän sisäiset vertailut komponentilla 1-490

Alue	Yhteys	Vertailu		Jatkoanalyysi		
		ryhmä	Kontrasti	F(df = 2,105)	Suunta	F
<i>Frontaalinen negatiivisuus</i>	kieli	K	$/y^{th}/ > /y^{tr}/$	4,18*	-	-
	kieli	D	$/y^{th}/ > /y^{ge}/$	4,75*	-	-
<i>Temporaalinen positiivisuus</i>	kieli × hem	K	$/y^{th}/$ vs $/y^{ge}/$	5,65*	$/y^{ge}/: V > O$	7,45**
<i>Sentraalinen negatiivisuus</i>	kieli	K	$/y^{th}/ > /y^{ge}/$	4,54*	-	-
	kieli × hem	K	$/y^{th}/$ vs $/y^{tr}/$	8,49**	$y^{th}/: V > O$	9,50**
	kieli	D	$/y^{th}/ < /y^{tr}/$	6,53*	-	-
<i>Parietaalinen positiivisuus</i>	Hem	D	$V < O$	5,26*	-	-
	kieli	D	$/y^{th}/ < /y^{tr}/$	4,66*	-	-

Huom! * $p < .01$, ** $p < .05$, *** $p < .001$, df: K = 1,49, D = 1,21,

K = kontrollit (N = 50), D = dyslektiset lukijat (N = 22), hem = hemisfääri, O = oikea hemisfääri, V = vasen hemisfääri, df = vapausaste

POHDINTA

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää eroja dyslektisten ja normaalisti lukevien lasten foneettisissa muistiedustuksissa tarkastelemalla myöhäisestä erotteluprosessoinnista kertovaa herätevastetta LDN:ää (late discriminative negativity). Erottelua tutkittiin passiivisella MMN-koeasetelmalla, jossa standardina ärsykkeenä oli /i^{eu}/ ja poikkeavana suomalais-unkarilainen (/y^{fh}/), saksalainen (/y^{ge}/) tai ranskalainen (/y^{fr}/) y-äänne. Tutkimukseen osallistui 72 lasta (iältään 8–11-vuotiaita), joista 50 edusti normaalisti lukevia ja 22 dyslektisiä lukijoita. Kontrollien LDN-vasteen oletettiin olevan suurempi /y^{fh}/-äänteeseen kuin dyslektisten lukijoiden, koska kontrolleilla on muistijälki prototyypisistä äidinkielen äänneestä (ks. Kuhl ym., 1992; Näätänen ym., 1997), kun taas dyslektikoilla sen oletettiin olevan heikko tai puuttuvan kokonaan (ks. Godfrey ym., 1981; Serniclaes ym., 2004). Samoin kontrollien aktivaation oletettiin olevan vahvempi prototyypiseen äidinkielen äänneeseen kuin epäprototyypisiin (/y^{fr}/, /y^{ge}/) äänneisiin, kun taas dyslektisillä lukijoilla vasteiden ei odotettu eroavan toisistaan. LDN-vasteen odotettiin eroavan normaalisti lukevilla varsinkin /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-vasteiden välillä, sillä /y^{fr}/-äänne on foneettisesti kauimpana äidinkielen prototyypistä. Dyslektisiltä lukijoilta odotettiin sen sijaan normaalisti lukevia suurempia vasteita epäprototyypisiin äänneisiin, koska heillä reagointi ei ole allofonisesta havaitsemisesta johtuen (ks. tarkemmin alla) heikentynyt puheen epäolennaisiin variaatioihin toisin kuin normaalisti lukevilla (ks. Serniclaes ym., 2004). Oletukset saivat tukea, sillä kontrolleilla syntyi vahvempia vasteita /y^{fh}/-äänteeseen kuin muihin äänneisiin, kun taas dyslektisillä lukijoilla eroja äänneiden välillä ei juurikaan ilmennyt. Normaalisti lukevien vasteet olivat myös usein suurempia prototyypiseen äänneeseen kuin dyslektisten lukijoiden vasteet. Oletusten vastaisesti dyslektisten lukijoiden vasteet epäprototyypisiin äänneisiin eivät kuitenkaan olleet kontrolleja vahvempia muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta.

LDN-vasteen rakenne eri aikaikkunoilla

LDN ilmeni kontrolliryhmän ERP-jännitepotentiaaleissa (field potential) fronto-sentraalisena negatiivisuutena 340 ja 500 millisekunnin välillä. Myös muut tutkijat ovat havainneet LDN:n esiintyvän suunnilleen tällä aikavälillä (ks. esim. Alonso-Bua ym., 2005; Korpilahti ym., 2001), ja

sen on yleisesti havaittu ilmenevän fronto-sentraalisena negatiivisuutena (Čeponienė ym., 1998; Čeponienė ym., 2004). LDN oli suurin noin 400 millisekunnin kohdalla eli hieman varhaisemmin kuin aikaisemmissa tutkimuksissa, joissa LDN:n huipun on havaittu ilmenevän noin 430 ja 460 millisekunnin välillä (ks. esim. Alonso-Bua ym., 2005; Čeponienė ym., 2002; Korpilahti ym., 2001; Maurer ym., 2003; Schulte-Körne ym., 2001). Joissakin tutkimuksissa huippu on havaittu kuitenkin huomattavasti myöhemmin, noin 500 millisekunnin kohdalla (Schulte-Körne ym., 1998; Shestakova ym., 2003) tai jopa 600 millisekunnin kohdalla (ks. esim. Čeponienė ym., 2004). Tässä aineistossa LDN muodosti toisen huipun noin 500 millisekunnin kohdalla. Jännitepotentiaaliaineisto näytti siis vastaavan melko hyvin kirjallisuudessa aiemmin kuvattua LDN-vastetta.

Aineisto muunnettiin CSD-muotoon (current scalp density), jotta saatiin mallinnettua herätevasteiden jakautumista kallon pinnan alta. CSD-muunnosta on tietävästi käytetty LDN-vasteiden tutkimiseen aiemmin vain Hommetin ym. (2009) tutkimuksessa. CSD-muunnettu aineisto vastasi silmämääräisen tarkastelun perusteella melko paljon ERP-jännitepotentiaaleja. Myös CSD-muunnatussa aineistossa vahvimmat heilahdukset havaittiin 400 ja 500 millisekunnin kohdalla. Suurin huippu ilmeni kuitenkin temporaalikanavalla T9, jossa se näkyi 400 millisekunnin kohdalla positiivisena heilahduksena. Myös muilla temporaalikanavilla havaittiin vahvoja vasteita. LDN näyttikin ilmenevän CSD-kartassa fronto-sentraalisena negatiivisuutena, joka yhdistyi varsinkin oikealla hemisfäärillä vahvaan positiiviseen temporaaliseen aktivaatioon. Tämä positiivinen alue saattoi olla tyypillisesti fronto-sentraalisena negatiivisuutena havaitun LDN:n positiivinen vastakappale. Tällainen positiivisen ja negatiivisen alueen välille muodostunut dipoli viittaisi siihen, että LDN:n lähteet ovat temporaalilohkolla. Tähän nähden ristiriitaisesti Hommet ym. (2009) ovat havainneet, että normaalisti lukevilla lapsilla aktivaatioiden lähteet sijaitsevat sentro-parietaalisella alueella eikä niitä näyttäisi ilmenevän lainkaan temporaalialueella. Hommet ym. kuitenkin mittasivat ERP-aktivaatioita vain 28 kanavalla, kun taas tässä tutkimuksessa kanavia oli 129. Aiemmissa tutkimuksissa onkin keskitytty yleensä lähinnä frontaali- ja sentraalialueisiin. Näin ollen temporaalisesti muodostuvaan vasteeseen ei juuri ole kiinnitetty huomiota.

Temporaalisen aktivaation yhdistäminen muihin alueisiin on kuitenkin epävarmaa, sillä eri aivoalueiden vasteita on tarkasteltu tässä tutkimuksessa irrallisina toisistaan, joten niiden keskinäisistä yhteyksistä voi esittää lähinnä arveluita. On esimerkiksi mahdollista, että aineistossa ilmennyt temporaalinen positiivisuus on erillinen radiaalinen vaste, jolloin se ei muodostakaan dipolia kallon pinnan suuntaisesti eikä siis yhdisty suoraan muihin havaittuihin vasteisiin. Temporaalisen positiivisuuden yhteys muiden aivoalueiden negatiivisiin aktivaatioihin vaatisikin lisäselvitystä. Se, että ryhmien välisiä eroja löytyi vahvimmin kuitenkin juuri tältä alueelta, viittaa

sen tärkeyteen myöhäisessä erotteluprosessoinnissa.

CSD-muunnoksen lisäksi tämän tutkimuksen etuna on se, että LDN-vastetta tarkasteltiin useammalta aikapisteeltä, jotka selvitettiin pääkomponenttianalyysillä. Oletuksena oli, että LDN-vaste jakautuu useampaan alakomponenttiin. Pääkomponenttianalyysi tuottikin tarkastellulla LDN:lle sopivalla aikaikkunalla (340–550 ms) viisi suurta komponenttia, mikä viittaa siihen, että eri ajanhetkillä aktivoituivat eri kanavat. Näistä komponenteista on käytetty selvyuden vuoksi latauksen huippukohtien aikaikkunoihin pohjautuvia nimityksiä, mutta todellisuudessa komponentit muodostuvat laajemmasta ajanjaksosta (ks. kuvio 2). Eri aikaikkunoilla havaitut aktivaatiot heijastavat erilaisia vaiheita myöhäisessä erotteluprosessoinnissa. Vaikka vaiheet olivatkin osittain päällekkäisiä, ne myös erosivat toisistaan selvästi, sillä pääkomponenttianalyysi eristi ne toisistaan.

Aikaikkunoiden vertaileminen osoitti, että LDN muodostui hieman erilaisista toisiaan seuraavista prosessointivaiheista. LDN alkoi erottua käyrätarkasteluissa 340 millisekunnin jälkeen, mikä on varhemmin kuin aiemmissa tutkimuksissa, joissa LDN-vasteen huippu on paikallistettu aikaisimmillaan 360 millisekunnin kohdalle (ks. Hommet ym., 2009). Aikaikkunalla 340 millisekuntia normaalisti lukevilla lapsilla alkoi t-testien ja topografiakuvien perusteella erottua prototyyppiseen äänteeseen negatiivista sentraalista aktivaatiota, joka erosi epäprototyyppisten äänteiden aktivaatiosta ja jatkui viimeisille tarkasteluikkunoille saakka. Vastaavasti Hommet ym. (2009) ovat havainneet, että noin 360 millisekunnin kohdalta mitattu LDN näyttää olevan huipussaan sentraalisesti. Aikaikkunalla 375 millisekuntia frontaalinen aktivaatio erosi merkittävästi /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä, mutta ero näytti selittyvän sillä, että /y^{ge}/-äänteeseen syntyi vahvempi positiivinen vaste, ei niinkään /y^{fh}/-vasteen vahvalla negatiivisella aktivaatiolla. Negatiivinen frontaalinen vaste alkoi erottua vahvempana /y^{fh}/-äänteeseen vasta 415 millisekunnin kohdalla.

LDN siis saavutti tyypillisen fronto-sentraalisen negatiivisuuden melko myöhään, vasta noin 410 millisekunnista alkaen. Aiemmissa tutkimuksissa suunnilleen tällä ajanhetkellä mitatun LDN-vasteen onkin havaittu olevan vahvinta frontaalisesti (Čeponienė ym., 2002) tai sentrotemporaalisesti (Alonso-Bua ym., 2005). Tässä tutkimuksessa LDN-vasteeseen näytti kuitenkin liittyvän lisäksi positiivinen temporaalinen komponentti aikaikkunalta 340 millisekuntia aikaikkunalle 415 millisekuntia saakka. Aikaikkunalla 490 millisekuntia temporaalinen vaste näytti t-testien perusteella heikkenevän, eikä se myöskään enää poikennut MANOVA-vertailuissa äänteiden tai ryhmien välillä. Tämä vastaa Shestakovan ym. (2003) havaintoa, että LDN:n aktivaatio mitattuna noin 500 millisekunnin kohdalla oli temporaalikanavilla lähellä nollaa. Voikin olla, että LDN:n paikallistaminen lähinnä fronto-sentraaliseksi aktivaatioksi selittyisi sillä, että sen huippu on usein mitattu vasta 415 millisekunnin jälkeiseltä ajalta, jolloin temporaalinen aktivaatio

on mahdollisesti jo heikentynyt. Monissa tutkimuksissa temporaalikanavien aktivaatiota ei ole myöskään lainkaan mitattu.

Erot LDN-vasteessa dyslektisten lukijoiden ja normaalisti lukevien lasten välillä

CSD-muunnos ja laaja kanavavalikoima osoittivat, että LDN-vasteeseen liittyi kontroleilla prototyypiseen äidinkielen äänteeseen syntyvän fronto-sentraalisen negatiivisuuden lisäksi myös positiivinen temporaalinen vaste. Selkein ryhmien välinen ero syntyi nimenomaan tästä temporaalisesta komponentista, joka oli aikavälillä 340–415 millisekuntia vahvempi normaalisti lukevilla /y^{fh}/-äänteeseen kuin dyslektisillä lukijoilla. Se oli kontroleilla myös vahvempi /y^{fh}/-äänteeseen kuin muihin äänteisiin lukuun ottamatta aikaikkunaa 395 millisekuntia, jolloin se erosi vain /y^{ge}/-vasteesta. Topografiakuvien perusteella temporaalinen positiivisuus oli dyslektisillä lukijoilla heikompi kuin kontroleilla ja sijoittui ylemmäs. T-testit osoittivat, että temporaalikanavien aktivaatio /y^{fh}/-äänteeseen ei ollut dyslektisillä lukijoilla merkitsevää.

LDN:n tyypillisellä esiintymisalueella sentraali- ja frontaalialueilla eroja ryhmien välillä havaittiin vähemmän ja lähinnä myöhäisimmillä aikaikkunoilla. Frontaalialueella ero oli merkitsevä lähinnä aikaikkunalla 415 millisekuntia, jolloin kontroleilla havaittiin negatiivisemmat vasteet /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen, kun taas dyslektisillä lukijoilla molemmat vasteet olivat positiivisia. Toinen ero frontaalialueella havaittiin aikaikkunalla 375 millisekuntia, mutta se näytti syntyvän lähinnä eroista /y^{ge}/-vasteesta. Sentraalialueella ryhmäeroja löydettiin vain aikaikkunalla 490 millisekuntia /y^{fh}/- ja /y^{ge}/-vasteiden välillä. Kontroleilla näytti olevan vahvempi negatiivinen aktivaatio /y^{fh}/-äänteeseen kuin dyslektisillä lukijoilla, joilla vaste oli positiivinen. Ero ei ollut kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä. Sen sijaan kontrollien vaste oli merkitsevästi suurempi /y^{fh}/- kuin /y^{ge}/-äänteeseen toisin kuin dyslektisillä lukijoilla, joilla vasteet eivät eronneet toisistaan. Frontaali- ja sentraalialueilla havaitut erot näyttivät siis tukevan käsitystä siitä, että kontroleilla oli vahvempi aktivaatio prototyypiseen kuin epäprototyypiseen äänteeseen, kun taas dyslektisillä lukijoilla vasteet eivät eronneet.

Se, että ryhmien keskinäisissä vertailuissa eroja havaittiin vähän frontaali- ja sentraalialueilla, saattaa selittyä sillä, että eroa testattiin vain muutamalta kanavalta. Suurimmat erot aktivaatioissa eivät välttämättä osuneet juuri näille kanaville, sillä esimerkiksi frontaalialueilla dyslektisillä lukijoilla epänormaalia aktivaatiota näytti kuvien perusteella ilmenevän vahvimmin vertailtujen kanavien vieressä. T-testit osoittivatkin, että verratuilla frontaalikanavilla ei dyslektisillä lukijoilla

ilmennyt juuri lainkaan merkitsevää LDN-aktivaatiota lukuun ottamatta aikaikkunaa 490 ms. Tämä viittaa siihen, että dyslektisillä lukijoilla ei ilmene frontaalista LDN-komponenttia varhaisimmissa LDN-prosessoinnin vaiheissa ainakaan samalla alueella kuin kontrolleilla. Myöhäisemmässä prosessointivaiheessa aktivaatio saattaa kuitenkin normalisoitua, mikä näkyi esimerkiksi siinä, että /y^{fn}/-äänteen vaste oli dyslektisillä lukijoilla aikaikkunalla 490 millisekuntia suurempi kuin /y^{ge}/-äänteen vaste. Sentraalialueiden erojen vähäisyys ei kuitenkaan näyttänyt topografiakuvien tarkastelun perusteella selittyvän kanavavalinnoilla, sillä dyslektisillä lukijoilla aktivaatio näytti keskittyvän verratuille kanaville. T-testit paljastivat kuitenkin, että dyslektisillä lukijoilla /y^{fn}/-äänteen sentraalialueiden aktivaatio ei ollut merkitsevä lukuun ottamatta aikaikkunaa 395 millisekuntia. Tällöinkin aktivaatiota havaittiin vain C6-kanavalla ja se oli positiivista. Dyslektisillä lukijoilla ei siis näyttänyt ilmenevän LDN-tyyppistä aktivaatiota sentraalialueilla toisin kuin normaalisti lukevilla, joilla ilmeni vahvaa negatiivista aktivaatiota lähes kaikilla aikaikkunoilla. Myös muut tutkijat ovat havainneet dyslektikoilla poikkeavia LDN-vasteita sentraalialueilla. Esimerkiksi Alonso-Bua ym. (2005) huomasivat, että sentraalialueilla havaittu LDN näyttää heikentyvän dyslektikoilla 4–6-vuotiaasta kahdeksaan ikävuoteen mennessä, kun taas normaalisti lukevilla vasteet säilyvät samanlaisina.

Ryhmävertailujen lisäksi dyslektisten lukijoiden poikkeava LDN-prosessointi ilmeni myös ryhmien sisäisessä vertailuissa. Normaalisti lukevilla aktivaatiot poikkesivat eri äänteiden välillä kaikilla aikaikkunoilla, kun taas dyslektisillä lukijoilla eroja ilmeni lähinnä aikaikkunalla 490 millisekuntia. Oletusten mukaisesti kontrolleilla havaitut erot vasteissa ilmenivät aina siten, että /y^{fn}/-vasteet olivat suurempia kuin joko /y^{fr}/- tai /y^{ge}/-vasteet. Dyslektisillä lukijoilla aktivaatio oli aikaikkunalla 490 millisekuntia vahvempaa frontaalisesti /y^{fn}/- kuin /y^{fr}/-äänteeseen ja sentraalisesti puolestaan vahvempaa /y^{fr}/-äänteeseen kuin prototyypiseen äidinkielen äänteeseen. Näiden erojen lisäksi dyslektisillä lukijoilla vasteet poikkesivat äänteiden välillä vain aikaikkunalla 375 millisekuntia, jolloin /y^{fn}/- ja /y^{ge}/-vasteet erosivat toisistaan parietaalialueella. Kaiken kaikkiaan dyslektisillä lukijoilla ei siis juurikaan havaittu eroja vasteiden välillä. Tämä tukee käsitystä dyslektisten lukijoiden epänormaalista ja mahdollisesti allofonisesta puheen prosessoinnista. Serniclaes ym. (2004) ovat esittäneet, että allofonisesta prosessoinnista johtuen dyslektikot kiinnittävät huomiota ymmärtämisen kannalta epäolennaisiin äänteiden vaihteluihin, mikä puolestaan viittaa heikkoihin edustuksiin äidinkielen äänteestä. Se, että prototyypiseen äänteeseen syntyvä aktivaatio oli dyslektisillä lukijoilla kuitenkin vahvempaa kuin epäprototyypisen äänteen aktivaatio frontaalialueella aikaikkunalla 490 millisekuntia, viittaa siihen, että LDN-prosessointi alkaa mahdollisesti normalisoitua myöhäisimmissä vaiheissa ainakin frontaalialueilla.

Serniclaesin ym. (2004) teoriaa seuraten olisi voinut olettaa, että dyslektisillä lukijoilla

aktivaatiot olisivat vahvempia epäprototyypisiin äänteisiin kuin normaalisti lukevilla, koska he prosessoivat myös näitä äännteitä, kun taas normaalisti lukevilla reagointi on vaimentunut epäolennaisiin variaatioihin. Oletuksien vastaisesti dyslektisillä lukijoilla ei kuitenkaan juuri havaittu tilastollisissa ryhmävertailuissa vahvempaa aktivaatiota epäprototyypisiin äänteisiin kuin normaalisti lukevilla. Täytyy kuitenkin muistaa, että Serniclaesin ym. teorian yhdistäminen LDN-vasteeseen ei ole yksiselitteistä, sillä he tutkivat eroja behavioraalisilla erottelutehtävillä eivätkä ole esittäneet niiden mahdollisia yhteyksiä herätevasteisiin. Serniclaes ym. olettavat, että dyslektikot reagoivat foneemikategorian sisäisiin eroihin normaalisti lukevia vahvemmin, koska heidän reagointinsa epäolennaisiin puheen variaatioihin ei ole estynyt. Normaalisissa kehityksessä prototyypisistä äidinkielen äännteistä muodostetut muistiedustukset alkavat vaikuttaa varhain puheen havainnointiin, jolloin magneettiefekti estää epäolennaisten variaatioiden erottelun (Kuhl ym., 1992; Kuhl ym, 2005). Allofonisesta havainnoinnista johtuen dyslektikot saavat kuitenkin epäjohdonmukaisempaa altistumista äidinkielen foneemeille, joten heille syntyy äidinkielen äännteistä heikkommat muistijäljet. Samasta syystä voisi olettaa myös epäprototyypisten äännteiden muistijälkien olevan heikkoja. Jos LDN indeksoi foneettista muistijälkeä, ei ehkä voidakaan olettaa, että dyslektisillä lukijoilla syntyisi normaalisti lukevia vahvempia LDN-vasteita epäprototyypisiin äännteisiin, sillä dyslektikoilla on kaikista äännteistä heikot foneettiset muistijäljet. Topografiakuvien perusteella näyttikin siltä, että dyslektisillä lukijoilla oli vahvoja aktivaatioita kaikkiin äännteisiin, mutta niitä esiintyi varsin eri alueilla kuin kontrolleilla ja ne olivat monesti positiivisia, kun taas kontrolleilla pääasiassa negatiivisia. Näin ollen niiden ei voida ajatella edustavan tyypillistä LDN-prosessointia.

Oletus siitä, että eroja ilmenisi normaalisti lukevilla erityisesti /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-äännteiden välillä, sai osittain tukea. Temporaaalisen aktivaation osalta (temporaalinen positiivisuus ja ylempi temporaalialue) näytti siltä, että aktivaatiot poikkesivat lähes aina molemmista epäprototyypisistä äännteistä tai ainakin kauempana prototyypistä olevasta /y^{fr}/-äännteestä. Kontrolleilla havaittiin prototyypiseen äännteeseen myös aikaikkunalta 340 millisekuntia aikaikkunalle 415 millisekuntia parietaalialueella jatkuva positiivinen aktivaatio, joka erosi /y^{fh}/- ja /y^{fr}/-vasteiden välillä. Prototyypiseen äännteeseen syntynyt negatiivinen sentraalivaste poikkesi aikaikkunalta 340 millisekuntia alkaen /y^{ge}/-äännteestä, mutta erosi myös /y^{fr}/-äännteestä aikaikkunoilla 375 ja 395 ms. /y^{fh}/-äännteen frontaalinen aktivaatio poikkesi /y^{ge}/-äännteestä ensin aikaikkunalla 375 ms ja myöhemmin uudestaan aikaikkunalla 415 millisekuntia. Aikaikkunalla 490 ms se erosi kuitenkin vain /y^{fr}/-äännteestä. Vaikutti siis siltä, että temporaaalisella alueella suurimmat erot syntyivät oletusten mukaisesti prototyypisen äännteen ja molempien epäprototyypisten äännteiden tai ainakin kauempana prototyypistä olevan vieraan kielen äännteen välillä. Sentraali- ja frontaalialueilla

prosessointi oli sen sijaan vaihtelevampaa poiketen usein enemmän /y^{fh}/-/y^{ge}/- kuin /y^{fh}/-/y^{fr}/-kontrastiparien välillä. Parietaalialueella ilmenneen vasteen merkitys on epäselvä, koska LDN-prosessoinnin voisi olettaa liittyvän lähinnä fronto-sentraali- ja temporaalialueiden prosessointiin. Voi olla, että tämä positiivinen aktivaatio liittyi sentraalialueen negatiiviseen aktivaatioon.

Kaiken kaikkiaan vaikutti siis siltä, että normaalisti lukevilla LDN oli oletusten mukaisesti vahvempi prototyyppiseen kuin epäprototyyppiseen äänteeseen. Dyslektisillä lukijoilla LDN-aktivaatiota ei sen sijaan syntynyt /y^{fh}/-äänteeseen ainakaan tyypillisillä LDN-vasteen ilmenemisalueilla. LDN-tyypistä aktivaatiota havaittiin ainoastaan frontaalialueella aikaikkunalla 490 millisekuntia. Tämä havainto on yhdenmukainen Maurerin ym. (2003) tutkimuksen kanssa, jossa huomattiin, että dyslektikoiden frontaalisesti mitattu LDN-amplitudi puheäänitehtävissä (tutkittuna aikaväliltä 457–636 ms) ei eronnut kontroleista. Kuitenkin Schulte-Körne ym. (2001) ovat havainneet, että myöhäisellä LDN-aikaikkunalla (latenssi n. 460–490) kontroleilla oli vahvempi amplitudi FZ-kanavalla kuin dyslektikoilla. Tutkimuksen koehenkilöt olivat kuitenkin aikuisia, joten tuloksia ei voi suoraan verrata tähän tutkimukseen. Sentraali- ja temporaalialueilla ei tässä tutkimuksessa ilmennyt dyslektisillä lukijoilla prototyyppiseen äänteeseen missään prosessointivaiheessa samantyyppistä aktivaatiota kuin normaalisti lukevilla. Se, että tilastovertailuissa ei ryhmien välisiä eroja havaittu enää frontaali- ja temporaalialueilla aikaikkunalla 490 millisekuntia, viittaisi kuitenkin siihen, että dyslektisten lukijoiden LDN-vaste saattaisi osittain normalisoitua myöhemmissä prosessointivaiheissa. Tätä näkemystä tukevat havainnot siitä, että dyslektikoilla on aiemmissa tutkimuksissa ilmennyt myöhäisempi LDN-latenssi (ks. esim. Alonso-Bua ym., 2006), jolloin eroja voisi olettaakin ilmenevän enemmän varhaisemmassa prosessoinnissa.

Tulokset osoittavat, että prototyyppisten äänteiden myöhäinen erotteluprosessointi on dyslektisillä lukijoilla heikkoa. Aiemmat tutkimukset tukevatkin käsitystä heikommasta kielellisten äänteiden myöhäisestä prosessoinnista dyslektikoilla (ks. esim. Alonso-Bua ym., 2006; Schulte-Körne ym., 1998; Schulte-Körne ym., 2001). Se, mitä tämä poikkeavuus LDN-vasteessa kertoo nimenomaan prototyyppisten äidinkielen äänteiden prosessoinnista, on kuitenkin epäselvää, sillä sitä ei ole tietääksemme tutkittu aiemmin. Prototyyppisen äänten LDN-vasteen puuttuminen saattaa viitata heikkoihin muistiedustuksiin äidinkielen äänteestä, mikäli LDN-vasteen ajatellaan ilmentävän muistiedustuksia, niin kuin esimerkiksi Barry ym. (2009) ovat ehdottaneet. Myös Shestakova ym. (2003) ovat osoittaneet että LDN-vaste on vahvempi lapsilla, joilla on syntynyt muistijälki äänteestä. He kuitenkin tulkitsivat LDN-vasteen kuvastavan tarkkaavuuden uudelleen orientoitumista. Tämä selitys vaikuttaa kuitenkin epätodennäköiseltä, sillä esimerkiksi Hämäläinen ym. (2008) ovat osoittaneet, että tarkkaavaisuuden suuntaamista ilmentävä P3-vaste näyttää olevan

irrationaalinen LDN-vasteesta. LDN-vasteen liittymistä muistiedustuksiin tukee myös se, että LDN-vastetta muistuttavassa MMN-vasteessa on aiemmin havaittu samanlaista vaihtelua äidinkielen ja vieraan kielen äänteiden välillä. Esimerkiksi Näätänen ym. (1997) ovat osoittaneet, että MMN on heikempi silloin, kun muistijäljet äänteestä ovat heikkoja. Vastaavasti tässä tutkimuksessa havaittiin, että normaalisti lukevilla LDN-vaste oli vahvempi prototyyppiseen äänteeseen kuin epäprototyyppiseen. Dyslektisten lukijoiden heikko LDN-vaste prototyyppiseen äänteeseen näyttää siis viittaavan heikkoihin muistiedustuksiin (ks. esim. Godfrey ym., 1981; Serniclaes ym., 2001).

Rajoitukset ja tutkimuksen merkitys

Tämän tutkimuksen tulokset kuvastavat todennäköisesti hyvin normaalisti lukevien ja dyslektisten suomalaislasten LDN-aktivaatiota äidinkielen ja vieraan kielen puheäänteisiin, sillä otos oli edustava ($N = 72$) ja aktivaatiota mitattiin usealla eri aivoalueella ja aikaikkunalla. Tutkimus antaa luultavasti myös hyvän kuvan normaalisti lukevien ja dyslektisten lasten LDN-aktivaation eroista. Tutkimuksen lähtökohdaksi otettiin normaalisti lukevien LDN-aktivaatio, johon dyslektisten lukijoiden vasteita verrattiin. Näin ollen joitakin olennaisia aktivaatioalueita saattoi jäädä vertailun ulkopuolelle. Tutkimus kuitenkin osoitti, että dyslektisillä lukijoilla LDN-vastetta ei ilmennyt samoilla alueilla kuin normaalisti lukevilla, joten aktivaatio oli poikkeavaa.

On kuitenkin huomioitava, että lapset sijoitettiin dyslektiktisesti lukevien ryhmään ainoastaan yhden testin eli Lukilassen tuloksen perusteella. Tämä testi antaa hyvän käsityksen lukusujuvuudesta, joka on merkittävä osa lukihäiriötä säännöllisen ortografian kielissä. Dyslektikot saattavat kuitenkin jakautua useampaan alaryhmään ja erota toisistaan fonologisen ja nopean ärsykkeiden prosessoinnin perusteella (ks. esim. Snowling ym., 2006). Voi olla, että näillä eri alaryhmillä on myös erilainen LDN-prosessointi. Tämän vuoksi tuloksien yleistäminen dyslektikoihin yhtenäisenä ryhmänä on epävarmempaa. On huomioitava myös, että tässä tutkimuksessa eri aivoalueita tutkittiin yhdistämällä kanavia ryppäisiksi ja tilastoanalyysit tehtiin erikseen kullekin kanavajoukolle. Näin ollen positiivisten ja negatiivisten vasteiden välisiä dipoleita ei voitu tarkastella yhtenäisesti eikä siis voitu suoraan verrata dipolirakenteiden eroja ryhmien välillä. Aktivaatioiden lähteistä ja yhteyksistä voisikin saada paremman kuvan esimerkiksi lähteenpaikannusmenetelmillä (source analysis). Jatkossa kanavavalinnat voitaisiin myös sovittaa paremmin molempia ryhmiä vastaaviksi ja testata ennen lopullista valintaa, millä alueilla eroja

näyttäisi eniten syntyvän. Yksi vaihtoehto verrattavien aivoalueiden valintaan olisi myös spatiaalinen pääkomponenttianalyysi, joka yhdistää samalla tavalla aktivoituvia kanavia yhtenäisiksi alueiksi.

Johtopäätökset

LDN-vasteen aikaikkunoiden vertaileminen osoitti, että se jakautuu alaprosesseihin, joihin liittyy eri aivoalueiden aktivoituminen. LDN-vasteena on yleisesti mitattu lähinnä myöhemmin ilmaantuvaa fronto-sentraalista negatiivisuutta. Näyttäisi siltä, että LDN alkaa kuitenkin erottua noin 340 millisekuntia ärsykkeen esittämisen jälkeen negatiivisena sentraalisena ja positiivisena temporaalisena aktivaationa. LDN saavuttaa huippunsa noin 400 millisekunnin kohdalla, jolloin se on vahvinta temporaalisesti ja frontaalisesti. Tämän jälkeen temporaalinen aktivaatio alkaa heikentyä, ja toinen huippu ilmenee noin 500 millisekunnin kohdalla, jolloin vaste on negatiivinen fronto-sentraalisesti.

LDN:n merkityksestä on vaikeaa esittää arviota tämän tutkimuksen perusteella, sillä ärsykkeinä oli vain puheäänteitä ja LDN-vastetta on vielä tutkittu niin vähän, että sen topografinen ja ajallinen paikallistaminenkaan ei ole ongelmattonta. Se, että prototyypisten ja epäprototyypisten äänteiden LDN-vaste kuitenkin noudatteli aiemmin MMN-vasteessa havaittua eroa äidinkielen ja vieraan kielen äänteiden prosessoinnin välillä (ks. esim. Näätänen ym., 1997; Winkler ym., 1999) normaalisti lukevilla, viittaa siihen, että LDN saattaisi indeksoida jonkinlaista foneettista edustusta. Se, miten tämä edustus eroaa MMN-vasteen muistijälkiedustuksesta, on kuitenkin epäselvää. MMN-vasteen on esitetty syntyvän lähinnä akustisten erojen havaitsemisesta, mutta se voi kuitenkin epäsuorasti ilmentää myös foneettisia edustuksia, koska akustinen erottelu on helpompaa, kun poikkeavasta äänneestä on olemassa valmis muistijälki (Näätänen 1995). MMN ei siis varsinaisesti itsessään kuvasta foneettista prosessointia, se vain indikoi tällaisten muistijälkien olemassaoloa. LDN ilmenee kuitenkin huomattavasti myöhemmin kuin MMN, joten sen oletetaan liittyvän korkeammantasoiseen kognitiiviseen prosessointiin (ks. esim. Čeponienė ym., 2004). Ei ole kuitenkaan selvää, mitä tämä ylemmän tason kognitiivinen prosessointi voisi olla. Se voisi esimerkiksi liittyä äänne foneettiseen prosessointiin, kun on ensin havaittu akustinen ero. Barry ym. (2009) ovat esimerkiksi ehdottaneet, että LDN kuvastaa fonologisen edustuksen muodostamista eli toistetun äänne tallentamista lyhytkestoiseen muistiin. Tällöin se ei edustaisikaan valmiin

muistijäljen aktivoitumista kuten MMN vaan sen aktiivista muodostamista.

LDN:n merkityksen tarkempi selvittäminen vaatisi sen vertaamista puhe- ja ei-puheäänteisiin sekä muihin vasteisiin, kuten esimerkiksi MMN:ään. MMN- ja LDN-vasteiden välinen suhde on vielä melko epäselvä. Voisikin olla mielenkiintoista selvittää samassa tutkimuksessa, miten äidinkielen ja vieraan kielen äänteisiin syntyvät MMN- ja LDN-vasteet erovat dyslektikoilla ja normaalisti lukevilla. Serniclaesin ym. (2004) teorian perusteella voisi esimerkiksi olettaa, että MMN saattaisi ilmetä vahvana dyslektikoilla sekä äidinkielen että vieraan kielen äänteisiin, sillä dyslektikoilla on säilynyt valmius reagoida äänteiden akustisiin muutoksiin. Koska MMN liittyy enemmän akustiseen kuin fonologiseen prosessointiin, voisi olettaa, että siinä ei välttämättä ilmenisi niin suuria eroja kuin LDN-vasteessa, joka taas edustaa mahdollisesti fonologista prosessointia. Joissakin tutkimuksissa onkin havaittu, että eroja dyslektikkojen ja kontrollien välillä syntyi vain LDN-vasteessa, kun taas MMN ei eronnut ryhmien välillä (Schulte-Körne ym., 2001).

Tämä tutkimus antoi tukea käsitykselle siitä, että äidinkielen äänten edustukset ovat dyslektisillä lukijoilla normaalisti lukevia heikompia (ks. Godfrey ym., 1981). Tämä näkyi erityisesti temporaalialueen vasteissa, mutta myös frontaali- ja sentraalialueilla, joilla LDN oli vahvempi normaalisti lukevilla prototyypiseen äänteeseen, kun taas dyslektisillä lukijoilla aktivaatiot eivät eronneet äänteiden välillä. Dyslektisillä lukijoilla LDN-vastetta ei näyttänyt juuri ilmenevän ainakaan samoilla aivoalueilla kuin normaalisti lukevilla. Dyslektiset lukijat saattoivatkin reagoida herkemmin puheen epäolennaisiin variaatioihin, kuten Serniclaes ym. (2004) ja Hommet ym. (2009) ovat esittäneet, mikä näkyi epätyypillisenä aktivaationa. Hommet ym. (2009) esimerkiksi havaitsivat, että LDN-aktivaatio oli dyslektikoilla heikompi tyypillisillä alueilla, mutta heillä ilmeni kontroleista poiketen ylimääräisiä aktivaatiolähteitä. Vaikuttaisi siis siltä, että dyslektiset lukijat kiinnittävät huomiota puheen epäolennaisiin variaatioihin, jolloin prototyypistä äännettä ei erotella sen paremmin kuin muitakaan äänneitä (ks. Serniclaes ym., 2001), mikä puolestaan vaikeuttaa sujuvaa puheenprosessointia (ks. esim. Kuhl ym., 2005; Rivera-Gaxiola ym., 2005). Näin allofoninen havaitseminen estää siis normaalin magneettiefektiin pohjautuvan (ks. Kuhl ym., 1992; Kuhl, 1993) puheen prosessoinnin, minkä vuoksi äidinkielen äänneistä syntyy heikommat edustukset.

LDN-vaste näyttääkin liittyvän muistiedustuksiin, ja sitä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää testattaessa foneettisia edustuksia. Se saattaa esimerkiksi tuoda esiin sellaisia eroja, joita MMN-vaste ei paljasta. LDN-vasteen tarkempi tutkiminen voisikin tuoda lisävalaistusta lukihäiriön taustalla oleviin ongelmiin, sillä se vaikuttaisi indeksoivan juuri foneettista prosessointia. Kun LDN:n merkitys on saatu selvitettyä tarkemmin, sitä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää paremmin myös kliinisissä tutkimuksissa ja esimerkiksi lukihäiriöiden varhaisessa tunnistamisessa.

LÄHTEET

- Aaltonen, O., Eerola, O., Hellström, Å., Uusipaikka, E., & Lang, A. H. (1997). Perceptual magnet effect in the light of behavioral and psychophysiological data. *Journal of Acoustical Society of America*, 101, 1090–1103.
- Alonso-Búa, B., Diaz, F., & Ferraces, M. J. (2006). The contribution of AERPs (MMN and LDN) to studying temporal vs. linguistic processing deficits in children with reading difficulties. *International journal of Psychophysiology*, 59, 159–167.
- Barry, J. G., Hardiman, M. J., & Bishop, D. V. M. (2009). Mismatch Response to Polysyllabic Nonwords: A Neurophysiological Signature of Language Learning Capacity. *PLoS ONE*, 4 (7).
- Best, C. T., McRoberts, G. W., Lafleur, R., & Silver-Isenstadt, J. (1995). Divergent Developmental Patterns for Infants' Perception of Two Nonnative Consonant Contrasts. *Infant Behavior and Development*, 18, 339–350.
- Best, C. T., McRoberts, G. W., & Goodell, E. (2001). Discrimination of non-native consonant contrasts varying in perceptual assimilation to the listener's native phonological system. *Acoustical Society of America*, 109, 775–794.
- Čeponienė, R., Cheour, M., & Näätänen, R. (1998). Interstimulus interval and auditory event-related potentials in children: evidence for multiple generators. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 108, 345–354.
- Čeponienė, R., Yaguchi, K., Shestakova, A., Alku, P., Suominen, K., & Näätänen, R. (2002). Sound complexity and 'speechness' effects on pre-attentive auditory discrimination in children. *International Journal of Psychophysiology*, 43, 199–211.
- Čeponienė, R., Lepistö, T., Soininen, M., Aronen, E., Alku, P., & Näätänen, R. (2004). Event-related potentials associated with sound discrimination versus novelty detection in children. *Psychophysiology*, 41, 130–141.

- Cheour, M., Čeponienė, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K., & Näätänen, R. (1998). Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature neuroscience*, 1 (5), 351–353.
- Deza, E. & Deza, M. M. (2009). *Encyclopedia of Distances*. Berlin: Springer.
- Dien, J., Spencer, K. M., & Donchin, E. (2003). Localization of the Event-Related Potential Novelty Response as Defined by Principal Components Analysis. *Cognitive Brain Research*, 17, 637–650.
- Dien, J. & Frishkoff, G. A. (2005) Principal Components Analysis of ERP Data. Teoksessa (toim.), Handy, T. C. *Event-Related Potentials. A Methods Handbook*. (s. 189–209). Massachusetts: MIT Press.
- Fitch, R. H., Miller, S., & Tallal, P. (1997). Neurobiology of Speech Perception. *Annual Review of Neuroscience*, 20, 331–353.
- Gerrits, E. & Bree, E. (2009). Early language development of children at familial risk of dyslexia: Speech perception and production. *Journal of Communication Disorders*, 42, 180–194.
- Godfrey, J. J., Syrdal-Lasky, A. K., Millay, K. K., & Knox, C. M. (1981). Performance of Dyslexic Children on Speech Perception Tests. *Journal of Experimental Child Psychology*, 32, 401–424.
- Goswami, U. (2002). Phonology, Reading Development, and Dyslexia: A Cross-Linguistic Perspective. *Annals of Dyslexia*, 52, 141–163.
- Guenther, F. H. & Gjaja, M. N. (1996). The Perceptual Magnet Effect as an Emergent Property of Neural Map Formation. *Journal of Acoustical Society of America*, 100, 1111–1121.
- Habib, M. (2000). The neurological basis of developmental dyslexia. An overview and working hypothesis. *Brain*, 123, 2373–2399.
- Hommet, C., Vidal, J., Roux, S., Blanc, R., Barthez, M. A., De Becque, B., Barthelemy, C., Bruneau, N., & Gomot, M. (2009). Topography of syllable change-detection electrophysiological

indices in children and adults with reading disabilities. *Neuropsychologia*, 47, 761–770.

Honbolygó, F., Leppänen, P., Hämäläinen, J., Iannuzzi, S., Lohvansuu, K., Nenert, R., Neuhoff, N., Bruder, J., Streiftau, S., Tanskanen, A., Bartling, J., Tuomainen, J., Schulte-Körne, G., Demonet, J.-F., & Csépe, V. (in press) The dynamic nature of vowel processing: MMN to native prototypes of four European languages.

Hämäläinen, J. A., Leppänen, P. H. T., Guttorm, T. K., & Lyytinen, H. (2008). Event-related potentials to pitch and rise time change in children with reading disabilities and typically reading children. *Clinical Neurophysiology*, 119, 100–115.

Iverson, P. & Kuhl, P. K. (1995). Mapping the perceptual magnet effect for speech using signal detection theory and multidimensional scaling, *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 553–562.

Iverson, P. & Kuhl, P. K. (2000). Perceptual magnet and phoneme boundary effects in speech perception: Do they arise from a common mechanism? *Perception & Psychophysics*, 62, 874–886.

Kayser, J. & Tenke, C.E. (2006). Principal component analysis of Laplacian waveforms as a generic method for identifying ERP generator patterns: II. Adequacy of low-density estimates. *Clinical Neurophysiology*, 117, 369–380.

Kirmse, U., Ylinen, S., Tervaniemi, M., Vainio, M., Schröger, E., & Jacobsen, T. (2008) Modulation of the mismatch negativity (MMN) to vowel duration changes in native speakers of Finnish and German as a result of language experience. *International Journal of Psychophysiology*, 67, 131–143.

Kluender, K. R., Dieh, R. L., & Wright, B. A. (1988). Vowel-length differences before voiced and voiceless consonants: An auditory explanation. *Journal of Phonetics*, 16, 152–169.

Korpilahti, P. (1996). *Electrophysiological correlates of auditory perception in normal and language impaired children*. Turku: Painosalama Oy

Korpilahti, P., Krause, C. M., Holopainen, I., & Lang, A. H. (2001). Early and Late Mismatch

Negativity Elicited by Words and Speech-Like Stimuli in Children. *Brain and Language*, 76, 332–339.

Kuhl, P. K. & Miller, J. D. (1975) Speech perception by the chinchilla: Voiced-voiceless distinction in alveolar plosive consonants. *Science*, 190, 69–72.

Kuhl, P. K. (1991). Human adult and human infants show a “perceptual magnet effect” for the prototypes of speech categories, monkeys do not. *Perception & Psychophysics*, 50, 93–107.

Kuhl, P. K., Williams, K. A., Lacerda, F., Steves, K. N., & Lindblom, B. (1992). Linguistic Experience Alters Phonetic Perception in Infants by 6 Months of Age. *Science*, 255, 606–608.

Kuhl, P. K. (1993). Early linguistic experience and phonetic perception: implications for theories of developmental speech perception. *Journal of Phonetics*, 21, 125–139.

Kuhl, P. K., Conboy, B. T., Padden, D., Nelson, T., & Pruitt, J. (2005). Early Speech Perception and Later Language Development: Implications for the “critical period”. *Language learning and Development*, 1, 237–264.

Liberman, A. M., Harris, H. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The Discrimination of Speech Sounds within and across Phoneme Boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54, 358–368.

Luck, S. J. (2005). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*. Cambridge: MIT Press.

Lyon, G. R., Shaywitz, S., E & Shaywitz, B. A. (2003). PART I Defining Dyslexia, Comorbidity, Teachers’ Knowledge of Language and Reading. A Definition of Dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 53, 1–14.

Lyytinen, H., Guttorm, T. K., Huttunen, T., Hämäläinen, J., Leppänen, P. H. T., & Vesterinen, M. (2005). Psychophysiology of developmental dyslexia: a review of findings including studies of children at risk for dyslexia. *Journal of Neurolinguistics*, 18, 167–195

- Maurer, U., Bucher, K., Brem, S., & Brandeis, D. (2003). Altered responses to tone and phoneme mismatch in kindergartners at familial dyslexia risk. *Neuroreport*, 14 (17), 2245–2250.
- McBride-Chang, C. (1995). Phonological Processing, Speech Perception and Reading Disability: An Integrative Review. *Educational Psychologist*, 30 (3), 109–121.
- Mody, M., Studdert-Kennedy, M., & Brafy, S. (1997). Speech Perception Deficits in Poor Readers: Auditory Processing or Phonological Coding. *Journal of Experimental Child Psychology*, 64, 199–231.
- Näätänen, R. (1989). Herätepotentiaalit ja kognitiiviset prosessit. *Psykologia*, 24, 436–449.
- Näätänen, R. & Lyytinen, H. (1989). Event-related potentials and the orienting response to nonsignal stimuli at fast stimulus rates. *Psychobiology: Issues and Applications*, 6, 185–197.
- Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennest, M., Cheour, M., Huotilainen, M., Iivonen, A., Vainio, M., Alku, P., Ilmoniemi, R. J., Luuks, A., Alliks, J., Sinkkonen, J., & Alho K. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, 385, 432–434.
- Philips, C. (2001). Levels of representation in the electrophysiology of speech perception. *Cognitive Science*. 25, 711–731.
- Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson JR. R., Miller, G. A., Ritter, W., Ruchkin, D. S., Rugg, M. D., & Taylor, M. J. (2000). Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: Recording standards and publication criteria *Psychophysiology*, 37, 127–152.
- Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: Specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current opinion in Neuropsychology*, 13, 212–218.
- Reed., M. A. (1989). Speech Perception and the Discrimination of Brief Auditory Cues in Reading Disabled Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 48, 270–292.
- Rivera-Gaxiola, M., Klarman, L., Garcia-Sierra, A., & Kuhl, P. K. (2005). Neural patterns to speech

and vocabulary growth in American infants. *NeuroReport*, 16, 495–498.

Savela, J., Kujala, T., Tuomainen, J., Ek, M., Aaltonen, O., & Näätänen, R. (2003). The mismatch negativity and reaction time as indices of the perceptual distance between the corresponding vowels of two related languages. *Cognitive Brain Research*, 16, 250–256.

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

Schulte-Körne, G., Deimel, W., Bartling, J., Remschmidt, H. (2001). Speech perception deficit in dyslexic adults as measured by mismatch negativity (MMN). *International Journal of Psychophysiology*, 40, 77–87.

Serniclaes, W., Sprenger-Charolles, L., Carré, R., & Demonet, J-F. (2001). Perceptual Discrimination of Speech Sounds in Developmental Dyslexia. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, 44, 384–399.

Serniclaes, W., Van Hege, S., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 336–361.

Sharma, A. & Dorman, M. F. (1998). Exploration of the perceptual magnet effect using the mismatch negativity auditory evoked potential. *Acoustical Society of America*, 104, 511–517.

Shestakova, A., Huotilainen, M., Čeponienė, R., & Cheour, M. (2003). Event-related potentials associated with second language learning in children. *Clinical Neurophysiology*, 114, 1507–1512.

Snowling, M. J. (2006). Language skills and learning to read: the dyslexia spectrum. Teoksessa Snowling, M. J., & Stackhouse, J. (toim.), *Dyslexia, Speech and language: A Practitioner's Handbook*, 2. painos (s. 1–15). London: Whurr Publishers.

Spencer, K. M., Dien, J., & Donchin, E. (1999). A componential analysis of the ERP elicited by novel events using a dense electrode array. *Psychophysiology*, 36, 409–414.

Srinivasan, R. (2005). High Resolution EEG: Theory and Practice. Teoksessa Handy, T. C. (toim.), *Event-Related Potentials. A Methods Handbook*. (s. 167–189). Massachusetts: MIT Press.

Stein, J., & Talcot, J. (1999). Impaired Neuronal Timing in Developmental Dyslexia- the Magnocellular Hypothesis. *Dyslexia*, 5, 59–77.

Tallal, P. (1980). Auditory Temporal Perception, Phonics, and Reading Disabilities in Children. *Brain and Language*, 2, 182–198.

Tremblay, K. L & Kraus, N. (2002). Auditory Training Induces Asymmetrical Changes in Cortical Neural Activity. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 45, 564–572.

Vellutino, F. R., Fletcher, J. M., Snowling, M. J., & Scanlon, D. M. (2004). Specific reading disability (dyslexia): What have we learned in the past four decades? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 45 (1), 2–40.

Werker, J. F. & Tees, R. C. (1987). Speech Perception in Severely Disabled and Average Reading Children. *Canadian Journal of Psychology*, 41 (1), 49–54.

Winkler, I., Lehtokoski, A., Alku, P., Vainio, M., Czigler, I., Csépe, V., Aaltonen, O., Raimo, I., Alho, K., Lang, H., Iivonen, A., & Näätänen, R. (1999). Pre-attentive detection of vowel contrasts utilizes both phonetic and auditory memory representations. *Cognitive Brain research*, 7, 357–369.