

MISMATCH NEGATIVITY (MMN) -VASTE PUHEEN HAVAITSEMISEN HEIJASTAJANA

Teija Kujala ja Minna Huotilainen
Helsingin yliopiston tutkijakollegium,
Kognitiivisen aivotutkimuksen yksikkö, psykologian laitos
ja Helsingin aivotutkimuskeskus, Helsingin yliopisto
teija.m.kujala@helsinki.fi; minna.huotilainen@helsinki.fi

Risto Näätänen
Kognitiivisen aivotutkimuksen yksikkö, psykologian laitos ja
Helsingin aivotutkimusyksikkö, Helsingin yliopisto
risto.naatanen@helsinki.fi

Selvitettäessä äidinkielen ja vieraiden kielten äänneiden havaitsemista aivojen herätevasteisiin kuuluva mismatch negativity (MMN) on osoittautunut erinomaiseksi menetelmäksi behavioraalisten tutkimustulosten täydentäjänä. MMN-vaste syntyy mille tahansa havaittavissaolevalle muutokselle muuten homogeenisessa ääniympäristössä. Se syntyy myös silloin, kun ääniärsykeitä ei tarkkailla, joten sillä voidaan tutkia jopa vauvojen kuulohavaintoa. MMN heijastaa paitsi äännten fysikaalisten erojen erottelukykystä, myös kielispesifejä muistijälkiä, jotka yleensä painottuvat aivojen vasempaan puoliskoon. MMN:llä pystytään myös selvittämään vieraan kielen oppimisen vaikutuksia aivojen äänne-edustumiin. Erityisen hyödyllinen tämä aivojen reaktio on tutkittaessa lapsen kielen kehitystä. Sen avulla on mm. osoitettu, että äidinkielelle tyypilliset vokaalikategoriat alkavat muodostua vauvoilla 6–12 kuukauden iässä.

Avainsanat: puheäänneiden havaitseminen, kielen oppiminen, aivojen herätevasteet, mismatch negativity (MMN) -vaste

HERÄTEVASTEET PUHEEN HAVAITSEMISEN TUTKIMUKSESSA

Aivojen sähköiset herätevasteet (event-related potentials, ERP) ja niiden magneettiset vastineet (event-related magnetic fields, ERF) kertovat hermosolujen toiminnasta aivojen käsitellessä esimerkiksi ääni-informaatiota. He-

rätevasteet ovat ärsyккеisiin ajallisesti lukkiutuneita, suurten aivosolupopulaatioiden synnyttämiä reaktioita. Niiden avulla voidaan tutkia ärsyккеiden käsittelyä ja siihen liittyviä erilaisia kognitiivisia toimintoja (esim. ärsyккеiden erottelukykystä, kohdeärsyккеen tunnistusta, sensorista muistia tai tarkkaavaisuuden kääntymistä) millisekuntien tarkkuudella (ks. esim. katsaus Näätänen, 1992). Ääniärsyккеille syntyvät, keskilatenssivasteita (middle-latency responses) seuraavat aallot (P1, n. 50 ms; N1, n. 100 ms; P2, n. 200

Kirjeenvaihto osoitteeseen:

Teija Kujala, Kognitiivisen aivotutkimuksen yksikkö,
psykologian laitos, PL 9, 00014 Helsingin yliopisto.

ms ärsykkeen alusta; long-latency responses) heijastavat äänen vastaanottoa ja käsittelyä aivokuorella. Näitä vasteita seuraavat, niiden kanssa osittain päällekkäiset vasteet heijastavat monimutkaisempia havaintotoimintoja. N. 100–250 ms ärsykemuutoksen alusta syntyvä mismatch negatiiviy (MMN) -vaste heijastaa sensorisen muistin toimintaa ja ärsykeiden erottelutarkkuutta (Näätänen, 1992). Sitä seuraava N2b-vaste (n. 200–300 ms ärsykemuutoksesta) poikkeaville äänille tarkkaillussa ärsykesarjassa osoittaa, että ärsykepoikkeama on tietoisesti havaittu (Sokolov ym., 2002). P3a-vasteen esiintyminen (n. 250–300 ms ärsykemuutoksesta) taas viittaa tarkkaavaisuuden tahattomaan kääntymiseen poikkeavaan ärsykeeseen (Donchin ja Coles, 1988), ja sitä seuraavan P3b-vasteen (n. 300–800 ms) saa aikaan kohdeärsyke koehenkilön tarkkailemassa ärsykesarjassa (Picton, 1992). P3b-vasteen on esitetty heijastavan hyvin monenlaisia kognitiivisia prosesseja, ja se on siitä syystä varsin epäspesifi havainnon tutkimuksen kannalta. Näiden lisäksi mainittakoon vielä N400-vaste, joka syntyy, kun virkkeessä esiintyy yhteyteen semanttisesti epäsoveluva sana (Kutas ja Hillyard, 1980).

Herätevasteita on käytetty varsin laajamittaisesti kielellisten prosessien tutkimukseen. Niiden avulla on selvitetty mm. äännetason havaintoa ja erottelua sekä monimutkaisempia kielellisiä toimintoja, kuten semanttista prosessointia. Em. herätevastekomponenteista puheen havaitsemisen tutkimukseen on käytetty varsinkin N1-, MMN-, P3b- ja N400-vastetta. Tässä katsauksessa keskitytään erityisesti MMN-vasteen käyttöön kielellisten prosessien tutkimuksessa.

MMN-VASTE KUULOHAVAINNON MITTARINA

MMN-herätevaste on osoittautunut hyödylliseksi paitsi äänten havainnon ja kuulomuistin tutkimuksessa, myös puheen havaitsemisen taustalla olevia aivotapahtumia selvitettäessä. MMN (Näätänen ym., 1978) on mitattavissa aivojen sähköisiä (elektroencefalografia, EEG) ja magneettisia (magneettoencefalografia, MEG) vasteita rekisteröimällä. Se syntyy reaktiona muutokseen missä tahansa äänen toistuvassa piirteessä (Näätänen, 1992). Sitä on perinteisesti mitattu esittämällä toistuvaa ärsykettä, joka silloin tällöin korvataan siitä jollain tavoin, esim. taajuudeltaan, kestoltaan tai voimakkuudeltaan, poikkeavalla ärsykkeellä (ks. Schröger, 1998, katsaus MMN:n mittaamisesta ja tulokinnasta). Mikäli kuuloaivokuori erottaa nämä kaksi toisistaan, syntyy MMN. Tämän on katsottu perustuvan sille, että toistuva ääni muodostaa hermostollisen muistimallin, johon jokaista uutta ääntä verrataan (Näätänen, 1992). MMN-vaste syntyy, mikäli uusi ääni ei sovi tähän muistimalliin.

MMN on sekä ontogeneettisesti että fylogeneettisesti aikainen vaste. Sitä voidaan rekisteröidä lajikehityksellisesti ihmistä alkeellisemmiltä nisäkkäiltä, kuten kaneilta ja rotilta (Ruusuvirta ym., 1996; 1998), sekä ihmisen kehityksen varhaisvaiheessa, vastasyntyneiltä (Alho ym., 1990; Cheour-Luhtanen ym., 1995; 1996) ja jopa sikiöiltä (Huotilainen ym., lähetetty julkaistavaksi).

MMN syntyy myös muutokselle abstrakteissa ärsykepiirteissä esitettäessä ääniä, jotka rikkovat edellisten äänten muodostaman säännön (Näätänen ym., 2001). Tällöin äänisarjassa ei välttämättä toistukaan tietty ääni, vaan toistuvana seikkana onkin vain tietty sääntö joko äänten välisissä tai äänen osien suhteissa. Esim. Paavilainen ym. (2001) esittivät koehenkilöilleen ääniä, jotka vaih-

relivat taajuudeltaan ja voimakkuudeltaan siten, etteivät ne edustaneet mitään fysikaalisesti identtistä toistuvaa ärsykettä. Sen sijaan ne seurasivat sääntöä ”mitä korkeampi taajuus, sitä voimakkaampi intensiteetti”. Tämän säännön rikkova ääni, esim. korkea hiljainen ääni, synnytti MMN:n.

MMN heijastaa äänten erottelutarkkuutta kuuloaivokuorella. Poikkeavan ja toistuvan äänen välinen fysikaalinen ero vaikuttaa sen amplitudiin ja latenssiin (Sams ym., 1985; Tiitinen ym., 1994). Kun tämä ero pienee, niin MMN:n amplitudi pienenee ja sen latenssi kasvaa. MMN:n onkin havaittu vastaavan äänten behavioraalista erottelutarkkuutta. Tällaisen yhteyden havaitsivat esim. Winkler ym. (1992) tutkimuksessaan, jossa selvitettiin peittoäänien vaikutusta sensorisen muistijäljen muodostumiseen. Kun kunkin toistuvan ja poikkeavan äänen jälkeen 20–50 ms:n kuluttua esitettiin peittoääni, niin poikkeavat äänet eivät synnyttäneet MMN:ää eivätkä koehenkilöt kyenneet behavioraalisesti erottelemaan niitä toistuvista äänistä. Kun tätä aikaväliä kasvatettiin 150 ms:iin, niin MMN syntyi ja poikkeavat äänet myös kyettiin tietoisesti erottelemaan.

Yhteys MMN:n ja äänten erottelutarkkuuden välillä on osoitettu monissa muissakin tutkimuksissa (ks. esim. Lang ym., 1990; Amenedo ja Escera, 2000; Kujala ym., 2001). Esim. Kujala ym. (2001) selvittivät äänten ajallisten piirteiden erottelutarkkuutta esittämällä toistuvana ärsykkeenä kahdesta 500 Hz:n taajuisesta siniäänestä muodostettua paria, jossa äänten välinen (hiljainen) aika oli 120 ms. Poikkeavina ärsykkeinä esitettiin äänipareja, joissa tuo aika oli 100, 60 tai 20 ms. Koehenkilöt eivät kyenneet erottelemaan 100 ms:n ääniparia 120 ms:n ääniparista, eikä se myöskään synnyttänyt MMN-vastetta. Sen sijaan 20 ms:n poikkeava äänipari eroteltiin yli 90 % tarkkuudella ja 60 ms:n ääniparikin vielä 65 % tarkkuudella. MMN:n myös ha-

vaittiin olevan suurempi 20:n kuin 60 ms:n ääniparille. Tutkimuksessa löydettiin lisäksi merkitsevä korrelaatio MMN:n amplitudin ja reaktioaikojen välille.

MMN:n eräs keskeinen ominaisuus on sen syntyminen myös äänille, joita ei tarkkailta (Alho ym., 1992; Näätänen, 1991), millä on huomattava merkitys ajateltaessa vasteen käyttö- ja sovellusmahdollisuuksia. Vasteen alunperinkin havaittiin esiintyvän äänenmuutoksille sellaistenkin äänten joukossa, joihin koehenkilö ei tutkimuksen aikana suunnannut tarkkaavaisuuttaan (Näätänen ym., 1978). Sittemmin vastetta on mitattu yleensä koehenkilön lukiessa kirjaa tai katsellessa äänetöntä videofilmiä. Äänten erottelutarkkuus suoraan aivotoiminnasta mitattuna on puhtaampi indeksi kuin määritettynä koehenkilön behavioraalisista reaktioista, joihin vaikuttavat mm. vireystila, motivaatio ja vastausstrategia. MMN-tutkimus on myös koehenkilön kannalta hyvin miellyttävä verrattuna esim. tilanteeseen, jossa tarkkaillaan ääniä ja reagoidaan niistä tietyn tyyppisiin napinpainalluksella. Niinpä erityisesti lasten kuuloaistin erottelukyvyn tutkimus saattaa onnistua paremmin MMN:ä kuin tehtäväsuoritusta mittaamalla. Sen avulla on esim. voitu selvittää ihmisen kuulohavainnon varhaiskehitystä (Cheour-Luhtanen ym., 1995; 1996; Kurzberg, 1986; Huotilainen ym., lähetetty julkaistavaksi). Sitä mittaamalla on myös voitu saada tietoa havainnosta ja sen häiriöistä sellaisiltakin potilasryhmiltä, joita on muuten vaikea tutkia, esim. afasia- ja koomapotilailta (Aaltonen ym., 1993; Ilvonen ym., 2003; Kane ym., 1993).

MMN ÄIDINKIELEN ÄÄNTEIDEN HAVAITSEMISEN TUTKIMUKSESSA

MMN-vastetta on käytetty intensiivisesti puheen¹ havaitsemisen tutkimukseen. Se syntyy äänne- ja tavukontrasteille, jotka ovat tietoisesti erotettavissa, ja sen amplitudi heijastaa näiden kontrastien suuruutta (Aaltonen ym., 1987; 1992; Sams ym., 1990). Tällainen ilmiö voi heijastaa paitsi kielellisiä prosesseja, myös ärsykkeiden ei-kielellisiä fysikaalisia eroja. On kuitenkin saatu evidenssiä siitä, että MMN voi myös heijastaa kielispesifejä prosesseja. Esim. Aaltonen ym. (1997) tutkivat tämän vasteen yhteyttä ns. magneettiefektiin (Kuhl, 1991), jolla tarkoitetaan sitä, että puheäänteet pyritään havaitsemaan lähimmän prototyypin kaltaisesti. Aaltonen ym. (1997) löysivät yhteyden MMN:n ja mageettiefektin välillä sellaisilla koehenkilöillä, joilla tuo efekti esiintyi behavioraalitestissä. Vain näillä koehenkilöillä MMN-vasteen amplitudiin vaikutti se, oliko standardiääänne prototyyppi vai non-prototyyppi.

Useat muutkin tutkimukset ovat selvittäneet, heijastaako MMN puheäänten kategorista havaitsemista. Tulokset ovat olleet vaihtelevia; osa tutkimuksista on tukenut tätä ajatusta (esim. Aaltonen ym., 1992; Dehaene-Lambertz, 1997), osa ei (esim. Aaltonen ym., 1987; Sams ym., 1990). Negatiiviset tulokset selittynevät suurilta osin metodologisilla seikoilla. Esim. sen, että standardiärsyke on tutkimuksessa ollut liian lähellä kategoriarajaa, jolloin sille ei muodostu hyvää muistijälkeä, on esitetty vaikuttaneen niin, ettei kategoriaefektiä ole voitu osoit-

taa (Maiste ym., 1995). Eräissä tutkimuksissa puolestaan esim. fysikaalinen ero toistuvan ja poikkeavan ärsykkeen välillä on ollut erisuuruinen äännekategorian sisällä ja kategorioiden välillä (Aaltonen ym., 1987; Sams ym., 1990). Tällöin amplitudiin vaikuttaa myös tämä fysikaalinen ero, mikä on saatanut peittää alleen kategoriaefektin. Dehaene-Lambertz (1997) puolestaan esitti, että kategoriaspesifiä MMN:ää voi olla vaikeaa saada esiin, jos sitä analysoidaan vain yhden tai muutaman EEG-kanavan aineistosta, kuten em. tutkimuksissa oli tehty. Hänen 128 EEG-kanavaa käsittävässä tutkimuksessaan löytyi tukea sille, että MMN heijastaa kategoriaefektia.

Hiljattain tehdyt vertailut eri kieliryhmien välillä antavat lisää tukea sille, että MMN heijastaisi äänneiden kategorista erottelua. Winkler ym. (1999) mittasivat MMN:ää [e]- ja [ä]-vokaalien erolle, joka on relevantti suomen kielessä, muttei unkarin kielessä Budapestin seudulla. Tämä vokaalikontrasti, joka oli valittu läheltä niiden kategorioiden rajaa (joten niiden välinen fysikaalinen ero oli hyvin pieni), synnytti suomalaisilla MMN-vasteen ja se myös behavioraalisesti erotettiin. Budapestistä kotoisin olevilla unkarilaisilla sille ei syntynyt MMN:ää, eivätkä he myöskään kyenneet behavioraalisesti erottamaan sitä.

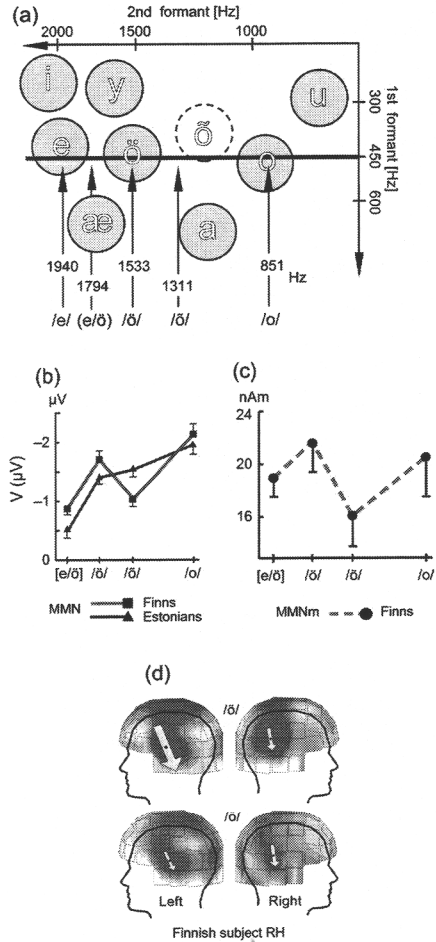
MMN-vastetta rekisteröimällä on osoitettu oman äidinkielen äänneiden muistijälkeen olevan edustettuina vasemman aivopuoliskon kuuloaivokuorella (Näätänen ym., 1997). Tutkimuksessa mitattiin MMN:ää ja sen magneettista vastinetta MMNm:ää suomalaisilta ja virolaisilta koehenkilöiltä. Ärsykeinä käytettiin äännekontrasteja [e]-[o]-jatkumolla, jotka saatiin muuntamalla vain toisen formantin (F2) taajuutta ja jotka olivat yhteisiä näille kielille (prototyypisinä [e] toistuvana, [ö] ja [o] poikkeavina ärsykeinä). Lisäksi jatkumolla oli kaksi sellaista

¹ Puheäänten voidaan katsoa olevan äänten joukossa erityistapaus, koska niihin liittyy kielellinen kategorisointi. Puheessa äänteet ovat niitä puhesegmentejä, jotka vastaavat kirjoituksen kirjaimia, etenkin Suomessa.

vokaaliärsykettä, joista toinen, [e]:n ja [ö]:n välissä sijaitseva, ei ollut kummankaan kiel-
 len prototyypin variantti ja joista toinen, [ö]:n ja [o]:n välissä sijaitseva, oli lähellä vain virossa esiintyvän [õ]-vokaalin prototyyp-
 piä ([e] toistuvana ja [õ] poikkeavana ärsyke-
 keenä). Kummassakin kielessä esiintymä-
 tön [e/õ]-variantti aiheutti vain hyvin hei-
 kon MMN-vasteen. Sen sijaan [ö]-[o]-jatku-
 mon suhteen MMN-vaste kasvoi virolaisil-
 la poikkeavan ja toistuvan äänteen fysikaali-
 sen eron kasvaessa siten, että pienin vaste tu-
 li [ö]:lle, hieman suurempi [õ]:lle ja kaikkein
 suurin [o]:lle. Suomalaisilla puolestaan [õ]:
 lle syntynyt MMN jäi pienemmäksi kuin
 muiden vokaalien synnyttämien vasteiden
 perusteella olisi ollut odotettavissa (kuva 1).
 Tämän tulkittiin heijastavan sitä, että kysei-
 selle vokaalille ei suomalaisilla ollut pitkä-
 kestoista muistijälkeä, joten sen synnyttä-
 mä vaste heijasti ainoastaan fysikaalista eroa
 toistuvaan ärsykkeeseen nähden. Paikannet-
 taessa MEG:llä aktiviteetilähteet aivoissa
 havaittiin, että MMNm äidinkielen äänne-
 kontrastille oli voimakkaampi vasemmassa
 kuin oikeassa aivopuoliskossa, kun taas vas-
 teissa vieraan kielen kontrastille ei aivopuo-
 liskojen välistä eroa havaittu. Tämä sopii yh-
 teen sen kanssa, että vasemmalla aivopuolis-
 kolla on oikeaa keskeisempi rooli puheään-
 teiden havaitsemisessa (Wernicke, 1874; Za-
 torre ym., 1992). Lisäksi tämä tulos ensim-
 mäisenä varmisti pitkäkestoisten äidinkielen
 äänneiden muistijälkien suoran vaikutuksen
 MMN-vasteeseen. Aivan hiljattain on alet-
 tu selvittää myös monimutkaisten kielellis-
 ten yksiköiden, sanojen, mahdollisia muist-
 tiedustuksia aivoissa. Esim. Pulvermueller
 ym. (2001) osoittivat, että merkityksellisille
 sanoille syntyy voimakkaampi MMN-vaste
 kuin pseudosanoille, ja että se paikantuu va-
 sempaan aivopuoliskoon.

Vasemman ja oikean aivopuoliskon roo-
 lia aivojen varhaisissa kielellisissä prosesseis-

MMN (MMNm) as an Index of Language-
 Specific Speech-Sound Traces



KUVA 1. MMN kielispesifien muistijälkien heijas-
 tajana. (a) Tutkimuksessa käytetyt ärsykkeet. Toistu-
 vana ärsykkeenä toimi virossa ja suomen kieleen kuu-
 luva [e], poikkeavina ärsykkeinä [õ], [ö] ja [o], joista
 kaikki kuuluvat virossa kieleen ja kaikki paitsi [õ] su-
 omen kieleen. (b) EEG:llä mitattu MMN-vaste. MMN
 kasvaa virolaisilla koehenkilöillä (musta viiva) vokaa-
 likontrastin suuruuden kasvaessa. Suomalaisilla (har-
 maa viiva) MMN:n amplitudi pienentyy suomen kie-
 leen kuulumattomalle [õ]-äänteelle. (c) MEG:llä mita-
 tut MMNm:n amplitudi suomalaisten koehenkilöi-
 den vasemmalla kuuloaivokuorella. (d) MMN-lähteen
 voimakkuus (virtadipolia kuvaava nuoli) yhdeltä su-
 omalaiselta koehenkilöltä vasemmassa ja oikeassa aivo-
 puoliskossa [ö]- ja [õ]-äänteelle. Kuva tutkimuksesta
 Näätänen ym., 1997.

sa on myös tutkittu edelleen Näätäsen ym. (1997) osoittama MMNm:n olevan voimistuneen äidinkielen äänneille vasemmassa aivopuoliskossa. Esim. Rinne ym. (1999) selvittivät, miten [a]- ja [i] -vokaalien prosessointi muuttuu vähennettäessä asteittain niiden monimutkaisuutta kohti yksinkertaista siniääntä, jossa on sama perustajuus kuin vokaalin F1-taajuus. Heidän tulostensa mukaan MMN [a]-[i] -kontrastille painotui vasempaan aivopuoliskoon ja lateralisatio oli siirtynyt oikeaan aivopuoliskoon niille yksinkertaistetuille äänille, joita koehenkilö ei erillisessä behavioraalitehtävässä havainnut kielellisinä.

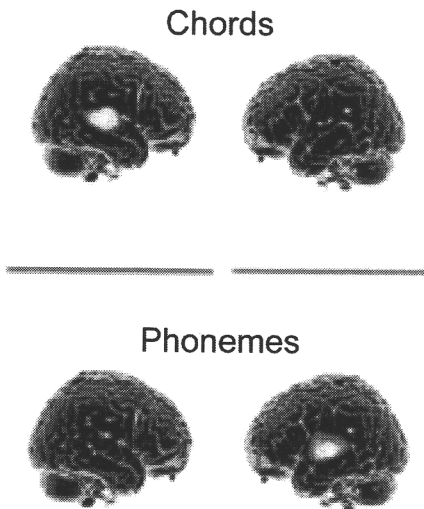
Puheen käsittelyn aivoprosesseille mielenkiintoisen vertailukohdan tarjoaa musiikin

käsittely, koska siinä myös on kyse monimutkaisesta, strukturoidusta ja tiettyjä lainalaisuuksia noudattavasta kuuloinformaatiosta. Tervaniemi ym. (2000) selvittivät positroni-emissiotomografialla (PET), miten aivopuoliskot osallistuvat puheäänneiden ja sointujen erotteluun. Koehenkilöille esitettiin sekä äänisarjoja (eri koetilanteissa vokaaleja ja sointuja), joissa oli poikkeavia ja toistuvia ärsyksiä, että äänisarjoja, joissa oli vain toistuvia ärsyksiä. Vähentämällä pelkästään toistuvien ärsykkeiden synnyttämä aktivaatio sellaisesta, joka syntyi molempia ärsykytyyppejä sisältävissä äänisarjoissa, voitiin saada esiin äänien erotteluun liittyvä aivotoiminta. Äänneiden erottelun havaittiin tapahtuvan vasemmassa ja sointujen oikeassa aivopuoliskossa (kuva 2).

MMN JA PUHEÄÄNTEIDEN HAVAITSEMISEN VASTASYNTYNEILLÄ

MMN-prosessin kaltaista aivoaktiiviteettia (vasteita toistuvien ärsykkeiden joukossa oleviin poikkeaviin ärsykkeisiin) on voitu rekisteröidä myös vastasyntyneiltä. Useissa näistä tutkimuksista on ärsykeinä käytetty puheäänneitä. Koeasetelmat ovat olleet pääasiassa sellaisia, ettei niillä saatujen tulosten perusteella voida väittää mitatun puheäänneille spesifejä prosesseja. Nämä tutkimukset ovat kuitenkin tärkeä päänavaus kielellisen varhaiskehityksen tutkimukselle MMN-vastetta käyttäen.

Ensimmäisen MMN-tutkimuksen puheäänneiden erottelusta vastasyntyneillä julkaisi Kurtzberg vuonna 1986. Hän havaitsi vastasyntyneillä [ta]-[da] -muutokseen pään etuosissa negatiivisen vasteen, joka myöhemmin kääntyi positiivisuudeksi. Dehaene-Lambertz ja Dehaene (1994) puolestaan havaitsivat kahden-kolmen kuukauden ikäisillä vauvoilla [ga]-[ba] -muutokseen kaksihuip-



KUVA 2. PET-tutkimus musiikillisten (soinnut) ja puheäänneiden (vokaalit) erottelusta oikeassa ja vasemmassa aivopuoliskossa. Koehenkilöille esitettiin sekä äänisarjoja (eri koetilanteissa vokaaleja ja sointuja) joissa oli toistuvia ja poikkeavia ärsyksiä että äänisarjoja, joissa oli vain toistuvia ärsyksiä. Aktivaatiot on saatu esiin siten, että on vähennetty pelkästään toistuvien ärsykkeiden synnyttämä aktivaatio sellaisesta, joka syntyi äänisarjojen sisältäessä toistuvia ja poikkeavia ärsyksiä. Sointumuutokset (kuvan yläosa) aktivoivat oikean ja vokaalimuutokset (kuvan alaosa) vasemman kuuloaivokuoren. Kuva tutkimuksesta Tervaniemi ym. (2000).

puisen positiivisen vasteen, joka myöhemmin kääntyi negatiivisuudeksi. Cheour-Luhtanen ym. (1995) havaitsivat terveillä vasta-syntyneillä [y]-[i] -kontrastiin negatiivisen vasteen pään etuosissa, kun taas vastetta [y]:n ja y-i -rajavokaalin kontrastiin ei syntynyt. Vastaavia tuloksia saatiin ennen laskettua aikaa syntyneiltä keskosilta (Cheour-Luhtanen ym., 1996), mutta kolmen kuukauden ikäisillä täysiaikaisena syntyneillä sensijaan havaittiin myös pieni vaste [y]:n ja y-i -rajavokaalin erolle (Cheour-Luhtanen ym., 1997). MMN-vaste vokaalimuutoksille on saatu hiljattain mitattua ontogeneettisesti jopa vielä aiemmin, ihmisen sikiövaiheessa (Huotilainen ym., lähetetty julkaistavaksi). Mittausmenetelmänä käytettiin tasapohjais-ta MEG-laitetta, jolla yleensä tutkitaan sydämen toimintaa. Sikiöiden MMN-vasteita rekisteröitiin asettamalla tämän laitteen mita-anturit äidin vatsan päälle.

Cheour ym. (1998) selvittivät kielispesifi-en muistijälkien varhaista kehittymistä. He mittasivat MMN-vastetta vauvoilta äidin- ja vieraan kielen tavukontrastille kuuden ja kahdentoista kuukauden iässä. Tutkimuksen tulokset viittasivat siihen, että vauvojen kuu-lojärjestelmä ei vielä kuuden kuukauden iäs-sä käsittele vokaaleja eri tavoin sen mukaan, kuuluvatko ne äidin- vai vieraaseen kieleen. Sen sijaan 12 kuukauden iässä vaste oman kielen vokaalikontrastille oli voimistunut verrattuna vieraskieliseen kontrastiin.

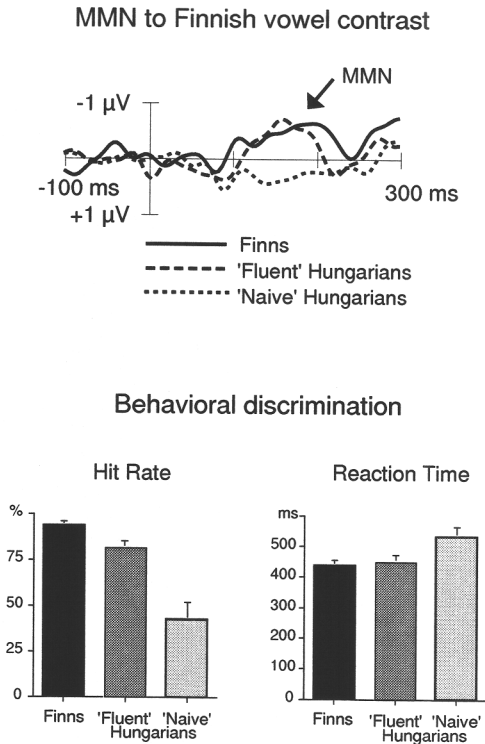
MMN VIERAAN KIELEN ÄÄNTEIDEN OPPIMISEN HEIJASTAJANA

MMN:n soveltuvuuden oppimisefektien ja aivojen muotoutuvuuden tutkimukseen osoittivat ensimmäisen kerran Näätänen ym. (1993) ei-kielellisillä ärsykkeillä. He käyttivät tutkimuksissaan kahta useasta eritaajui-sesta osasta koostuvaa kompleksista ääntä.

Nämä kaksi ääntä erosivat toisistaan siten, että yksi segmentti oli niissä eritaajui-nen, ja tätä eroa oli hyvin vaikea havaita. Tutkimuk-sessa mitattiin näille äänille MMN-vastetta kolmessa eri vaiheessa, joiden välissä oli be-havioraalinen äänten erottelutehtävä. Osalle niistä koehenkilöistä, joilla ensimmäises-sä mittauksessa ei ollut MMN:ä, se kehittyi heti ensimmäisen erottelutehtävän jälkeen edellyttäen, että he olivat oppineet erotta-maan äänet toisistaan. Osalla koehenkilöistä MMN puolestaan esiintyi jo ensimmäisessä mittauksessa, ja he myös kykenivät erottele-maan äänet heti ensimmäisessä behavioraa-litehtävässä. Joillekin koehenkilöille MMN-vastetta ei syntynyt missään vaiheessa, eivät-kä he myöskään oppineet erottelemaan ää-niä toisistaan.

Näätänen ym. (1993) tutkimuksen jäl-keen MMN-vastetta on käytetty myös pu-heäänteiden oppimisen tutkimiseen. Kraus-in ym. (1995) ja Tremblayn ym. (1998) tut-kimuksessa ärsykkeinä olivat englanninkie-lisen [da]-tavun variantit, jotka erosivat toi-sistaan toisen ja kolmannen formanttitan-sition alkutaajuuksilta. Koehenkilöt eivät alunperin kyenneet erottamaan näitä kah-ta tavuärsykettä toisistaan, eivätkä ne myös-kään synnyttäneet MMN:ä. Kun koehen-kilöt harjoiteltuaan oppivat erottelemaan tavukontrastit, ne synnyttivät heillä myös MMN-vasteen. Näiden tavujen erotteluky-ky oli tallella vielä kuukauden päästä harjoit-telujaksosta sekä behavioraalisten mittausten että MMN-rekisteröinnin mukaan.

Winkler ym. (1999) sovelsivat näitä la-boratoriossa suoritettuja oppimistutkimuk-sia luonnollisempiin olosuhteisiin edellä jo selostetussa tutkimuksessaan. He vertasi-vat suomenkielen äänteiden erottelukykyä ja MMN-vastetta kolmella koehenkilöryh-mällä: suomalaisilla, unkarilaisilla jotka ei-vät osanneet suomea sekä unkarilaisilla jot-ka osasivat suomea sujuvasti. Tutkimukses-



KUVA 3. Uuden kielen oppimisen vaikutus äänneiden erottelukykyyhin. MMN-vastetta ei syntynyt unkarilaisilla (pisteviiva) suomen kielessä esiintyvään äännekontrastiin [e]-[ä], jota ei esiinny heidän äidinkielessään (kuvan yläosa). Suomalaisilla (yhtenäinen viiva) ja suomea sujuvasti puhuvilla unkarilaisilla (katkoviiva) sen sijaan syntyivät hyvin selkeät MMN-vasteet. Behavioraalisissa testissä (kuvan alaosa) suomea oppineet unkarilaiset erottelivat äännekontrastin lähes yhtä hyvin kuin suomalaiset, kun taas suomea osaamattomat unkarilaiset eivät sitä kyenneet erottamaan. Kuva tutkimuksesta Winkler ym. (1999).

sa käytetyt [e]- ja [ä]-äänteet kuuluivat suomen kieleen, kun taas unkarin kielen vokaalikartassa (Budapestin seudulla, mistä tutkimuksen unkarilaiset olivat kotoisin) nämä äänteet kuuluvat samaan vokaalikategoriaan. Behavioraalisessa äänneiden tunnistustehtävässä suomalaiset pärjäsivät parhaiten ja suomea oppineet unkarilaiset lähes yhtä hyvin, kun taas suomea osaamattomat unkarilaiset eivät kyenneet erottamaan näitä kahta äännettä toisistaan tunnistustehtävässä (kuva 3). MMN-vastetta ei myöskään löytynyt tälle kontrastille suomea osaamattomilta unkarilaisilta, kun taas suomalaisilla ja suomea

sujuvasti puhuvilla unkarilaisilla MMN-vasteet olivat selkeät ja varsin samankaltaiset (kuva 3). Tämä tutkimus osoittaa uusiin äännekategorioiden muodostuvan uuden kielen oppimisen myötä ja niiden toimivan automaattisesti.

Nenonen ym. (painossa) selvittivät suomen kielessä erittäin tärkeän piirteen, vokaalin keston (esim. raja vs. raaja), havaitsemista suomalaisilla sekä suomea toisena kielenä sujuvasti puhuvilla venäläisillä. Toisin kuin venäjän kielessä, suomen kielessä tällainen kestoero on sanarakenteen kategorinen ilmiö. He havaitsivat, että vaikka MMN oli näissä ryhmissä samansuuruinen siniäänten kesto-poikkeamille, suomalaisten MMN-vaste oli suurempi kuin venäläisten käytettäessä suomen ja venäjän kielisiin kuuluvan [a]-vokaalin kesto-poikkeamaa (Nenonen ym., 2003). Tästä pääteltiin, että äänteen keston tärkeä asema suomen kielessä on herkistännyt suomalaiset havaitsemaan vokaalien kestromuutoksia, joille puolestaan venäläiset eivät olleet herkistyneet, sillä vokaalikestoilla ei ole vastaavaa merkitystä venäjän kielessä. Nenonen ym. (painossa) selvittivätkin seuraavaksi näillä samoilla koehenkilöillä, miten suomen kieltä osaavat venäläiset havaitsevat kestoeroja äänneissä, joita he ovat oppineet suomenkielen omaksumisen myötä. Pyrittiin siis selvittämään, onko heidän kesto-havaintonsa tarkentunut niille äänneille, jotka kuuluvat suomen, mutteivät venäjän kieleen. Tutkimuksessa mitattiin MMN:ää suomenkielisen [ä]-äänteen kestromuutoksille. Tulosten mukaan suomea hyvin puhuvilla venäjänkielillä [ä]-äänteen keston prosessointi oli yhtä tarkkaa kuin äidinkieleltään suomenkielisillä (Nenonen ym., (painossa)). Tulokset heijastanevat sitä, että oppittaessa sellainen uusi äänne, johon liittyy merkityksellisenä aspektina myös kesto, niin myös tämä piirre taltioituu äänteen muistiedustukseen. Sen sijaan jos kesto-piirrettä ei alunperin äidinkie-

len äänneessä ole, se ei siihen myöhemmin-kään assosioitu, vaikka sitä käytettäisiin sellaisessa myöhemmin opitussa vieraassa kielessä, jossa piirre on merkityksellinen.

Cheour ym. (2002) tutkivat vieraan kielen oppimista alle kouluikäisillä lapsilla. Koehenkilöinä oli suomenkielisiä lapsia, jotka kolmesta kuuteen vuotiaina alkoivat käydä ranskankielisessä päiväkodissa, jossa he kuulivat pelkkää ranskan kieltä viitenä päivänä viikossa kuudesta kahdeksaan tuntia päivässä. Tätä ryhmää verrattiin samanikäisten suomenkielisten lasten ryhmään, joka kävi suomenkielisessä päiväkodissa. Lasten vasteita ranskan kielen äänne muutoksiin ([i] toistuvana ja [e] ja [μ] poikkeavina ärsykkeinä) mitattiin ennen päiväkotii menoa sekä 2–4 kuukauden kuluttua.

MMN ei eronnut ryhmien välillä tutkimuksen alkaessa, mutta loppumittauksessa se oli merkitsevästi suurempi ranskankielistä päiväkotia käyneillä lapsilla kuin vertailulapsilla. Tämän tutkijat selittivät johtuvan pitkäkestoisten muistijälkien muodostumisesta ranskan kielen äänneille. Shestakova ym. (2003) havaitsivat samalla lapsiryhmällä myös tarkkaavaisuuden kääntymistä heijastavan P3a-vasteen kasvaneen huomattavasti ranskan kielen kuuntelun seurauksena. Tämän arveltiin heijastavan ranskan kielen oppimisen myötä sen äänneiden merkityksellisyyden lisääntymistä, mikä herkistäisi tarkkaavaisuuden kääntymistä kyseisten vokaalien muutoksille. Hiljattain vokaalien erottelun oppimista on tutkittu MMN-vasteella vieläkin varhaisemmassa kehitysvaiheessa, vastasyntyneillä vauvoilla (Cheour ym., 2002). Tutkimus osoitti MMN-vasteen voimistuvan vokaalieroille sellaisilla vauvoilla, joille ko. vokaaleita esitettiin yöllä heidän nukkuessaan.

MENETELMÄLLISIÄ SEIKKOJA KIELELLISEN MMN:N TUTKIMUKSESSA

Tyypillisessä MMN-koeasetelmassa on esitetty toistuvaa ("standardi") ääntä, joka on usein sama fysikaalinen ääni, esim. vokaalin [a] tyypillinen edustuma, ja äänisarjassa on yleensä yhdestä kolmeen poikkeavaa ääntä (esim. vokaalien [e], [i] ja [o] tyypillisiä edustumia). Toistolla on saatu synnytyksi tai aktivoitua muistijälki, johon kutakin tulevaa ääntä verrataan (Näätänen, 1992). Täsmälleen saman äänen runsas toistaminen johtaa kuitenkin siihen, ettei koetilanne enää vastaa normaalia puheäänien havaitsemisen tilannetta, jossa signaali on vaihtuva eikä toistuva. Tästä saattaa aiheutua useita ongelmia, joista ehkä merkittävin on se, ettei luonnollisestakaan puheesta äänitetty vokaali joidenkin kymmenien sekuntien jälkeen enää kuulosta luonnolliselta. Äänen puheomaisuus kärsii toistosta ja aiheuttaa usein aistimuksen muuttumisen kokeen aikana. Vaikka aistimus kokeen alussa olisi muistuttanut puheäännettä, satojen toistojen kuluttua ääni kuulostaa usein mekaaniselta ja jopa useista osäänistä koostuvalta.

Näiden ongelmien välttämiseksi voidaan esim. käyttää vaihtuvan toiston koeasetelmaa (roving-standard paradigm, Huotilainen ym., 2001). Siinä käytetään useita ärsyketyyppejä, joista aluksi yksi esiintyy toistuvana, jolloin sitä toistetaan esimerkiksi kolmesta viiteen kertaan. Sitten äänne vaihtuu, jolloin tälle poikkeavalle äänneelle voidaan rekisteröidä MMN-vaste. Tätä äännettä puolestaan toistetaan jonkin aikaa, jolloin se toimii standardiärsykkeenä seuraavalle ärsykesarjassa esiintyvälle poikkeavalle äänneelle. Tutkittaessa vokaalimuutosten ja vokaalien kestonmuutosten erottelua sekvenssi olisi esim. tällainen: [a] [a] [a] [a] [o] [o] [o] [o:] [o:] [o:] [o:] jne. Jokainen ensimmäi-

nen äänne vaihdoksen jälkeen voidaan keskiarvoistaa poikkeavien äänneiden kategorioihin ja loput toistuvien kategoriaan. Tällä vaihtuvan toiston koeasetelmalla saavutetaan tilanne, jossa saattaa kulua vaikkapa minuutti, ennenkuin samaa ärsykettä esitetään uudelleen. Dehaene-Lambertz (1997) puolestaan käytti tutkimuksessaan kategorian sisällä akustisesti vaihtelevia vokaaleja. Hän osoitti aikuisilla koehenkilöillä, että samaan vokaalikategoriaan kuuluvat, akustisesti toisistaan eroavat ärsykkeet voivat muodostaa yhteisen muistijäljen kategorialle. Enemmän vaihtelua ärsykemateriaaliin lisäsivät Shestakova ym. (2002), joiden koko kokeen aikana ei toistettu samaa äännettä kertaakaan. He käyttivät kolmea vokaalia, [a], [o] ja [u], joita kutakin oli 150 kappaletta, kukin äänne 150 eri ihmisen lausumana. MMN-vaste syntyi heidän tutkimuksessaan vokaalikategorian vaihdoksille, mikä osoittaa kuulojärjestelmän pystyvän automaattisesti luokittelemaan eri puhujien lausumat äänneet omiin äännekategorioihinsa, vaikka puhuja vaihtuikin jokaisen äänneen jälkeen.

POHDINTAA

MMN-vastetta on sovellettu puheäänneiden havaitsemisen tutkimuksessa paitsi äänneiden kategorisen havaitsemisen ja äidinkielen äänneiden muistijälkien tutkimukseen, myös kielen kehityksen ja vieraan kielen oppimisen hermostollisen perustan selvittämiseen. Tämän aivovasteen tietyt ominaisuudet tekevät siitä hyödyllisen työkalun tähän tarkoitukseen. Se ensinnäkin heijastaa äänne- ja äänneiden erottelutarkkuutta aivokuorella. MMN-amplitudin voimakkuus riippuu ärsykkeiden välisestä fyysikaalisesta erosta (Sams ym., 1985; Tiitinen ym., 1994), ja sen on havaittu korreloivan behavioraalisten havaintomittarien kanssa (Kujala ym., 2001). Sillä voidaan näinollen selvittää, mi-

ten tarkasti yksilö havaitsee eri ääniä ja äänneitä ja erottaa ne toisistaan. Äännespesifien MMN-lähteiden on havaittu painottuvan vasempaan kuuloaivokuoreen, kun taas äänne muille, ei-kielellisille piirteille MMN syntyy pääasiassa oikeassa aivopuoliskossa (Näätänen ym., 1997; Rinne ym., 1999; Tervaniemi ym., 2000).

Useat tutkimukset ovat osoittaneet MMN:n heijastavan kuuloaivokuoren muotoutuvuutta oppimisen myötä (Näätänen ym., 1993; Kraus ym., 1995, Tremblay ym., 1998; Winkler ym., 1999; Cheour ym., 2002; Shestakova ym., 2003). Sillä voidaan siis selvittää äännejärjestelmien muutoksia aivoissa kielen oppimisen yhteydessä. MMN syntyy myös ilman tarkkaavaisuutta ja esiintyy jo ihmisen varhaiskehityksen vaiheissa. Nämä seikat avaavat ennennäkemättömiä mahdollisuuksia ymmärtää aiempaa paremmin ihmisen varhaista kielen kehitystä ja siinä mahdollisesti esiintyviä poikkeavuuksia.

MMN-vasteella on siis tehty useita keskeisiä löytöjä puheenhavaitsemisen tutkimuksessa, kuten saatu evidenssiä äidinkielelle spesifeistä äänneiden muistijäljistä (Näätänen ym., 1997), ja voitu seurata vieraan kielen oppimista eri-ikäisillä ihmisillä (Winkler ym., 1999; Cheour ym., 2002; Shestakova ym., 2003) sekä voitu valoittaa sitä, missä iässä äidinkielen äänneiden muistijärjestelmä alkaa kehittyä (Cheour ym., 1998). Sovellettaessa MMN-mittauksia puheen havaitsemisen tutkimukseen on kuitenkin tärkeätä kiinnittää huomiota tiettyihin metodologisiin seikkoihin. Esim. ilmeisesti eräät tutkimukset ovat epäonnistuneet osoittamaan kategoriaefektiä MMN:llä metodologisten ongelmien vuoksi. On mm. esitetty, että puheäänneille spesifiä MMN-komponenttia ei välttämättä saada esiin käytettäessä mittauksissa pientä EEG-kanavamäärää (Dehaene-Lambertz, 1997). Tällöin ei saada erotelluksi oikean ja vasemman aivo-

puoliskon prosesseja ärsykkeiden fysikaalisille eroille syntyvän oikean kuuoaivokuoren MMN:n summautuessa pään pinnalla yhteen vasemman aivopuoliskon kielellisiin eroihin reagoivan MMN:n kanssa. Nämä kaksi prosessia on mahdollista erottaa MEG-menetelmällä (Näätänen ym., 1997) tai yhdistämällä monikavava-EEG -mittaukset realistisenkaltaisiin päänmalleihin (esim. Rinne ym., 1999).

Tulevaisuudessa MMN-vasteen merkitys puheen havaitsemisen tutkimuksessa on huomattava erityisesti selvitettäessä puheäänneiden erottelutarkkuutta ja sen muutoksia erilaisissa tilanteissa, sekä normaalia ja poikkeavaa kielellistä kehitystä. Se voisi toimia hyödyllisenä mittarina myös määrittelyssä esim. ikää, jolloin vieraan kielen oppiminen on tehokkainta. MMN:n syntyminen jopa silloin, kun ärsykeitä ei tarkkailla, tekee siitä arvokkaan työkalun erityisesti tutkittaessa puheen havaitsemisen varhaiskehitystä, mihin sitä on sovellettukin jo jopa sikiövaiheesta lähtien (Huotilainen ym., läheitetty julkaistavaksi).

VIITTEET

- Aaltonen, O., Eerola, O., Hellström, A., Uusi-paikka, E. & Lang, A. H. (1997). Perceptual magnet effect in the light of behavioral and psychophysiological data. *Journal of the Acoustical Society of America*, **101**, 1090–1105.
- Aaltonen, O., Niemi, P., Nyrke, T. & Tuhkanen, M. (1987). Event-related brain potentials and the perception of a phonetic continuum. *Biological Psychology*, **24**, 197–207.
- Aaltonen, O., Paavilainen, P., Sams, M. & Näätänen, R. (1992). Event-related brain potentials and discrimination of steady-state vowels within and between phoneme categories: A preliminary study. *Scandinavian Journal of Logopedics*, **17**, 107–112.
- Aaltonen, O., Tuomainen, J., Laine, M. & Niemi, P. (1993). Cortical differences in tonal versus vowel processing as revealed by an ERP component called mismatch negativity (MMN). *Brain and Language*, **44**, 139–152.
- Alho, K., Sainio, K., Sajaniemi, N., Reinikainen, K. & Näätänen, R. (1990). Event-related brain potential of human newborns to pitch change of an acoustic stimulus. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **77**, 151–155.
- Alho, K., Woods, D. L., Algazi, A. & Näätänen, R. (1992). Intermodal selective attention. II. Effects of attentional load on processing of auditory and visual stimuli in central space. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **82**, 356–368.
- Amenedo, E. & Escera, C. (2000). The accuracy of sound duration representation in the human brain determines the accuracy of behavioural perception. *European Journal of Neuroscience*, **12**, 2570–1574.
- Cheour-Luhtanen, M., Alho, K., Kujala, T., Sainio, K., Reinikainen, K., Renlund, M., Aaltonen, O., Eerola, O. & Näätänen, R. (1995). Mismatch negativity indicates vowel discrimination in newborns. *Hearing Research*, **82**, 53–58.
- Cheour-Luhtanen, M., Alho, K., Sainio, K., Reinikainen, K., Renlund, M., Aaltonen, O., Eerola, O., & Näätänen, R. (1997). The mismatch negativity to changes in speech sounds at the age of three months. *Developmental Neuropsychology*, **13**, 167–174.
- Cheour-Luhtanen, M., Alho, K., Sainio, K., Rinne, T., Reinikainen, K., Pohjavuori, M., Renlund, M., Aaltonen, O., Eerola, O. & Näätänen, R. (1996). The ontogenetically earliest discriminative response of the human brain. *Psychophysiology, Special Report*, **33**, 478–481.
- Cheour, M., Ceponiene, R., Lehtokoski, A., Luuk, A., Allik, J., Alho, K. & Näätänen, R. (1998). Development of language-specific phoneme representations in the infant brain. *Nature Neuroscience*, **1**, 351–353.
- Cheour, M., Martynova, O., Näätänen, R., Erkkola, R., Sillanpää, M., Hiltunen, J., Aaltonen, O., Savela, J. & Hämäläinen, H. (2002). Speech sounds learned by sleeping newborns. *Nature*, **415**, 599–600.
- Cheour, M., Shestakova, A., Alku, P., Ceponiene, R., & Näätänen, R. (2002). Mismatch negativity (MMN) shows that 3–6-years-old children can learn to discriminate non-native speech sounds within two months. *Neurosci-*

- ce Letters*, 325, 187–190.
- Dehaene-Lambertz, G. (1997). Electrophysiological correlates of categorical phoneme perception in adults. *NeuroReport*, 8, 919–924.
- Dehaene-Lambertz, G. & Dehaene, S. (1994). Speech and cerebral correlates of syllable discrimination in infants. *Nature*, 28, 293–294.
- Donchin, E. & Coles, M. G. H. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behavioral and Brain Sciences*, 11, 357–374.
- Huotilainen, M., Kujala, A., & Alku, P. (2001). Long-term memory traces facilitate short-term memory trace formation in audition. *Neuroscience Letters*, 310, 133–136.
- Huotilainen, M., Kujala, A., Hotakainen, M., Lennes, M., Pakkonen, L., Taulu, S., Simola, J., Nenonen, J., Karjalainen, M. & Näätänen, R. The human fetus can detect changes in phonemes. Lähetetty julkaistavaksi.
- Iivonen, T.-M., Kujala, T., Kiesiläinen, A., Salonen, O., Kozou, H., Pekkonen, E., Roine, R. O., Kaste, M. & Näätänen, R. (2003). Auditory discrimination after left hemisphere stroke: An MMN follow-up study. *Stroke*, 34, 1746–1753.
- Kane, N. M., Butler, S. R. & Cummins, B. H. (1993). Electrophysiological indicator of awakening from coma. *The Lancet*, 341, 688.
- Kraus, N., McGee, T. J., Carrell, T. D., King, C. & Tremblay, K. (1995). Central auditory system plasticity associated with speech discrimination learning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7, 27–34.
- Kuhl, P. K. (1991). Human adults and human infants show a 'perceptual magnet effect' for the prototypes of speech categories, monkeys do not. *Perception and Psychophysics*, 50, 93–107.
- Kujala, T., Kallio, J., Tervaniemi, M. & Näätänen, R. (2001). The mismatch negativity as an index of temporal processing in audition. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1712–1719.
- Kurtzberg, D., Vaughan, H. G. Jr & Noval, G. P. (1986). Discriminative brain responses to speech sounds in the newborn high risk infant. Teoksessa V. Gallai (toim.), *Maturation of the CNS and evoked potentials*, (s. 253–259). Amsterdam: Elsevier.
- Kutas, M. & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207, 203–205.
- Lang, A. H., Nyrke, T., Ek, M., Aaltonen, O., Raimo, I. & Näätänen, R. (1990). Pitch discrimination performance and auditory event-related potentials. Teoksessa C. H. M. Brunia, A. W. K. Gaillard & A. Kok (toim.), *Psychophysiological brain research*, (vol. 1 s. 294–298). Tilburg: Tilburg University Press.
- Maiste, A. C., Wiens, A. S., Hunt, M. J., Scherg, M. & Picton, T. (1995). Event-related potentials and the categorical perception of speech sounds. *Ear & Hearing*, 16, 68–90.
- Nenonen, S., Shestakova, A., Huotilainen, M., & Näätänen, R. (2003). Linguistic relevance of duration within the native language determines the accuracy of speech-sound duration processing. *Cognitive Brain Research*, 16, 492–495.
- Nenonen, S., Shestakova, A., Huotilainen, M., & Näätänen, R. (painossa). Speech-sound duration processing in a second language is specific to phonetic categories. *Brain and Language*.
- Nenonen, S., ym. Accuracy of second-language phoneme duration processing is compromised by similar native language phoneme traces. Valmisteilla.
- Näätänen, R. (1991). Mismatch negativity (MMN) outside strong attentional focus: A commentary on Woldorff et al. *Psychophysiology*, 28, 478–484.
- Näätänen, R. (1992). *Attention and brain function*. Hillsdale: Erlbaum.
- Näätänen, R., Gaillard, A. W. K. & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42, 313–329.
- Näätänen, R., Lehtokoski, A., Lennes, M., Cheour, M., Huotilainen, M., Iivonen, A., Vainio, M., Alku, P., Ilmoniemi, R. J., Luuk, A., Allik, J., Sinkkonen, J. & Alho, K. (1997). Language-specific phoneme representations revealed by electric and magnetic brain responses. *Nature*, 385, 432–434.
- Näätänen, R., Schröger, E., Karakas, S., Tervaniemi, M. & Paavilainen, P. (1993). Development of a memory trace for a complex sound in the human brain. *NeuroReport*, 4, 503–506.
- Näätänen, R., Tervaniemi, M., Sussman, E., Paavilainen, P. & Winkler, I. (2001). Primitive intelligence in the auditory cortex. *Trends in Neuroscience*, 24, 283–288.

- Paavilainen, P., Simola, J., Jaramillo, M., Näätänen, R. & Winkler, I. (2001). Preattentive extraction of abstract feature conjunctions from auditory stimulation as reflected by the mismatch negativity (MMN). *Psychophysiology*, *38*, 359–365.
- Picton, T. W. (1992). The P300 wave of the human event-related potential. *Journal of Clinical Neurophysiology*, *9*, 456–479.
- Pulvermuller, F., Kujala, T., Shtyrov, Y., Simola, J., Tiitinen, H., Alku, P., Alho, K., Martinkauppi, S., Ilmoniemi, R. J., & Näätänen, R. (2001). Memory traces for words as revealed by the Mismatch Negativity (MMN). *NeuroImage*, *14*, 607–616.
- Rinne, T., Alho, K., Alku, P., Holi, M., Sinkkonen, J., Virtanen, J., Bertrand, O. & Näätänen, R. (1999). Analysis of speech sounds is left-hemisphere predominant at 100–150 ms from sound onset. *NeuroReport*, *10*, 1113–1117.
- Ruusuvirta, T., Korhonen, T., Arikoski, J., and Kivirikko, K. (1996). Multiple-unit responses to pitch changes in rabbits. *NeuroReport*, *7*, 1266–1268.
- Ruusuvirta, T., Penttonen, M., and Korhonen, T. (1998). Auditory cortical event-related potentials to pitch deviances in rats. *Neuroscience Letters*, *248*, 45–48.
- Sams, M., Aulanko, R., Aaltonen, O. & Näätänen, R. (1990). Event-related potentials to infrequent changes in synthesized phonetic stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *2*, 344–357.
- Sams, M., Paavilainen, P., Alho, K. & Näätänen, R. (1985). Auditory frequency discrimination and event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *62*, 437–448.
- Schröger, E. (1998). Measurement and interpretation of the mismatch negativity. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, *30*, 131–145.
- Sharma, A., Kraus, N., McGee, T., Carrell, T., & Nicol, T. (1993). Acoustic versus phonetic representation of speech as reflected by the mismatch negativity event-related potential. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, *88*, 64–71.
- Shestakova, A., Brattico, E., Huotilainen, M., Galunov, V., Soloviev, A., Sams, M., Ilmoniemi, R. J. & Näätänen, R. (2002). Abstract phoneme representations in the left temporal cortex: magnetic mismatch negativity study. *NeuroReport*, *13*, 1813–1816.
- Shestakova, A., Huotilainen, M., Ceponiene, R., & Cheour, M. (2003). Event-related potentials associated with second language learning in children. *Clinical Neurophysiology*, *114*, 1507–1512.
- Sokolov, E. N., Spinks, J. A., Näätänen, R. & Lyytinen, H. (2002). *The Orienting Response in Information Processing*. Mahwah N.J.: Erlbaum.
- Tervaniemi, M., Medvedev, S.V., Alho, K., Pakhomov, S.V., Roudas, M.S., van Zuijen, T.L., Näätänen, R. (2000). Lateralized automatic auditory processing of phonetic versus musical information: a PET study. *Human Brain Mapping*, *10*, 74–79.
- Tiitinen, H., May, P., Reinikainen, K. & Näätänen, R. (1994). Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature*, *372*, 90–92.
- Tremblay, K., Kraus, N. & McGee, T. (1998). The time-course of auditory perceptual learning: which comes first, the chicken or the egg. *NeuroReport*, *9*, 3557–3560.
- Wernicke, C. (1874). Der aphasische symptom-complex: eine psychologische studie auf anatomischer basis (english translation in Wernicke's works on aphasia: a sourcebook and review, Eggert G.H., 1977. The Hague: Mouton Publishers).
- Winkler, I., Kujala, T., Tiitinen, H., Sivonen, P., Alku, P., Lehtokoski, A., Czigler, I., Csépe, V., Ilmoniemi, R. J. & Näätänen, R. (1999). Brain responses reveal the learning of foreign language phonemes. *Psychophysiology*, *36*, 638–642.
- Winkler, I. & Näätänen, R. (1992). Event-related potentials in auditory backward recognition masking: a new way to study the neurophysiological basis of sensory memory in humans. *Neuroscience Letters*, *140*, 239–242.
- Zatorre, R. J., Evans, Meyer, E., Gjedde, A. (1992). Lateralization of phonetic and pitch discrimination in speech processing. *Science*, *256*, 846–849.

SPEECH PROCESSING AS REFLECTED BY THE MISMATCH NEGATIVITY

Teija Kujala, Minna Huotilainen, Risto Näätänen, Helsinki Collegium for Advanced Studies, University of Helsinki, Finland

Cognitive Brain Research Unit, Dept. Psychology, University of Helsinki,, Finland

Helsinki Brain Research Centre, University of Helsinki, Finland

The mismatch negativity (MMN) component of the auditory event related potential (ERP) has proven to be very useful in investigating the perception of the speech sounds of the mother tongue and foreign languages. It is elicited by any discriminable change occurring in a homogeneous sound environment even when the subject is not attending to the sounds. Therefore, it can be used for studying speech perception even in individuals with whom behavioural measurements are problematic. The MMN reflects both the discrimination of physical sound features and the presence of language-specific speech-sound traces of the left cerebral hemisphere. Recently it has also been used to determine the effects of foreign-language learning on the cortical speech-sound representations. Being an attention-independent response, the MMN is particularly useful for investigating the early development of speech perception. It has been shown, for example, that language-specific speech-sound traces develop between 6–12 months after birth.

Keywords: speech perception, language learning, event-related brain potentials, mismatch negativity (MMN)