

Krista Ylönen

LAPSEN AIVOJEN TOIMINNALLINEN KEHITYS KIELENKEHITYKSEN
NÄKÖKULMASTA

Syventävien opintojen kirjallinen työ
Kevätlukukausi 2019

Krista Ylönen

LAPSEN AIVOJEN TOIMINNALLINEN KEHITYS KIELENKEHITYKSEN
NÄKÖKULMASTA

Psykiatrian oppiaine, lääketieteellinen tiedekunta, TY

Kevätlukukausi 2019

Vastuhenkilö: Jetro J. Tuulari

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

TURUN YLIOPISTO
Lääketieteellinen tiedekunta

YLÖNEN, KRISTA: Lapsen aivojen toiminnallinen kehitys kielenkehityksen näkökulmasta

Syventävien opintojen kirjallinen työ, 32 s., 7 liites.
Psykiatrian oppiaine
Helmikuu 2019

Tämän syventävien opintojen kirjallisen työn aiheena on lapsen aivojen toiminnallinen kehitys, jota työssä tarkastellaan kielenkehityksen näkökulmasta. Työ on muodoltaan kirjallisuuskatsaus. Katsauksen tarkoituksena on luoda yleiskäsitys lapsen kielellisten tehtävien aikaisen aivotoiminnan ja aivojen rakenteen kehityksestä 2-12 ikävuoden välillä. Aihetta käsitellään laajasti eri kielen ulottuvuuksien, kuten lukemisen, puheen tuoton ja kielen ymmärtämisen, kautta. Katsaus keskittyy terveiden lasten normaalikehitykseen ja pyrkii ymmärtämään lapsen aivojen toiminnalle ominaisia piirteitä ja niiden kehitystä kohti aikuistyyppistä aivotoimintaa.

Kirjallisuuskatsauksen aineiston muodostavat PubMed-tietokannasta haetut lapsuuden aikaista aivotoimintaa ja kielellistä tiedonkäsittelyä käsittelevät artikkelit. Katsaukseen hyväksyttiin ainoastaan 2-12 -vuotiaita terveitä ja normaalisti kehittyviä lapsia käsitteleviä tutkimuksia. Lisäksi valittujen tutkimusten tuli käsitellä kielitaitojen ja aivojen toiminnan välistä yhteyttä.

Lapsen aivojen toiminta kielellisen tiedonkäsittelyn aikana muistuttaa suurelta osin aikuistyyppistä jo alle 5-vuotiaasta lähtien, mutta lasten ja aikuisten välillä on havaittavissa myös eroavaisuuksia. Lapsilla aktivoituvat kielenkäsittelyn aikana pitkälti samat aivoalueet kuin aikuisilla, mutta lapset hyödyntävät tunnettujen kielialueiden lisäksi aikuisia laajemmin myös epäspesifejä aivojen apualueita. Kehityksen ja taitojen karttumisen edetessä aivotoiminta kohdentuu tiukemmin tehtäväspesifisille aivoalueille, jolloin apualueiden rooli vähenee. Kohdentumisen aikataulu ja voimakkuus vaihtelevat kielen eri ulottuvuuksien ja yksilöiden välillä. Lapset myös hyödyntävät aikuisia laajemmin molempia aivopuoliskoja kielellisessä tiedonkäsittelyssään, vaikkakin lapsuuden aikaisessa lateralisaatioasteessa ja sen kehityksessä on merkittäviä eroja kielen eri ulottuvuuksien välillä.

Avainsanat: kielenkehitys, aivojen toiminta, aivojen kehitys

SISÄLLYS

1 JOHDANTO.....	1
1.1 <i>Kielen elementit</i>	1
1.1.1 Semantiikka.....	1
1.1.2 Syntaksi.....	1
1.1.3 Puheen ymmärtäminen.....	2
1.1.4 Kielen tuottaminen.....	2
1.1.5 Lukeminen.....	2
1.2 <i>Kielenkäsittely aikuisen aivoissa</i>	3
1.2.1 Kielenkäsittelyn avainalueet aikuisilla.....	3
1.2.1.1 Inferior frontal gyrus (alin otsalohkopoimu).....	3
1.2.1.2 Superior temporal gyrus (ylin ohimolohkopoimu).....	4
1.2.1.3 Visual word form area.....	5
1.2.2 Kielellisten toimintojen lateralisaatio aikuisilla.....	6
1.3 <i>Kielenkehityksen merkkipaalat lapsuudessa</i>	7
1.3.1 Vauvaikä (0-12 kuukautta).....	7
1.3.2 Taaperoikä (1-3 vuotta).....	7
1.3.3 Leikki-ikä (3-6 vuotta).....	7
1.3.4 Kouluikä (6-12 vuotta).....	8
2 METODIT.....	9
3 AIVOJEN VALKEAN AINEEN RAKENTEELLINEN KEHITYS JA KIELENKEHITYS LAPSUUDESSA.....	10
3.1 <i>Myelinisaation määritelmä</i>	10
3.2 <i>Myelinisaation merkitys</i>	10
3.3 <i>Myelinisaation yleiset periaatteet</i>	11
3.4 <i>Myelinisaatio kielenkäsittelyn kannalta keskeisillä aivoalueilla</i>	11
3.5 <i>Myelinisaatio kielenkäsittelyn kannalta keskeisten alueiden välillä</i>	12
4 AIVOJEN TOIMINNALLINEN KEHITYS LAPSUUDESSA.....	15
4.1 <i>Semanttinen tiedonkäsittely</i>	15
4.2 <i>Syntaksinen tiedonkäsittely</i>	16
4.3 <i>Puheen kuunteleminen ja ymmärtäminen</i>	17
4.3.1 Puheen kuuntelemisen ja ymmärtämisen toiminnallinen kehitys.....	17
4.3.2 Puheen ymmärtämisen suora ja epäsuora reitti aivoissa.....	18
4.4 <i>Kielen tuottaminen</i>	19

4.5 Lukeminen	20
5 AIVOTOIMINNAN LATERALISAATION KEHITYS LAPSUUDESSA	22
5.1 Rakenteellisen lateralisaation kehitys	22
5.2 Toiminnallisen lateralisaation kehitys	23
5.2.1 Semantiikka	23
5.2.2 Puheen kuunteleminen	23
5.2.3 Kielen tuottaminen	24
5.2.4 Lukeminen	24
5.3 Lateralisaatiokehitykseen vaikuttavia tekijöitä	25
5.3.1 Sukupuoli	25
5.3.2 Kätisyys	25
6 POHDINTA	26
LÄHTEET	28
LIITTEET	

1 JOHDANTO

1.1 Kielen elementit

1.1.1 Semantiikka

Semantiikka eli merkitysoppi on kielitieteen alalaji, joka keskittyy kielen merkityksiin. Semantiikka voi pohtia kieleen kätkeytyvää merkitystä yhden sanan, lauseen tai suuremman kielikokonaisuuden näkökulmasta, tai analysoida pienempien yksikköjen roolia suuremman merkityksen muodostumisessa, esimerkiksi yksittäisen sanan merkitystä lauseen sanoman kannalta. ¹

1.1.2 Syntaksi

Syntaksilla tarkoitetaan lauseoppia. Lauseoppi on kielitieteen osa-alue, joka tutkii lauseiden rakennetta pyrkien ymmärtämään muun muassa yksittäisten sanojen, sanajärjestyksen ja sanamuotojen roolia lauseenmuodostuksessa ². Syntaksi ei ota kantaa sanojen muodostaman lauseen merkityksen johdonmukaisuuteen tai järkevyyteen, vaan tarkastelee kielen toimivuutta toisiinsa kieliopin sääntöjen mukaan linkittyvien sanojen kautta.

Lapsilla syntaksiset ja semanttiset taidot nivoutuvat aikuisista poiketen toisiinsa pitkään sekä kognitiivisella että neuraalisella tasolla. Lapset hyödyntävät syntaksista taitoa vaativien kielellisten tehtävien ratkaisemisessa myös semanttisia vihjeitä. ³ Lapsi esimerkiksi hahmottaa helpommin subjekti-objekti -suhteen oikein lauseesta, joka on semanttisesti johdonmukainen. Esimerkiksi lause ”Jääkarhu syö tipun.” on lauseena lapselle helpompi hahmottaa kuin ”Tipu syö jääkarhun.”, koska lapsi hyödyntää kielenkäsittelyssään laajasti kaikkea tietoaan, eikä lapsen kokemuseräinen tieto tipun kyvystä syödä jääkarhua tue lauseen viestiä. ^{3,4}

1.1.3 Puheen ymmärtäminen

Puhuttu kieli on ihmislajin ja kehittyneiden aivojen ominaisimpia kykyjä ja kulttuurisia piirteitä. Puheen luomat mahdollisuudet kommunikaatioon ja työnjakoon ovat osaltaan mahdollistaneet ihmislajin menestyksen evoluutiossa ⁵.

Puheella tarkoitetaan yksilön äänteiden ja niistä muodostuvien sanojen välityksellä toiselle yksilölle siirtämiä viestejä ⁶. Puheen ymmärtäminen on luonnollisesti kuulonvaraista ja aistitoimintaa edellyttävä prosessi. Puheen välineet eli äänteet ja sanat sekä niiden merkitykset ovat sidoksissa yksilöä ympäröivään kulttuuriin, minkä myötä maapallolla puhutaan tuhansia eri kieliä ja niiden eri murteita.

1.1.4 Kielen tuottaminen

Kielen tuottamisella tarkoitetaan tässä katsauksessa kielellisen materiaalin luomista hiljaa mielessä tai puhuttuna ääneen. Äänetön kielen tuottaminen on aihepiiriä tutkineissa fMRI-tutkimuksissa yleinen tehtävämalli, koska näin puheen motoriseen suorittamiseen liittyvä aivotoiminta ei maskeeraa kielen tuotolle itselleen spesifiä toimintaa. Varsinaisena puheena tuotettu kieli pitää sisällään äänettömän kielen tuoton lisäksi myös puheen motorisen suunnittelun ja suorituksen.

Kirjallisesti tuotettu kieli jää tämän katsauksen aihealueen ulkopuolelle tutkimusten vähäisyyden vuoksi. Huomionarvoista on myös, että ikäryhmät ovat julkaistuissa tutkimuksissa epätasaisia. Haasteena kielen tuottamiseen liittyvän toiminnallisen kehityksen tutkimisessa on nuorilla lapsilla tehtyjen tutkimusten vähäinen määrä. Suurin osa tutkimuksista on tehty kouluikäisillä 5-17 -vuotiailla lapsilla, joten tietoa nuorempien lasten aivojen toiminnasta on hyvin rajallisesti.

1.1.5 Lukeminen

Lukutaidolla tarkoitetaan kykyä hahmottaa ja ymmärtää symbolien muodossa näönvaraista reittiä esitettyä kieltä. Lukutaito on muuta kielellistä viestintää tiukemmin sidottu yksilöä ympäröivään yhteiskuntaan ja kulttuuriin, koska kirjoitetun kielen välineenä toimiva symboliikka (aakkoset, merkit) vaihtelee kulttuurista toiseen. Erona primitiivisempiin kielellisen viestinnän keinoihin, kuten puheeseen, lukeminen

on myös yhteiskunnan ohjaamien normien/toimintamallien myötä opittava taito, jonka kehittämiseen lapsella ei ole synnynnäistä tarvetta. ⁷

Lukutaito on kehittyvä taito. Ennen varsinaista lukemaan oppimista lapsella täytyy olla riittävä kyky oivaltaa kuulemiensa äänteiden, tavujen ja sanojen yhteyttä näönvaraisesti esitettäviin merkkeihin ⁸. Fonologisen tietoisuuden lisäksi lukutaidon sisäistäminen vaatii myös muun muassa fonologisen työmuistin, keskittymisen ja näönvaraisen havainnoinnin kehittymistä. Lukutaito käynnistyy äänteiden ja symbolien välisen yhteyden oivaltamisesta, josta kehitys jatkuu tavujen, sanojen ja yksinkertaisten lauseiden kautta mekaaniseksi lukutaidoksi, eli kyvyksi konvertoida kirjoitettua kieltä puhutuksi. Mekaanisen lukutaidon saavuttamisen jälkeen, lukutaito harjoituksen kautta syvenee yksilön oppiessa ymmärtämään, tulkitsemaan ja arvioimaan laajempia kirjallisia kokonaisuuksia. ⁹

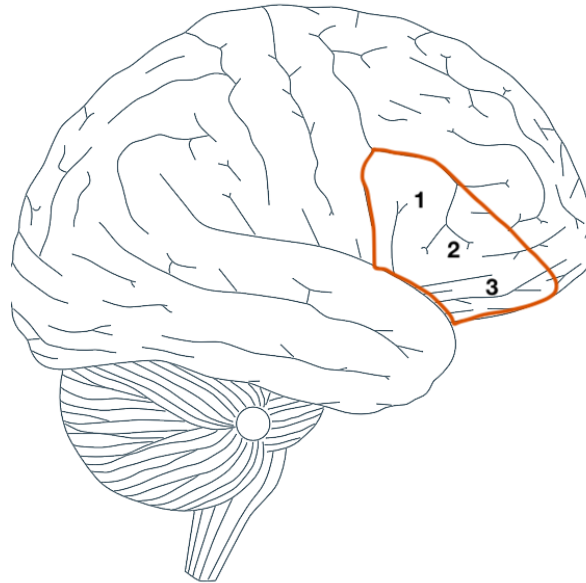
1.2 Kielenkäsittely aikuisen aivoissa

1.2.1 Kielenkäsittelyn avainalueet aikuisilla

1.2.1.1 Inferior frontal gyrus (alin otsalohkopoimu)

Alin otsalohkopoimu eli inferior frontal gyrus (IFG) sijaitsee bilateraalisesti otsalohkojen inferiorisissa osissa. Alue rajautuu inferiorisesti ohimolohkoon, superiorisesti middle frontal gyrukseen (MFG) ja dorsaalisesti precentral gyrukseen. IFG voidaan rakenteellisesti jakaa kolmeen eri aivopoimujen muodostamaan osaan: pars opercularikseen, pars triangularikseen ja pars orbitalikseen. (Kuva 1.)

IFG:n alueista dorsaalisin pars opercularis ja keskimmäinen pars triangularis muodostavat yhdessä Brocan alueena tunnetun toiminnallisen aivoalueen. Tyypillisesti alueen kielelliseen tiedonkäsittelyyn liittyvä toiminta painottuu vasempaan aivopuoliskoon. Brocan alueen on tyypillisesti ajateltu vastaavan kielentuoton sujuvuudesta. Sujuvuuden lisäksi alueella merkitystä myös semanttisessa ja fonologisessa tiedonkäsittelyssä, joten IFG:n roolia kielellisessä prosessoinnissa kaikkiaan pidetään hyvin merkittävänä. ¹⁰



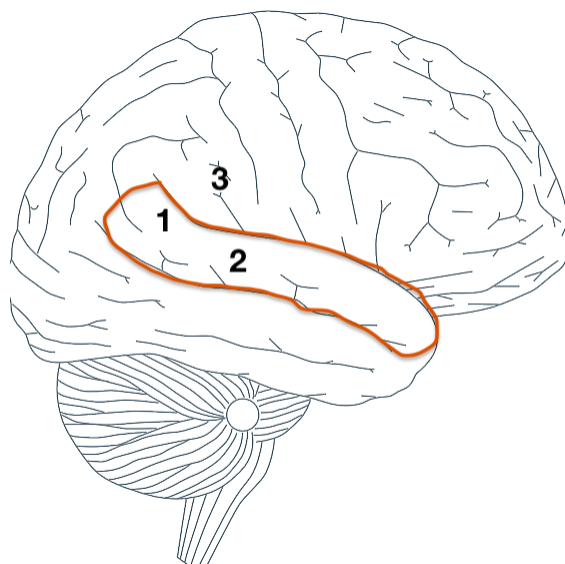
Kuva 1. Inferior frontal gyrus: 1. pars opercularis 2. pars triangularis 3. pars orbitalis. (www.pixabay.fi, muokkaus Krista Ylönen)

1.2.1.2 Superior temporal gyrus (ylin ohimolohkopoimu)

Superior temporal gyruksella (STG) tarkoitetaan ohimolohkon ylintä aivopoimua. Rakenne on anatomisesti bilateraalin. STG rajautuu inferiorisesti middle temporal gyrukseen (MTG), superiorisesti lateraalisulcukseen ja dorsaalisesti preoccipital notchin ja lateraalisulcuksen väliseen linjaan.

STG:n alueella sijaitsee monia toiminnallisesti tärkeitä aivoalueita. Yhdessä IFG:n kanssa ne muodostavat kielellisen tiedonkäsittelyn ytimen aivoissa. Kielenkäsittelyn näkökulmasta lateraalifissuuran sisään jäävät STG:n posterioriset osat (pSTG) ovat erityisen merkittäviä. Posteriorisen STG:n ja supramarginal gyruksen muodostama toiminnallinen kokonaisuus on yleisesti tunnettu Wernicken alueena. (Kuva 2.) Alue aktivoituu puheen tuoton ja kirjoittamisen aikana ja mahdollistaa merkitykseltään loogisen kielen tuoton. Toiminta on tyypillisesti vasempaan aivopuoliskoon lateralisoitunutta. Nykyisen näkemyksen mukaan Wernicken alue itsessään ei kuitenkaan ole semanttisen tiedonkäsittelyn ytimessä, vaan alue yhdistää muualta aivoista saamaansa semanttista tietoa omaan fonologiseen ja kielen tuottoon liittyvään tietoonsa, mahdollistaen näin kielen merkityksellisen sisällön. ¹¹

Myös puheen ja kielen ymmärtämisen osalta Wernicken alueen rooli on kyseenalaistettu. Nykyisen näkemyksen mukaan kielen ymmärtämisen prosessi aktivoi laajan aivoverkon otsa-, ohimo- ja päälakilohkon alueella, eikä Wernicken alueen rooli yksittäisenä osana ole ketjussa niin merkittävä ¹¹.

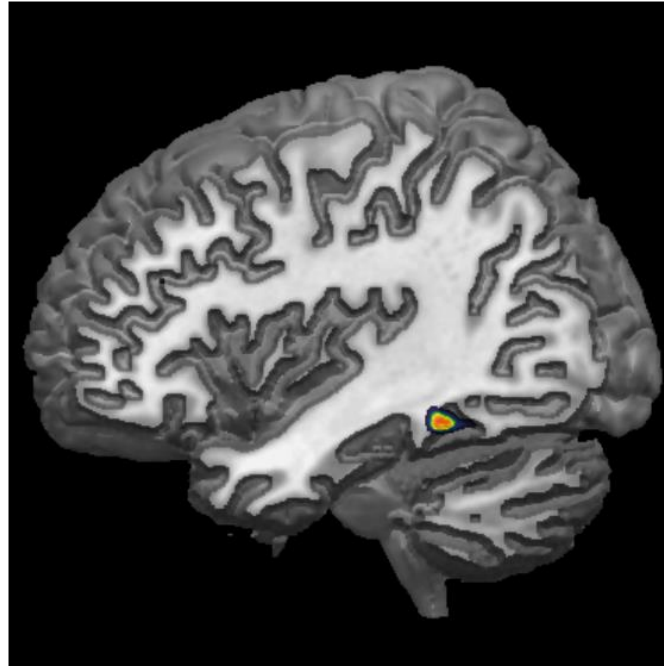


Kuva 2. Superior temporal gyrus (rajattu alue): 1. posterior STG (pSTG) 2. middle STG (mSTG) 3. supramarginal gyrus

1.2.1.3 Visual word form area

Visual word form area (VWFA) on vasemman ohimo- ja takaraivolohkon välisen sulkuksen alueella sijaitseva toiminnallinen aivoalue. Alueesta käytetään myös vaihtoehtoista termiä visual word form system (VWFS). VWFA muodostuu rakenteellisesti vasemmasta fusiform gyruksesta ja sitä ympäröivästä aivokuoresta. (Kuva 3.)

VWFA:n ajatellaan olevan toiminnallisesti merkittävä osa kielen visuaalisten elementtien käsittelyä. Alue vastaa visuaalisesti havaittujen ärsykkeiden tunnistamisesta kieleksi esim. kirjainten tunnistaminen, ja on näin tärkeä aivoalue lukutaidon kannalta. Alue aktivoituu näönvaraisessa kielenkäsittelyssä, kuten lukemisen ja näönvaraisten nimeämistehtävien aikana. ¹²



Kuva 3. Visual word form area aivojen poikkileikkauksessa.

1.2.2 Kielellisten toimintojen lateralisaatio aikuisilla

Kielellinen prosessointi lateralisoituu suurimmalla osalla ihmisistä vasempaan aivopuoliskoon. Lateralisaation suunta ja voimakkuus kuitenkin vaihtelevat niin yksilön kuin suoritettavan tehtävänkin mukaan ¹³. Monien kielitoimintojen osalta kyse on nykyäsitteiden mukaan aivopuoliskojen yhteistyöstä, vaikka määrällisesti mitattuna aktivaatio painottuisikin toiseen aivopuoliskoon ¹⁴. Aikuistyyppisellä aivotoiminnalla tarkoitetaan yleisesti ja tässä katsauksessa aivoaktivaation painottumista tehtäväspesifeiksi tunnetuille aivoalueille ja lateralisoitumista tyypillisesti vasemmalle.

1.3 Kielenkehityksen merkkipaalu lapsuudessa

1.3.1 Vauvaikä (0-12 kuukautta)

Kielenkehitys käynnistyy lapsuudessa nopeassa tahdissa jo ennen ensimmäistään puhuttua sanaa. Aivan ensimmäisinä elinkuukausina lapsi mieltyy ihmisääniin ja oppii tunnistamaan tuttuun ihmisten puheen tutuksi ja turvalliseksi. Lapsen oma kommunikaatio perustuu vielä kujerteluun ja itkuun, jonka eri sävyjä vanhemmat oppivat vuorovaikutuksessa tulkitsemaan. Noin neljän kuukauden kohdalla lapsen odotetaan kykenevän vastavuoroiseen jokelteluun. Lapsi myös hakee katse- ja hymykontaktia toisen ihmisen kanssa. Kohti puolen vuoden ikää ääntely monipuolistuu lapsen oppiessa hallitsemaan omaa äänentuottoaan. Lapsi leikkii äänellään ja voi muun muassa murista, kiljua, maiskutella, kuiskia ja päristä.⁹

6-12 kuukauden iässä jokeltelu kehittyy tavumaisiksi vokaali-konsonanttisarjoiksi. Lapsi alkaa myös suosia jokeltelussa äidinkielessään tyypillisiä äännepareja. Ensisanansa lapsi lausuu tyypillisesti 9-12kk iässä. Puheen ymmärtämisen tasolla lapsi ymmärtää vuoden iässä tyypillisesti jo useita sanoja ja lyhyitä ilmaisuja.^{9,15}

1.3.2 Taaperoikä (1-3 vuotta)

2-vuotiaana lapsi osaa tyypillisesti käyttää kahden sanan lauseita, joissa sanat taipuvat, noudattaa yksinkertaisia ohjeita ja nimetä esineitä. Puhutun sanavaraston laajuudeksi arvioidaan 2-vuotiailla 50-100 sanaa.⁹ Kahden ja kolmen ikävuoden välillä lapsi laajentaa voimakkaasti sanavarastoaan. 3-vuotiaana lapsi osaa käyttää puheessaan kysymys-, käsky- ja kieltolauseita ja noudattaa kaksiosaisia ohjeita.^{9,15}

1.3.3 Leikki-ikä (3-6 vuotta)

Leikki-iässä 3-6 -vuotiaana lapsen sanavarasto edelleen laajenee ja kyky tuoda omaa sisäistä maailmaa ulos puheen keinoin paranee. Lausepituus kasvaa keskimäärin yli viiden sanan mittaiseksi ja kieli on yleisesti ymmärrettävää ja oikeellista. Lapsi alkaa myös harjoitella kielen kirjallista tuottamista kirjoittamalla ja tunnistaa näkemiään kirjaimia tai jopa sanoja.⁹

Suomessa neuvola seuloo 4, 5 ja 6 -vuotiaiden lasten kielellisiä taitoja osana neurologista kehitystä mittaavia LENE-testejä. LENE pitää kielenkehityksen lisäksi sisällään myös useita muita neurologisen kehityksen ulottuvuuksia: aistitoiminnot, karkea- ja hienomotoriikka, vuorovaikutus, tarkkaavaisuus, visuaalinen hahmottaminen, leikki ja omatoimisuus. Kielellisiä taitoja arvioidaan erityisesti 5-vuotistarkastuksessa, jossa osana LENE:ä suoritetaan Lumiukko-testi. Lumiukossa tutkittavia kielen osa-alueita ovat kertova puhe, kielen ymmärtäminen, puhemotoriikka, kuulonvarainen sarjamuisti, lausettoisto, nimeäminen ja ääntäminen, käsitteet ja toimintaohjeet ja muut puheen tuottoon liittyvät piirteet. Testaamisen pyrkimyksenä on tunnistaa kielenkehitykseltään viivästyneet ja lisäselvityksiä tai tukitoimia tarvitsevat lapset. ¹⁶

1.3.4 Kouluikä (6-12 vuotta)

Lapsi oppii tyypillisesti lukemaan noin 6-7 -vuotiaana esiopetuksen tai kouluopetuksen ensimmäisen vuoden aikana. Lukutaidon alkeiden jälkeen lukutaito kouluiässä edelleen syvenee, lukunopeus kasvaa ja kyky hahmottaa abstrakteja asioita paranee. Samalla myös kyky tuottaa jatkuvasti monipuolisempaa kirjoitettua kieltä paranee. Lapsi oppii asettumaan itsensä ulkopuolella ja arvioimaan asioita toisen näkökulmasta. Lapsen kyky hahmottaa kokonaisuuksia paranee ja kehittyy taito tiivistää asioita. Kielen rooli oman ilmaisemisen välineenä ja viihdykkeenä lisääntyy. ⁹

2 METODIT

Syventävien opintojen kirjallinen työni on muodoltaan kirjallisuuskatsaus. Työn tarkoituksena on selvittää pääasiallisesti 2-12 -vuotiaiden lasten aivojen toiminnallista kehitystä kielenkehityksen viitekehyksessä. Ikäryhmä rajattiin alkamaan kahdesta ikävuodesta ylöspäin, koska kuvantamistutkimuksia tätä nuorempien lasten aivojen toiminnasta ja kielenkehityksestä on liian vähän riittävän katsauksen aineistoksi. Katsaus pyrkii selvittämään kielenkehityksen normaalia etenemistä, joten aineistoksi hyväksyttiin ainoastaan terveitä ja normaalisti kehittyviä lapsia tutkineita tutkimuksia.

Katsauksen artikkelit valittiin PubMed-tietokannasta hakemalla. Haku suoritettiin ensi kertaa vuonna 2015 ja sitä täydennettiin uudella haulilla tammikuussa 2019. Hakulausekkeena käytettiin lauseketta (((((fMRI OR MRI) AND brain) AND language development) NOT autism) NOT language delay) NOT epilepsy) NOT language disorder. Saatua hakutulosta rajattiin asettamalla suodattimia, joilla rajattiin katsauksen ulkopuolelle ennen vuotta 2005 vuotta julkaistut artikkelit (MRI-menetelmän samankaltaisuuden varmistaminen), muita kuin ihmislajia käsittelevät artikkelit ja pääasiallisesti yli 12 vuotiaita lapsia tutkineet tutkimukset.

Seuraavassa vaiheessa hakutuloksista valittiin otsikoiden perusteella opinnäytetyön aiheen kannalta osuvimmat. Valinnan ulkopuolelle jätettiin artikkelit, joissa käsiteltiin vain alle 2-vuotiaiden tai ainoastaan yli 7-vuotiaiden lasten kielellistä kehitystä, ennenaikaisina syntyneiden ja sairauksista tai poikkeamista kärsivien lasten kielellistä kehitystä tai kaksikielisten lasten kielenkehitystä.

Lopulliset katsauksen artikkelit valittiin abstraktien perusteella. Abstraktien perusteella hylättiin artikkelit, jotka keskittyivät ainoastaan vanhempiin lapsiin (vain yli 7-vuotiaita tutkittavia), tutkivat laajalti kognitiivisia toimintoja (olivat liian kielenkehitykseen nähden epäspesifisiä) tai keskittyivät hyvin selkeästi vain anatomiaan. Abstraktipohjaisen karsinnan jälkeen katsauksen aineistoksi valikoitui 44 artikkelia. (LIITE 1.)

3 AIVOJEN VALKEAN AINEEN RAKENTEELLINEN KEHITYS JA KIELENKEHITYS LAPSUUDESSA

3.1 Myelinisaation määritelmä

Myelinisaatiolla tarkoitetaan hermosolujen viejähaarakkeiden eli aksonien ympärille kehittyvien myeliinituppien muodostumista. Aivojen valkea aine muodostuu myelinisoituneista ja harmaa aine myelinisoitumattomista hermosyistä sekä hermosoluista.¹⁷ Myelinisaation eteneminen kuvaa siis valkean aineen kehitystä. Koska valkea aine muodostaa radastoja aivojen eri osien välille, kuvaa myelinisaatio myös aivojen eri osien välisten yhteyksien kehitystä.

3.2 Myelinisaation merkitys

Myelinisaation myötä hermoimpulssien eteneminen hermostossa nopeutuu, koska sähköinen aktiopotentiaali voi edetä myeliinituppien väliin jäävästä Ranvierin kuroumasta toiseen sen sijaan, että impulssin eteneminen tapahtuisi paikallisesti aksonin pinnan ionikanavien kautta. Normaali myelinisaatio ja sitä kautta hermosolujen ja edelleen hermoston eri osien välisen viestinnän tehostuminen mahdollistavat aivojen normaalin toiminnan.¹⁷

Samanaikaisesti lapsuudenaikaisen myelinisaation voimakkaan kehityksen kanssa lapsen toiminnallinen kehitys niin kielen, motoriikan kuin yleisen toimintakyvynkin näkökulmasta etenee voimakkaalla tahdilla lapsen ensimmäisenä elinvuosikymmenenä. Kielenkehityksen kannalta suurin kehitysharppaus ajoittuu ensimmäisen ja neljännen ikävuoden väliin, jolloin lapsen kielelliset taidot etenevät ymmärryksestä yksittäisten sanojen kautta kieliopillisesti oikeiksi usean sanan lauseiksi.⁹ Lapsen kaiken kehityksen kannalta kiihkeän ajanjakson aikana ei voida vetää suoraa johtopäätöstä, että kielenkehityksen kannalta tärkeiden aivoalueiden myelinisaation eteneminen on kielellisten taitojen räjähdysten taustalla. On kuitenkin hyvin todennäköistä että myelinisaatiolla on oma roolinsa kielenkehityksen prosessissa¹⁸. Tutkimuksessa on todettu 3-5 -vuotiailla lapsilla aikuistyyppisemmän valkean aineen rakenteen yhdistyvän parempaan suoriutumiseen tulevaa lukutaitoa ennakoivissa kielitesteissä¹⁹. Lisäksi lukutaitoisten ja lukutaidottomien 6-vuotiaiden

valkean aineen kehittyneisyyttä verrattaessa on havaittu eroja valkean aineen rakenteessa, mikä viittaisi kielellisten taitojen ja myelinisaation kehityksen vuorovaikutukseen lapsuudessa ²⁰. Myelinisaation suhde kielenkehitykseen ei kuitenkaan välttämättä ole suoraviivaista, vaan valkean aineen kehityksen merkitys kielellisille taidoille saattaa vaihdella lapsen iän mukana ²¹.

3.3 Myelinisaation yleiset periaatteet

Myelinisaation eteneminen noudattaa pääosin tiettyjä lainalaisuuksia. Prosessi käynnistyy jo sikiöaikana ja jatkuu pitkälle aikuisuuteen saavuttaen lakipisteensä noin 50-60 vuoden iässä ²². Myelinisaatio nivoutuu tiiviisti yhteen hermoston toiminnallisen kehityksen ja käytön kanssa. Uuden asian opetteleminen ja ylipäätään aivojen käyttäminen kiihdyttää toimintaan osallistuvien verkostojen välisten ratojen myelinisaatiota ²³. Myelinisaatio alkaa perifeerisestä hermostosta ennen keskushermostoa, aivojen sensorisilta alueilta ennen motorisia alueita ja toimintojen primaareilta aivoalueilta ennen assosiaatioalueita ²⁴. Evolutionaalisesti vanhat aivo-osat myelinisoituvat myös ennen evoluution näkökulmasta uudempia aivo-osia. Esimerkiksi aivorungon myelinisaatio alkaa jo sikiöaikana. ²⁵

3.4 Myelinisaatio kielenkäsittelyn kannalta keskeisillä aivoalueilla

Myelinisaatio etenee Brocan ja Wernicken alueilla, näitä yhdistävässä arcuate fasciculuksessa (AF), näönvaraista informaatiota puhutun kielen tasolle kääntävässä gyrus angulariksessa sekä primaareilla liike-, kuulo- ja näköaivokuorilla pienin tahtieroin saman kaavan mukaan. Sama kehitys tapahtuu myös aivojen oikeassa puoliskossa. Liikeaivokuorella tarkoitetaan anatomisesti precentral gyrusta, näköaivokuorella takaraivolohkon calcarinesulcuksen ylä- ja alahuulta ja kuuloaivokuorella ohimolohkon lateraalisulcuksen seutuun sijoittuvaa anterior transverse gyrusta. ¹⁸

Wernicken ja Brocan alueella, vasemmassa arcuate fasciculuksessa sekä vasemmanpuoleisilla primaareilla liike-, kuulo- ja näköaivokuorilla myelinisaation kehitys käynnistyy neljän kuukauden iässä. Vasemmassa gyrus angulariksessa myelinisaatiomuutoksia voidaan erottaa kuuden kuukauden iästä alkaen. ¹⁸

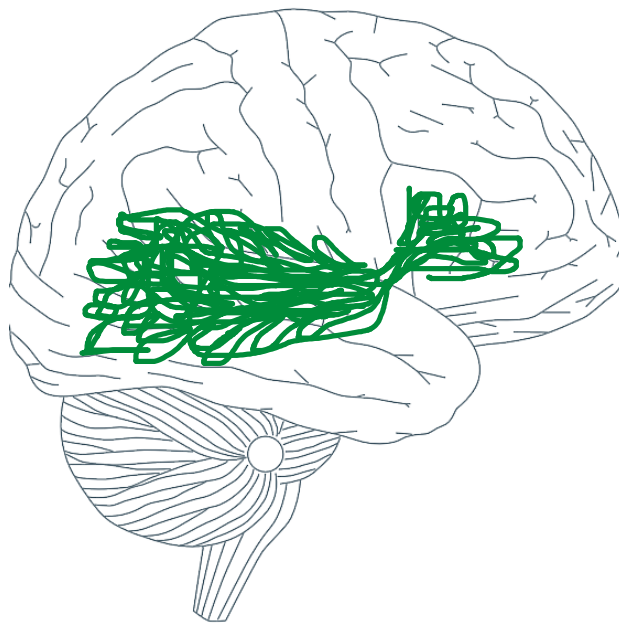
Myelinisaation kehitys on nopeinta varhaislapsuudessa 0-1,5 vuoden iässä, jolloin aivojen myelinisaatioaste nousee voimakkaasti lähes olemattomasta lähes aikuistyyppiseksi (myelinisaatiota kuvaavan luvun kehitys 0,88 → 0,5, aikuisaivoissa 0,4).¹⁸ Voimakkainta myelinisaatio on ensimmäisten 1,5 vuoden aikana primaareilla aivoalueilla (liike-, kuulo- ja näköaivokuori), mutta hitaampaa kehitystä tapahtuu samanaikaisesti myös kognitiivisesta näkökulmasta ”korkeammilla” kielialueilla, kuten Brocan ja Wernicken alueilla.¹⁸ Primaarien alueiden nopeampi myelinisaatio selittyy myelinisaation etenemisellä yhtäaikaaisesti hermoradan toiminnallisen käyttöönoton kanssa. Ennen korkeampien kielellisten taitojen kehittymistä ja käyttöönottoa, lapsen täytyy ottaa haltuun perustaidot, kuten kuunteleminen, näönvarainen havainnointi ja kasvojen alueen motoriikka.¹⁸

Toisen ja kolmannen ikävuoden väliin ajoittuu myelinisaatiokehityksen tasannevaihe. Kolmen ja viiden ikävuoden välillä myelinisaatio jälleen kiihtyy, minkä jälkeen tahti hidastuu lähestyen pikkuhiljaa aikuistyyppistä myelinisaatiota. 8-vuotiaan aivoissa kielialueiden anatominen myelinisaatioaste on jo hyvin aikuistyyppinen. Myelinisaatio kuitenkin jatkuu varhaislapsuutta huomattavasti maltillisemmalla tahdilla aikuisikään saakka, minkä ajatellaan liittyvän kielellisten taitojen muovautumiseen nuoreen aikuisikään saakka.¹⁸ Lakipisteensä aivojen kokonaismyelinisaatioaste saavuttaa noin 50-60 vuoden iässä²².

3.5 Myelinisaatio kielenkäsittelyn kannalta keskeisten alueiden välillä

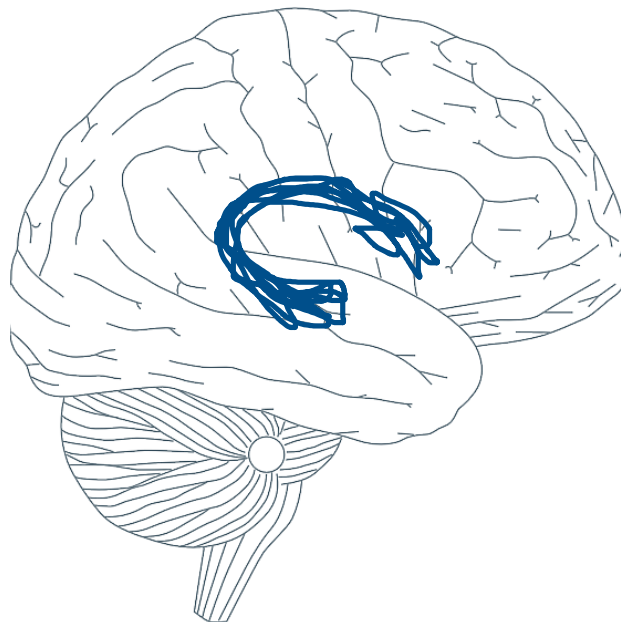
Huolimatta myelinisaatioasteen voimakkaasta kehityksestä varhaislapsuudessa Brocan ja Wernicken alueilla sekä niitä yhdistävissä valkean aineen radastoissa, lapsen aivoissa kielenkäsittelylle tärkeät aivoalueet kytkeytyvät toisiinsa eri tavoin kuin aikuisilla. Aikuisen kypsissä aivoissa sekä ventraalinen että dorsaalinen reitti yhdistävät otsa- ja ohimolohkon kielialueita (Broca ja Wernicke) sekä muita kielellisille taidoille tarpeellisia aivoalueita päälaki- ja takaraivolohkoissa. Kumpikin reitti koostuu useammasta alayksiköstä, joiden kypsymisaikataulussa ja roolissa kielenkehityksen kannalta on vaihtelua.^{26,27}

Ventraalinen reitti kypsyy dorsaalista varhaisemmin ja on vastasyntyneisyyskaudella ainoa ohimo- ja otsalohkon kielialueita yhdistävä rata (kuva 4). Reitti kulkee inferiorisen fronto-okkipitaalisen fasciculuksen kautta extreme capsulen ja external capsulen läpi yhdistäen toisiinsa laajoja alueita otsa-, ohimo-, päälaki- ja takaraivolohkoista. Ventraalista reittiä kutsutaan myös extreme capsule fiber systemiksi. 3-5 -vuotiaiden lasten ventraalisen reitin kehittyneisyyttä verrattaessa, havaitaan reitin olevan vanhempien lasten aivoissa nuorempia kehittyneempi ²⁸. 7-vuotiaana ventraalinen reitti on jo huomattavan aikuistyyppinen ulottuen laajalle alueella otsa-, ohimo- ja takaraivolohkoja. ²⁷



Kuva 4. STG:n ja IFG:n kielialueita yhdistävä ventraalinen reitti.

Dorsaalinen reitti kypsyy ventraalista myöhemmin ja kulkee spesifimmin ohimolohkon kielialueiden (STG/STS) ja otsalohkon IFG:n välillä pitkin arcuate fasciculusta (kuva 5). Vastasyntyneen aivoissa dorsaalinen reitti on hyvin kypsytön, eikä se vielä ylety yhdistämään kielialueita, vaan päättyy ohimolohkon STG:stä lähdettyään otsalohkon premotoriselle korteksille. 3-5 ikävuoden välillä dorsaalisen reitin rooli ja kehittyneisyys lisääntyy. 5-vuotiailla reitti on aktiivisemmassa käytössä kuin 3-vuotiailla. ²⁸ 7-vuotiaan aivoissa radan kypsyminen on edelleen edennyt ja se ylettyy STG:stä lähdettyään lähes aikuistyyppisesti Brocan alueelle (BA 44). ²⁷ Vaikka superior longitudinal fasciculus (SLF) ja AF ovat kielen kannalta toiminnallisesti vasemmalle lateralisoituneita, tapahtuu anatominen kypsyminen bilateraalisesti symmetrisesti ²⁹.



Kuva 5. STG:n ja IFG:n kielialueita yhdistävä dorsaalinen reitti.

Vastasyntyneillä ventraalinen reitti on ainoa Brocan ja Wernicken alueita yhdistävä rata ²⁷. 7-vuotiaiden lasten aivoissa kielialueet kytkeytyvät toisiinsa sekä ventraalista että dorsaalista reittiä pitkin. Aikuisilla käytössä on ainoastaan dorsaalinen reitti, minkä voidaan ajatella johtuvan aikuisaivojen paremman kypsyneisyyden kautta tehokkaammasta konnektiviteetista aivoalueiden välillä, jolloin oletettavasti epäspesifimmän ventraalisen reitin tuelle ei enää ole tarvetta. ²⁶

4 AIVOJEN TOIMINNALLINEN KEHITYS LAPSUUDESSA

4.1 Semanttinen tiedonkäsittely

Lapsen semanttiseen tiedonkäsittelyyn liittyvä aivoaktivaatio muistuttaa vasemmalle lateralisoitumista myöten paljon aikuistyyppistä jo 5-vuotiaasta lähtien ^{30,31}. 5-vuotiaat lapset hyödyntävät kielellisessä tiedonkäsittelyssään ensisijaisesti semanttisia vihjeitä, syntaksisen tiedonkäsittelyn tehostuessa vasta myöhemmin ³². Nuorempien lasten osalta tutkimustietoa semanttisesta tiedonkäsittelystä on hyvin vähän, eikä katsauksen otantaan osunut alle 5-vuotiaita lapsia käsitelleitä tutkimuksia.

5-vuotiailla lapsilla semanttinen tiedonkäsittely aktivoi vasenta IFG:n pars triangularista ja pars orbitalista sekä pSTG:sta, kun taas aikuisilla aktivoituu kohdennetummin vasemman IFG:n pars triangularis ³². Pääosin lapsilla aktivoituvat kuitenkin semanttisen työskentelyn aikana pitkälti samat aivoalueet kuin aikuisilla: vasen MTG ja STG ohimolohkossa, vasen IFG otsalohkossa sekä näiden oikeanpuoleiset homologit. Lisäksi aktivoituvat aikuisten tapaan oikea insula, bilateraaliset superioriset ja mediaaliset otsa-alueet pitäen sisällään supplementary motor arean (SMA), vasemman inferior temporal gyruksen, cuneuksen, bilateraaliset lingual ja fusiform gyrukset, bilateraaliset talamuksen sekä pikkuaivot. ³³ (Liite 2.)

Aikuisilla aktiivisuus on kuitenkin monilla edellä mainituilla alueilla lapsia voimakkaampaa (vasen pre- ja postsentraalinen gyrus, vasen inferiorinen päälakilohko, vasen supramarginaaligyrus, vasemman IFG:n pars opercularis, bilateriaalinen SMA, oikea cuneus/precuneus ja oikea pikkuaivo). ³³ Tämä ikäriippuvainen aktiivisuuden lisääntyminen käynnistyy jo lapsuuden/nuoruuden aikana ³⁰. 5-18 -vuotiaiden lasten esineiden nimeämistä tutkineessa tutkimuksessa havaittiin ikäriippuvaista aktiivisuuden lisääntymistä näönvaraisesti havaittujen asioiden nimeämiseen keskittyneillä alueilla (ventral visual pathway) sekä semanttisen materiaalin mielessä pitämiseen (bilateraaliset IFG:n dorsaaliosat, vasen precuneus, vasen STG ja MTG ja anteriorinen cingulate) ja eri lähteistä tulevan tiedon integraatioon ja päätöksentekoon (bilateraaliset IFG:n ventraali/anterioriosat) linkittyvillä alueilla ³⁰.

4.2 Syntaksinen tiedonkäsittely

Leikki-ikäisten lasten aivoissa syntaksi ja semantiikka ovat vielä neuraalisesti eriytymättömiä. 3-4 -vuotiailla lapsilla syntaksisen tehtävän yhteydessä aivoissa aktivoituu vain semanttisen tiedonkäsittelyn kanssa yhteinen aivoalue vasemmalla ohimokorteksilla (pSTG ja mSTG) ja lisäksi vasteena kielelliselle ärsykkeelle ns. yleinen kieliverkosto, joka kattaa laajalti perisylyvaanisia ohimo-, otsa- ja päälakilohkoalueita.³ 5-vuotiailla haastavampi syntaksinen tiedonkäsittely korreloi lisääntyneeseen vuorovaikutukseen vasemman IFG:n ja pSTG:n ja posteriorisen superior temporal sulcuksen välillä, mikä osaltaan kertoo syntaksiseen prosessointiin osallistuvasta aivoverkosta lapsuudessa³⁴.

län myötä syntaksiseen prosessointiin liittyvä aktivaatio alkaa eriytyä. 6-7 -vuotiaiden lasten ikäryhmässä havaittiin syntaksiselle ja semanttiselle tiedonkäsittelylle yhteisen aktivaatioalueen lisäksi jo eriytynyttä aivoaktivaatiota riippuen, suoritetaanko syntaktista (posteriorinen osa vasenta STG/STS:sta) vai semanttista (keskiosa vasenta STG/STS) prosessointia vaativaa tehtävää.³ Vasemman ohimolohkon syntaksiselle käsittelylle spesifin aktiivisuuden lisäksi jo osalla esikouluikäisistä lapsista (5-7 -vuotta) on havaittavissa myös aikuistyyppistä otsalohkon IFG:n aktivaatiota syntaksista tehtävää suoritettaessa⁴. (Liite 2.)

Viimeistään noin 9-10 vuoden iässä syntaksinen tiedonkäsittely kohdentuu aikuistyyppisesti vasempaan IFG:een.^{3,35} Kouluiässä ja nuoruudessa IFG:n aktivaatio on kuitenkin aikuisiin verrattuna laaja-alaista kattuen sekä pars operculariksen että pars triangulariksen³, kun aikuisilla syntaksisen tiedonkäsittelyn tiedetään painottuvan erityisesti pars opercularikseen³⁶. Aktivaation lateralisoituminen enenevissä määrin vasempaan aivopuoliskoon korreloi positiivisesti paremman syntaksisen suoriutumisen kanssa³⁵.

län ohella tärkeä tekijä syntaksisen tiedonkäsittelyn eriytymisessä ohimolohkon STG:sta otsalohkon IFG:een on todennäköisesti lapsen kielellinen taitavuus^{4,35}. Jo 4-6 -vuotiaiden lasten joukossa havaittiin vasemmalle painottuvaa IFG:n aktivaatiota, joka ei korreloinut lasten iän vaan kielellisen taitotason kanssa⁴. Vastaava korrelaatio IFG:n aktivaation voimakkuuden ja taitotason välillä havaittiin myös 7-15 -vuotiaiden lasten kohdalla³⁵.

Syntaksisen tiedonkäsittelyyn liittyvän aivoaktivaation voidaan nähdä noudattavan yleistä aivotoiminnan kehitystä kuvaavaa teoriaa, jossa laajasta aivoaktivaatiosta edetään kehityksen myötä tehtäväspesifimpään aktivaatioon¹⁴. Syntaksinen prosessointi etenee laajasta bilateraalista semanttisen tiedonkäsittelyn kanssa yhteisestä ohimolohkoaktivaatiosta (STG) pikkuhiljaa eriytyen kohti aikuistyyppistä vasemman aivopuoliskon IFG:n aktivaatiota^{3,4,35}.

4.3 Puheen kuunteleminen ja ymmärtäminen

4.3.1 Puheen kuuntelemisen ja ymmärtämisen toiminnallinen kehitys

Verrattuna kielen muihin elementteihin, kuten puheen tuottamiseen tai lukemiseen, on kuullun ymmärtämiseen liittyvä aivoaktivaatio pysyvämpää jo lapsuudesta alkaen. Jo 2-4 vuoden ikäisillä lapsilla aktivoituvat kuullun ymmärtämistä vaativien tehtävien aikana pitkälti samat aivoalueet kuin aikuisilla: bilateraalinen kuuloaivokuori ja STG³⁷⁻³⁹. Iän myötä aktivaatio kuitenkin kohdentuu edelleen tiukemmin kielen ymmärtämiselle spesifeille aivoalueille bilateraaliseen STG:een ja MTG:een apualueiden aktivaation vähentyessä^{14,40}. Kielen ymmärtämiseen ja puheen kuuntelemiseen liittyvän aivoverkon kehitystä tukee muun muassa lapsen ja vanhemman vuorovaikutus ja yhdessä lukeminen leikki-iässä ennen varsinaisen lukutaidon kehitystä^{41,42}.

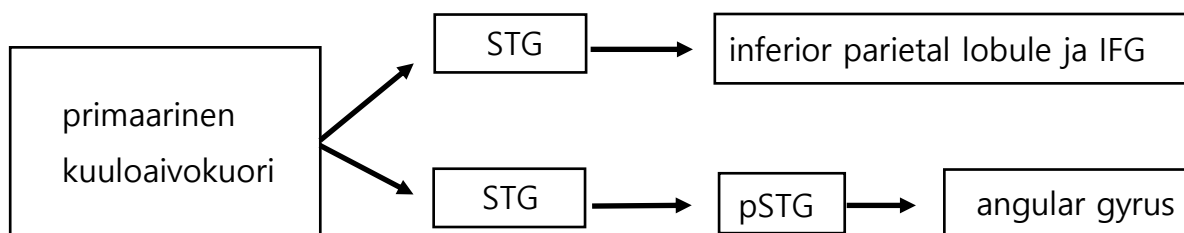
Kohdentumista kohti spesifistä STG:n ja MTG:n aktivaatiota tapahtuu merkittävästi jo 2 ja 3 ikävuoden välissä. Puheen aikaista aivoaktivaatiota tutkineessa fMRI-tutkimuksessa havaittiin 2-vuotiailla laaja aktivaatio otsa-, takaraivo- ja pikkuaivolohkoissa, kun 3-vuotiailla aktivaatio oli jo painottunut selkeästi bilateraalisiin ohimolohkoihin. Suurimmat tehtäväaikaisen aivoaktivaation erot ikäryhmien välillä havaittiin bilateraalisesti medial frontal gyrissa, oikeassa superior frontal gyruksessa, vasemmassa MFG:ssa ja bilateraalisesti pikkuaivoissa.³⁷ (Liite 2.) 3- ja 6-vuotiailla lapsilla puheen kuuntelemisen aikana aktivoituvat edellä kuvatun mukaisesti pitkälti samat aivoalueet pSTG:ssa ja IFG:ssa, mutta ikäryhmien välillä on eroa aivoalueiden tehtävänäikaisessa vuorovaikutuksessa. 3-vuotiailla pSTG yhdistyy vahvasti IFG:n pars triangularikseen, kun taas 6-vuotiailla yhteys on vahvin pSTG:n ja pars operculariksen välillä.⁴³ Myös 5- ja 6-vuotiaiden lasten ohimolohko-

osien välisiä yhteyksiä verranneessa tutkimuksessa todettiin vasemman ohimolohkon sisäisen konnektiviteetin lisääntyvän iän myötä ⁴⁴.

Kielen ymmärtämisen ydinalueiden aktivaatio on aikuistyyppistä jo 4-vuotiaasta lähtien ³⁸. Anatomisesti ymmärtämisen ydinalue, eli niin sanottu comprehension cortex, sijaitsee superior temporal sulcuksen alueella ohimolohkossa. 4-12 -vuotiaita lapsia tutkineessa fMRI-tutkimuksessa havaittiin tämän ohimolohkoaktivaation olevan melko stabiilia, kun taas kuullun ymmärtämistehtävän aikainen otsalohkoaktivaatio on lapsilla vielä aikuisia vähäisempää. ³⁷

4.3.2 Puheen ymmärtämisen suora ja epäsuora reitti aivoissa

Laajassa 5-18 -vuotiaiden lasten puheen kuuntelemisen aikaista aivotoimintaa tutkineessa fMRI-tutkimuksessa (n= yli 313) voitiin puheen ymmärtämiseen linkittyvä aivoaktivaatiketju jakaa rakenteellisesti suoraan ja epäsuoraan aktivaatioreittiin ⁴⁵.



Kuva 6. Kuulonvaraisen kielenkäsittelyn suora- (ylempi) ja epäsuora (alempi) reitti

Molemmat reitit alkavat samoin (kuva 6). Bilateraalaisesti ohimolohkon yläosissa sijaitseva primaarinen kuuloaivokuori tunnistaa korvan hermosoluista välittyvän impulssin kielen tapauksessa puheeksi ja välittää impulssin eteenpäin STG:een. STG huolehtii kuulonvaraisen kielellisen materiaalin ensilinjan jatkokäsittelystä. STG:n ajatellaan analysoivan puhetta ja muokkaavan sen ominaisuuksia, mikä mahdollistaa prosessin myöhemmissä vaiheissa puheen ymmärtämisen kaikkine prosodisine vihjeineen ja tunneviesteineen. ⁴⁵

Suora reitti jatkaa STG:sta suoraan inferior parietal lobulen (koostuu supramarginal ja angular gyruksesta) ja IFG:n alueelle. Alueet ovat tyypillisesti toiminnallisesti vasemmalle lateralisoituneita. Inferior parietal lobulen ja IFG:n ajatellaan osallistuvan puheen syntaksiseen prosessointiin syntaksisena työmuistina. ⁴⁵

Epäsuora reitti kiertää STG:sta korkeampiin integrointiprosesseihin (semantiikan, syntaksin ja pragmaattisen tiedon yhdistämiseen) yhdistetyn posteriorisen STG:n kautta angular gyrukseen. Angular gyrus vastaa yhdessä precuneuksen ja posterior cingulaten kanssa vastaa puheen korkeammasta semanttisesta prosessoinnista ja keskittymisestä. Epäsuora reitti on bilateraalin. ⁴⁵

4.4 Kielen tuottaminen

Kielen tuottoon liittyvä aivoaktivaatio lapsuudessa lisääntyy tai vähenee iän myötä tutkitusta aivoalueesta riippuen. Tiivistetysti voidaan todeta aktivaation iän myötä lisääntyvän vasemman otsa- ja ohimolohkon tunnetuilla kielialueilla (IFG, STG ja MTG), muun aktivaation vähentyessä. ^{40,46,47} Tulos pätee myös vieraan kielen tuottamisen kohdalla ⁴⁸.

Kielen tuottoa laadullisesti (sanaston laajuus) arvioitaessa varhaislapsuuden kielellisillä taidoilla on havaittu olevan merkittävä ennustearvo kouluiän kielitaitoihin ⁴⁹. 2-vuotiaana laajan sanavaraston omaavat lapset ovat alakoulun ensimmäisillä luokilla kielellisesti edellä taaperona niukemman sanavaraston omanneisiin lapsiin verrattuna. Kielen tuoton ohella taaperoiän laaja sanavarasto korreloi positiivisesti myös lukemisen sujuvuuteen ja oikeellisuuteen sekä puhutun kielen ymmärtämiseen kouluiässä. ⁴⁹.

5-18 -vuotiailla lapsilla äänetön kielen tuotto vasteena fonologiseen ärsykkeeseen (ns. verb generation task) lisää iän myötä aktivaatiota vasemmanpuoleisessa IFG:ssa, MTG:ssa ja angular gyruksessa sekä oikeanpuoleisissa lingual ja inferior temporal gyruksissa ^{46,47}. Samanaikaisesti aktivaatio vähenee vasemmassa posterior insulassa, superior frontal gyruksessa ja talamuksessa sekä oikeassa anterior cingulate gyruksessa ⁴⁷. Äänetön kielen tuotto visuaalisen ärsykkeen stimuloimana aktivoi iän myötä lisääntyvissä määrin myös oikeaa pikkuaivoa ⁴⁰. (Liite 2.)

Aktivaation lisääntymistä iän myötä otsa- ja ohimolohkon alueilla (IFG, STG ja MTG) ja vähentymistä epäspesifeillä kielen apualueilla, voidaan selittää kielellisen erikoistumisen hypoteesilla. Hypoteesin mukaan lapsen aivojen määrällisen aktivaation kielellistä tehtävää suorittaessa voidaan ajatella olevan kehityksen aikana vakio. Aluksi vaimea, mutta laaja aktivaatio painottuu iän myötä myöhemmin kypsyvien ja pienempien erikoistuneiden alueiden aiempaa voimakkaammaksi aktivaatioksi. ^{14,46,47}

Toinen hypoteesi, jolla aktivaatiomuutosta voidaan selittää, on suorituksen automatisoituminen iän ja samalla taitojen karttumisen myötä. Taitavammat aivot tarvitsevat vähemmän keskittymistä ja siten suppeampi aktivaatio riittää samaan suoritukseen. ^{14,47}

4.5 Lukeminen

Lukutaito on evolutionaarisesti nuori kulttuurinen kyky, joten on syytä olettaa, että lukutaidolle spesifistä aivoaluetta ei evoluution kautta ole kehittynyt. Ihmislajin oppiessa käyttämään symboleita kielen ja muistiin merkitsemisen välineenä, ovat ensisijaisesti muuta tehtävää hoitaneet aivoalueet todennäköisesti laajentaneet toimintaansa ja ottaneet uuden tehtävän hoitaakseen. ⁵⁰

Lukutaito on ympäristön kautta opittava taito, jonka kehitykseen elinympäristö vaikuttaa merkittävästi. Tutkimuksissa on todettu varhaisen sanastonlaajuuden (sanasto 2-vuotiaana) ja äidin lukutaidon sujuvuuden vaikuttavan lapsen myöhempään lukutaitoon 4-9 -vuotiaana ^{49,51}. Taaperona laajemman sanavaraston omaavat lapset lukevat alakoulun ensiluokilla tarkemmin ja sujuvammin kuin suppeamman sanavaraston omaavat lapset ⁴⁹. Äidin parempi lukutaito lapsen ensivuosien aikana sen sijaan ennustaa tehokkaampaa ja kypsempää lukemiseen osallistuvien aivo-osien yhteistyötä 4-vuotiaana ⁵¹.

Keskeisenä aivoalueena lukemiselle pidetään vasemmassa ohimo-/takaraivolohkossa sijaitsevaa vasenta fusiform gyrusta ja sitä ympäröivää aivokuorta. Kokonaisuutena alueesta puhutaan termillä visual word form area (VWFA) tai visual word-form system (VWFS). ^{50,52} Alueen tehtävänä on tunnistaa

nähtyjen symbolien (esim. kirjainten) tunnistaminen kieleksi ja muovaaminen ymmärrettäviksi sanoiksi. VWFA:n herkkyys visuaalisesti esitetyille kielelle voidaan todeta fMRI- ja ERP-menetelmin jo ainakin 6-vuotiailla lapsilla. Aktivaatio lisääntyy lukutaidon oppimista tukevien harjoitteiden tekemisen myötä.⁵⁰ 7-14 -vuotiailla lapsilla VWFA:n sensitiivisyys sanojen tunnistamiselle, verrattuna esimerkiksi kuviin, on jo kehittynyt, mutta alueen spesifisyys sanoille jatkaa kehittymistään vielä myöhempään nuoruuteen⁵³. Alakouluikäisten lasten aivoissa luetut sanat ja samaa sanaa esittävät kuviot (esimerkiksi sana *hevonen* ja kuva hevosesta) eivät saa aikaan samojen aivoalueiden aktivoitumista, mikä todennäköisesti kertoo kirjoitettuun kieleen liittyvän aivotoiminnan kehittymättömyydestä aikuisiin verrattuna⁵⁴.

VWFA:n lisäksi lukeminen aktivoi 4-12 -vuotiailla lapsilla kielenkäsittelyn tunnettuja perusalueita (vasen IFG, vasen STS, oikea STG), mutta myös spesifisti lukutehtävän suorittamiseen yhdistyviä aivoalueita: bilateraallinen okkipitaalialue, superior frontal gyrus ja oikea IFG (liite 2.). Lukemiseen liittyvä aivoaktivaatio on melko stabiilia jo nuorella iällä, eikä merkitsevää ikäsidonnaista muutosta havaittu.³⁸

Lukutaito muuttaa aivojen toimintaa muiden kielellisten taitojen osalta. Jo muutaman kuukauden lukutaidon opetus lisää 6-vuotiailla lapsilla kuultuun puheeseen liittyvää aktivaatiota posteriorisessa superior temporal sulcuksessa, planum temporalessa, temporal polella ja IFG:n pars orbitaliksessa. Aktivaatio mainituilla alueilla edelleen lisääntyy lukutaidon parantumisen myötä. Verrattaessa 6- ja 9-vuotiaiden lasten (0 tai pari kk lukutaidon opetusta vs. 3 vuotta opetusta) aktivaatiovastetta kuultuun kieleen, todetaan aktivoituvien aivoalueiden olevan pääosin samat, mutta 9-vuotiailla aktivaatio on vahvempaa. Lisäksi enemmän lukemista harjoitelleilla 9-vuotiailla aktivoituu kieltä kuunnellessa VWFA, mitä ei havaittu 6-vuotiailla lapsilla riippumatta heidän lukutaidon opetuksen määrästä.⁵²

5 AIVOTOIMINNAN LATERALISAATION KEHITYS LAPSUUDESSA

5.1 Rakenteellisen lateralisaation kehitys

Valkean aineen osalta 1-6 -vuotiailla lapsilla todettiin MRI-pohjaisessa tutkimuksessa rakenteellisesti vasemmalle lateralisoituneiksi aivoalueiksi post central sulcus, supramarginal gyrus, takaraivo-ohimolohko -alue, otsa-aivokuori, talamus ja caudatus. Näistä iän myötä vaihteleva korrelaatio kielen tuottoon todettiin otsa-aivokuorella ja kielen vastaanottoon talamuksella ja caudatuksella. Kielen tuoton ja otsa-aivokuoren rakenteellisen lateralisaation yhteys on lapsuudessa aluksi negatiivinen, mutta muuttuu iän myötä positiiviseksi. Kielen vastaanoton ja talamuksen ja caudatuksen kohdalla tilanne on päinvastainen.⁵⁵ Positiivinen korrelaatio tarkoittaa tässä yhteydessä voimakkaamman lateralisaation yhdistymistä parempaan suoriutumiseen kielitesteissä, kun taas negatiivinen korrelaatio tarkoittaa vähäisemmän lateralisaation eli bilateraalisemman aivoaktivaation yhdistymistä parempaan suoriutumiseen.

Lapsuuden aikana rakenteellisesti oikealle lateralisoituneita aivoalueita ovat presentraalinen alue, putamen/extreme capsule ja ventraalinen frontaalialue. Näistä korrelaatio kielen tuottoon ja vastaanottoon todettiin putamenin/extreme capsulen osalta. Yhteys alkaa negatiivisena, mutta muuttuu iän myötä positiiviseksi. Korrelaatio valkean aineen rakenteellisen lateralisaation ja kielellisten kykyjen välillä elää varhaislapsuudessa ja stabiloituu noin neljään ikävuoteen mennessä.⁵⁵

Arcuate fasciculus on Brocan ja Wernicken alueet yhdistävä valkean aineen kimppu. Rakenne on todennäköisesti bilateraalinen, vaikka oikean AF:n todentaminen tutkimuksissa ei kaikilta kuvausteknisistä syistä ole onnistunut. 7-11 -vuotiailla tytöillä arcuate fasciculuksen anatominen lateralisaatio korreloi negatiivisesti fonologiseen muistiin ja lukutaitoon, mikä puoltaa oikean puolen roolia kielellisessä prosessoinnissa.⁸

5.2 Toiminnallisen lateralisaation kehitys

5.2.1 Semantiikka

Semanttinen tiedonkäsittely lateralisoituu aikuistyyppisesti kohti vasenta aivopuoliskoa todennäköisesti jo ennen kouluikää ⁵⁶. Kuulonvaraisen semanttisen tiedonkäsittelyn osalta jo 5-7 -vuotiailla lapsilla todetaan aikuistyyppisesti tyypillisesti vasempaan aivopuoliskoon lateralisoitunutta aivotoimintaa IFG:ssa, MFG:ssa, STG:ssa, MTG:ssa ja fusiform gyruksessa ^{31,56}. Toisaalta osa tutkimuksista puoltaa erityisesti otsalohkojen IFG:n ja MFG:n osalta vasta lähempänä 10 ikävuotta stabiloituvasta ja kokonaisuudessaan ohimolohkoalueita huomattavasti heikommasta lateralisaatiosta semanttisen tiedonkäsittelyn osalta ⁵⁶.

5.2.2 Puheen kuunteleminen

Puheen kuuntelemiseen liittyvä ohimolohkoaktivaatio, mukaan lukien Wernicken alueen aktivaatio, on suhteellisen stabiilia jo neljään ikävuoteen mennessä ³⁸. Aktivaation lateralisaatio jatkaa kuitenkin kehittymistään lisääntyen iän myötä ⁵⁷. 3- ja 5-vuotiaiden lasten ohimolohkoaktivaatiota verrattaessa todettiin STG:n aktivaation lateralisoituvan 5-vuotiailla nuorempia enemmän vasemmalle ²⁸. Tutkimustulokset lateralisaation vahvuudesta ja stabiloitumisajankohdasta lapsuudessa ovat kuitenkin ristiriitaisia. Useiden tutkimusten mukaan ohimolohkoaktivaatio STG:ssa ja MTG:ssa lateralisoituu pysyvästi melko varhain ollen aikuistyyppistä neljän ja seitsemän ikävuoden välillä ^{38,40,56}. Yleensä lateralisoituminen painottuu kohti vasenta aivopuoliskoa ⁵⁸. Suurin osa tutkimustuloksista puoltaa varhaista ja vähintään melko vahvaa lateralisoitumista, mutta on myös näyttöä bilateraalisesta STG:n ja MTG:n puheen aikaisesta aktivaatiosta läpi lapsuuden/nuoruuden ⁴⁰ ja lateralisaation lisääntymisestä aina 20 ikävuoteen saakka ⁵⁷.

Kuuntelemiseen liittyvä otsalohkoaktiivisuus hakee iän myötä enemmän paikkaansa ja on selkeästi lateralisoitumisestaan huolimatta ohimolohkoaktiivisuutta bilateraalisempaa 4-12 -vuotiailla lapsilla ^{38,56}. IFG:n ja MFG:n aktiivisuuden ja lateralisaation kehitys kohti dominanttia aivopuoliskoa (yleensä vasen) vakiintuu noin 10 ikävuoteen mennessä ⁵⁶. Toisaalta osa tutkimustuloksista puoltaa lateralisaatioasteen lisääntymistä 15-20 ikävuoteen saakka ^{57,59}.

5.2.3 Kielen tuottaminen

Kielen tuottamiseen (puhe tai äänetön sanojen luominen) liittyvä otsa- ja ohimolohkojen (IFG, MFG, STG, MTG) aivoaktivaatio on havaittavasti lateralisoitunutta jo 5-vuotiailla lapsilla ^{14,57}. Tyypillisintä on aktivaation painottuminen vasempaan aivopuoliskoon. Kielen tuottamisen kohdalla lateralisaatio vasempaan aivopuoliskoon on vielä muita kielellisiä toimintoja vahvempaa. ⁴⁰ Huolimatta lateralisaatiokehityksen käynnistymisestä jo ennen kouluikää, tutkimukset ovat yksimielisiä kielen tuottoon liittyvän lateralisaation vahvistumisesta edelleen läpi lapsuuden ja nuoruuden ^{40,58,60,61} jopa 20-vuotiaaksi saakka ⁵⁷.

Kielen äänettömään tuottamiseen liittyen tapahtuu iän myötä lateralisaation muutoksia ^{40,57}. 5-20 -ikävuoden välillä kielen tuottamiseen liittyvä lateralisaatio voimistuu ^{40,47}. Aktivaation lateralisaatio kohti dominanttia aivopuoliskoa (kielen tapauksessa yleensä vasenta) lisääntyy lineaarisesti lapsuus-/nuoruusvuosina 5-20 -ikävuoden välillä, minkä jälkeen taso pysyy varhaisaikuisuuden ajan vakaana, kunnes kääntyy taas 25 ikävuoden kohdalla laskuun ⁵⁷.

5.2.4 Lukeminen

Lukeminen on kielellisesti vaativa taito, joka opitaan yleensä suhteellisen myöhään kielen perustaitojen omaksumisen jälkeen. Lukemisen haasteellisuus 4-12 -vuotiaille lapsille havaitaan aivojen aktivaatiossa laajana epädominantin aivopuoliskon homologisten apualueiden käyttönä lukutehtävää suoritettaessa. Lukemiseen liittyvä ohimo- ja otsalohkoalueiden (STG, STS, IFG ja SFG) aktivaatio lateralisoituu fMRI-kuvantamistutkimuksissa, mutta lateralisaatio on huomattavasti heikompaa kuin esimerkiksi kuuntelemiseen tai kielen tuottoon liittyvä. Tyypillisesti lateralisaatio painottuu kohti vasenta aivopuoliskoa. Lukemisen näönvaraisuuteen liittyvä takaraivolohkon aktivaatio on lapsuudessa bilateraalista. ³⁸

5.3 Lateralisaatiokehitykseen vaikuttavia tekijöitä

5.3.1 Sukupuoli

Tulokset sukupuolen vaikutuksesta lasten aivojen lateralisaatioon ovat ristiriitaisia. Osassa tutkimuksia tyttöjen ja poikien välillä ei ole havaittu olevan eroa rakenteellisessa⁵⁵ eikä toiminnallisessa lateralisaatiossa^{56,57}, kun taas osa tutkimuksista on havainnut eroja^{8,58,60}.

4-10 -vuotiailla tytöillä kielen tuottamiseen liittyvä aivotoiminta on kokonaisuudessaan poikia bilateraalisempaa ja otsalohkoalueiden osalta jopa oikealle lateralisoitunutta. Poikiin verrattuna aktiivisuus myös koostuu laajemmalle alueelle levittäytyneistä yksittäisistä aktivaatiopisteistä tiiviiden aktivaatiokeskusten sijaan. Aktivaatio on tytöillä sitä bilateraalisempaa ja vähemmän fokusoitunutta, mitä nuorempi lapsi on kyseessä. Noin 10 ikävuodesta alkaen tyttöjen aktivaatio vastaa poika- tai aikuistyyppistä tiukemmin vasemmalle lateralisoitunutta aktivaatiomallia.⁶⁰

5.3.2 Kätisyys

Atyyppinen lateralisaatio eli kielellisten toimintojen kohdentuminen aivoissa toiminnallisesti oikeaan aivopuoliskoon tai bilateraalisesti, on vasenkätisillä lapsilla oikeakätisiä yleisempää. Oikeakätisistä 5-18 -vuotiaista 93 % on otsalohkon kielen tuottoon liittyvien aivoalueiden (IFG ja dorsolateraalinen prefrontaalialue pitäen sisällään osia MTG:sta ja precentral sulcuksen) toiminnan osalta lateralisoitunut vasemmalle, kun vasenkätisistä lapsista 83 %. Temporo-parietaalisten kielialueiden (ohimolohkon alue alkaen STG:n BA 41-42:sta jatkuen inferiorisesti pitkin MTG:tä ja päättyen ITG:n rajalle) osalta vastaavat luvut ovat 91% ja 67%. Tulos ja prosenttiosuudet vastaavat aikuistutkimuksissa saatuja tuloksia.⁵⁸

6 POHDINTA

Katsauksen tavoitteena oli perehtyä lasten aivojen ja kielen kehitystä tutkineisiin tutkimuksiin ja muodostaa tulosten perusteella laajahko yhteenveto lasten kielelliseen tiedonkäsittelyyn liittyvän aivotoiminnan ominaispiirteistä ja kehityksestä.

Katsauksessa keskityttiin pääosin 2-12 -vuotiaita lapsia käsitteleviin tutkimuksiin, mutta edellytys oli, että varhaisin mittapiste oli korkeintaan 7 vuoden iässä.

Hiukan yllättäen suuren linjan päätuloksena voidaan todeta lasten kielelliseen toimintaan liittyvän aivotoiminnan olevan monelta osin aikuistyyppistä. Lapsilla aktivoituvat kielellisten tehtävien aikana tyypillisesti samat spesifit kielialueet kuin aikuisillakin, mutta tunnettujen tehtäväspesifisten kielialueiden lisäksi lapset hyödyntävät laajempaa aivojen apualueiden verkostoa kielellisessä tiedonkäsittelyssään. Lasten aivojen kypsymättömyys aikuisavoihin verrattuna näyttäytyy siis laajempana, mutta epäspesifimpänä aivoaktivaationa kielellistä tehtävää suoritettaessa. Sama kaava kuvaa myös aivojen eri osien välisen rakenteellisen ja toiminnallisen yhteydenpidon sekä lateralisaation kehitystä. Lapsuudessa aivojen väliset yhteydet ovat kankeita ja laajoja, mutta aivojen kypsyessä yhteydet tarkentuvat ja toiminta näin tehostuu.

Katsaus pyrki keskittymään tasapuolisesti 2-12 -vuotiaisiin lapsiin, mutta tehtyjen tutkimusten osalta selkeä pääpaino artikkelipoiminnassa on yli 5-vuotiaissa lapsissa, sitä nuorempien ollessa selkeästi aliedustettuina. Taustalla on nuoremmilla lapsilla tehtyjen tutkimusten vähäinen määrä. Tilanne on ristiriitainen, koska suurimmat muutokset niin aivotoiminnassa kuin kielenkehityksessäkin tapahtuvat 0-4 ikävuoden välillä, mutta tutkimuksissa juuri tämä ikäjoukko on katveessa. Taustalla on todennäköisesti ikäjoukon mittauksiin liittyvät haasteet niin kuvantamisen kuin kielellisen toiminnan testaamisenkin osalta. Kuitenkin kehitysaskeleiltaan merkittävimmän ikäjoukon kielenkäsittelyn aikaisen aivotoiminnan pysyessä mysteerinä, jäävät tietomme aivojen kehityksessä lapsuudessa väijäämättä vaillinaiseksi.

Lapsuus on niin aivojen toiminnan kuin kielenkin kehityksen kannalta äärimmäisen nopeatempoista aikaa, jolloin myös yksilöiden väliset taitoerot ovat merkittäviä.

Tutkimuskenttä aivojen ja kielen välisen liiton saralla on laaja. Kyetäksemme ymmärtämään lajillemme ainutlaatuista kielellisen viestinnän kenttää nykyistä paremmin, täytyy tutkimusta kielenkehityksen alkujuurilla jatkaa. Aikuisten kielenkäsittelyyn osallistuvat aivoalueet ja niiden toiminta tunnetaan jokseenkin hyvin, mutta erityisesti varhaislapsuuden kielenkäsittelyn aikaisessa aivotoiminnassa ja sen kehityksessä tutkijoilla on paljon selvitettävää. Kielelliseen toimintaan liittyvän aivotoiminnan lapsuudenaikaisen kehityksen ymmärtäminen voi auttaa kielenkehityksen häiriöiden ehkäisyssä ja olla avainasemassa niiden kuntoutuksessa.

LÄHTEET

1. semantics | Definition of semantics in English by Oxford Dictionaries. Available at: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/semantics>. (Accessed: 30th December 2018)
2. syntax | Definition of syntax in English by Oxford Dictionaries. Available at: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/syntax>. (Accessed: 30th December 2018)
3. Skeide, M. A., Brauer, J. & Friederici, A. D. Syntax gradually segregates from semantics in the developing brain. *Neuroimage* **100**, 106–11 (2014).
4. Knoll, L. J., Obleser, J., Schipke, C. S., Friederici, A. D. & Brauer, J. Left prefrontal cortex activation during sentence comprehension covaries with grammatical knowledge in children. *Neuroimage* **62**, 207–16 (2012).
5. Pagel, M. Q&A: What is human language, when did it evolve and why should we care? *BMC Biol.* **15**, 64 (2017).
6. speech | Definition of speech in English by Oxford Dictionaries. Available at: <https://en.oxforddictionaries.com/definition/speech>. (Accessed: 30th December 2018)
7. *6 0 0 2 Education for All Global Monitoring Report Understandings of literacy.* (2006).
8. Yeatman, J. D. *et al.* Anatomical properties of the arcuate fasciculus predict phonological and reading skills in children. *J. Cogn. Neurosci.* **23**, 3304–17 (2011).
9. Horowitz-Kraus, T., Schmitz, R., Hutton, J. S. & Schumacher, J. How to create a successful reader? Milestones in reading development from birth to adolescence. *Acta Paediatr.* **106**, 534–544 (2017).
10. Bookheimer, S. Functional MRI of Language: New Approaches to Understanding the Cortical Organization of Semantic Processing. *Annu. Rev. Neurosci.* **25**, 151–188 (2002).
11. Binder, J. R. Current Controversies on Wernicke's Area and its Role in Language. *Curr. Neurol. Neurosci. Rep.* **17**, 58 (2017).
12. Stevens, W. D., Kravitz, D. J., Peng, C. S., Tessler, M. H. & Martin, A. Privileged Functional Connectivity between the Visual Word Form Area and the Language System. *J. Neurosci.* **37**, 5288–5297 (2017).
13. Mazoyer, B. *et al.* Gaussian mixture modeling of hemispheric lateralization for

- language in a large sample of healthy individuals balanced for handedness. *PLoS One* **9**, e101165 (2014).
14. Weiss-Croft, L. J. & Baldeweg, T. Maturation of language networks in children: A systematic review of 22 years of functional MRI. *Neuroimage* **123**, 269–81 (2015).
 15. Espoon kaupungin puheterapeutit. *Lapsen puheen- ja kielenkehitys*. (2014).
 16. Mäki, P. & Wikström, K. *Terveystarkastukset lastenneurolassa ja kouluterveydenhuollossa Menetelmäkäsikirja*. (2017).
 17. Saab, A. S. & Nave, K.-A. Myelin dynamics: protecting and shaping neuronal functions. *Curr. Opin. Neurobiol.* **47**, 104–112 (2017).
 18. Su, P., Kuan, C.-C., Kaga, K., Sano, M. & Mima, K. Myelination progression in language-correlated regions in brain of normal children determined by quantitative MRI assessment. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* **72**, 1751–63 (2008).
 19. Walton, M., Dewey, D. & Lebel, C. Brain white matter structure and language ability in preschool-aged children. *Brain Lang.* **176**, 19–25 (2018).
 20. Travis, K. E., Adams, J. N., Kovachy, V. N., Ben-Shachar, M. & Feldman, H. M. White matter properties differ in 6-year old Readers and Pre-readers. *Brain Struct. Funct.* **222**, 1685–1703 (2017).
 21. O’Muircheartaigh, J. *et al.* White matter development and early cognition in babies and toddlers. *Hum. Brain Mapp.* (2014). doi:10.1002/hbm.22488
 22. Arshad, M., Stanley, J. A. & Raz, N. Adult age differences in subcortical myelin content are consistent with protracted myelination and unrelated to diffusion tensor imaging indices. *Neuroimage* **143**, 26–39 (2016).
 23. Bercury, K. K. & Macklin, W. B. Dynamics and Mechanisms of CNS Myelination. *Dev. Cell* **32**, 447–458 (2015).
 24. Deoni, S. C. L., Dean, D. C., Remer, J., Dirks, H. & O’Muircheartaigh, J. Cortical maturation and myelination in healthy toddlers and young children. *Neuroimage* **115**, 147–161 (2015).
 25. Girard, N., Koob, M. & Brunel, H. Normal development. in *Handbook of clinical neurology* **136**, 1091–1119 (2016).
 26. Brauer, J., Anwander, A. & Friederici, A. D. Neuroanatomical prerequisites for language functions in the maturing brain. *Cereb. Cortex* **21**, 459–66 (2011).
 27. Brauer, J., Anwander, A., Perani, D. & Friederici, A. D. Dorsal and ventral pathways in language development. *Brain Lang.* **127**, 289–295 (2013).

28. Xiao, Y. *et al.* Development of the Intrinsic Language Network in Preschool Children from Ages 3 to 5 Years. *PLoS One* **11**, e0165802 (2016).
29. Urger, S. E. *et al.* The Superior Longitudinal Fasciculus in Typically Developing Children and Adolescents. *J. Child Neurol.* **30**, 9–20 (2015).
30. Schmithorst, V. J., Holland, S. K. & Plante, E. Object identification and lexical/semantic access in children: a functional magnetic resonance imaging study of word-picture matching. *Hum. Brain Mapp.* **28**, 1060–74 (2007).
31. Balsamo, L. M., Xu, B. & Gaillard, W. D. Language lateralization and the role of the fusiform gyrus in semantic processing in young children. *Neuroimage* **31**, 1306–1314 (2006).
32. Wu, C.-Y., Vissienon, K., Friederici, A. D. & Brauer, J. Preschoolers' brains rely on semantic cues prior to the mastery of syntax during sentence comprehension. *Neuroimage* **126**, 256–266 (2016).
33. Moore-Parks, E. N. *et al.* An fMRI study of sentence-embedded lexical-semantic decision in children and adults. *Brain Lang.* **114**, 90–100 (2010).
34. Xiao, Y., Friederici, A. D., Margulies, D. S. & Brauer, J. Development of a selective left-hemispheric fronto-temporal network for processing syntactic complexity in language comprehension. *Neuropsychologia* **83**, 274–282 (2016).
35. Nuñez, S. C. *et al.* fMRI of syntactic processing in typically developing children: Structural correlates in the inferior frontal gyrus. *Dev. Cogn. Neurosci.* **1**, 313–323 (2011).
36. Friederici, A. D. The Brain Basis of Language Processing: From Structure to Function. *Physiol. Rev.* **91**, 1357–1392 (2011).
37. Redcay, E., Haist, F. & Courchesne, E. Functional neuroimaging of speech perception during a pivotal period in language acquisition. *Dev. Sci.* **11**, 237–252 (2008).
38. Berl, M. M. *et al.* Functional anatomy of listening and reading comprehension during development. *Brain Lang.* **114**, 115–125 (2010).
39. Sroka, M. C. *et al.* Relationship between receptive vocabulary and the neural substrates for story processing in preschoolers. *Brain Imaging Behav.* **9**, 43–55 (2015).
40. Lidzba, K., Schwilling, E., Grodd, W., Krägeloh-Mann, I. & Wilke, M. Language comprehension vs. language production: Age effects on fMRI activation. *Brain Lang.* **119**, 6–15 (2011).

41. Hutton, J. S. *et al.* Story time turbocharger? Child engagement during shared reading and cerebellar activation and connectivity in preschool-age children listening to stories. *PLoS One* **12**, (2017).
42. Hutton, J. S. *et al.* Shared Reading Quality and Brain Activation during Story Listening in Preschool-Age Children. *J. Pediatr.* **191**, 204–211.e1 (2017).
43. Vissienon, K., Friederici, A. D., Brauer, J. & Wu, C.-Y. Functional organization of the language network in three- and six-year-old children. *Neuropsychologia* **98**, 24–33 (2017).
44. Xiao, Y., Friederici, A. D., Margulies, D. S. & Brauer, J. Longitudinal changes in resting-state fMRI from age 5 to age 6 years covary with language development. *Neuroimage* **128**, 116–124 (2016).
45. Karunanayaka, P. R. *et al.* Age-related connectivity changes in fMRI data from children listening to stories. *Neuroimage* **34**, 349–360 (2007).
46. Karunanayaka, P. *et al.* A group independent component analysis of covert verb generation in children: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage* **51**, 472–487 (2010).
47. Szaflarski, J. P. *et al.* A longitudinal functional magnetic resonance imaging study of language development in children 5 to 11 years old. *Ann. Neurol.* (2006). doi:10.1002/ana.20817
48. Hashizume, H. *et al.* Developmental changes in brain activation involved in the production of novel speech sounds in children. *Hum. Brain Mapp.* **35**, 4079–4089 (2014).
49. Duff, F. J., Reen, G., Plunkett, K. & Nation, K. Do infant vocabulary skills predict school-age language and literacy outcomes? *J. Child Psychol. Psychiatry* **56**, 848–856 (2015).
50. Brem, S. *et al.* Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107**, 7939–44 (2010).
51. Horowitz-Kraus, T., Hutton, J. S., Phelan, K. & Holland, S. K. Maternal reading fluency is positively associated with greater functional connectivity between the child's future reading network and regions related to executive functions and language processing in preschool-age children. *Brain Cogn.* **121**, 17–23 (2018).
52. Monzalvo, K. & Dehaene-Lambertz, G. How reading acquisition changes children's spoken language network. *Brain Lang.* **127**, 356–365 (2013).

53. Centanni, T. M., King, L. W., Eddy, M. D., Whitfield-Gabrieli, S. & Gabrieli, J. D. E. Development of sensitivity versus specificity for print in the visual word form area. *Brain Lang.* **170**, 62–70 (2017).
54. Dekker, T. M., Mareschal, D., Johnson, M. H. & Sereno, M. I. Picturing words? Sensorimotor cortex activation for printed words in child and adult readers. *Brain Lang.* **139**, 58–67 (2014).
55. O’Muircheartaigh, J. *et al.* Interactions between White Matter Asymmetry and Language during Neurodevelopment. *J. Neurosci.* **33**, 16170–16177 (2013).
56. Berl, M. M. *et al.* Regional differences in the developmental trajectory of lateralization of the language network. *Hum. Brain Mapp.* **35**, 270–84 (2014).
57. Szaflarski, J. P., Holland, S. K., Schmithorst, V. J. & Byars, A. W. fMRI study of language lateralization in children and adults. *Hum. Brain Mapp.* **27**, 202–212 (2006).
58. Szaflarski, J. P. *et al.* Left-handedness and language lateralization in children. *Brain Res.* **1433**, 85–97 (2012).
59. McNealy, K., Mazziotta, J. C. & Dapretto, M. Age and experience shape developmental changes in the neural basis of language-related learning. *Dev. Sci.* **14**, 1261–1282 (2011).
60. Yu, V. Y. *et al.* Age-related sex differences in language lateralization: A magnetoencephalography study in children. *Dev. Psychol.* **50**, 2276–2284 (2014).
61. Kadis, D. S. *et al.* Characterizing the Normal Developmental Trajectory of Expressive Language Lateralization Using Magnetoencephalography. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* **17**, 896–904 (2011).

Katsauksen aineistona käytetyt artikkelit otsikoittain järjestettynä.

Aivojen valkean aineen rakenteellinen kehitys ja kielenkehitys lapsuudessa

- Su, P., Kuan, C.-C., Kaga, K., Sano, M. & Mima, K. Myelination progression in language-correlated regions in brain of normal children determined by quantitative MRI assessment. *Int. J. Pediatr. Otorhinolaryngol.* **72**, 1751–63 (2008).
- Walton, M., Dewey, D. & Lebel, C. Brain white matter structure and language ability in preschool-aged children. *Brain Lang.* **176**, 19–25 (2018).
- Travis, K. E., Adams, J. N., Kovachy, V. N., Ben-Shachar, M. & Feldman, H. M. White matter properties differ in 6-year old Readers and Pre-readers. *Brain Struct. Funct.* **222**, 1685–1703 (2017).
- O’Muircheartaigh, J. *et al.* White matter development and early cognition in babies and toddlers. *Hum. Brain Mapp.* (2014). doi:10.1002/hbm.22488
- Deoni, S. C. L., Dean, D. C., Remer, J., Dirks, H. & O’Muircheartaigh, J. Cortical maturation and myelination in healthy toddlers and young children. *Neuroimage* **115**, 147–161 (2015).
- Brauer, J., Anwander, A. & Friederici, A. D. Neuroanatomical prerequisites for language functions in the maturing brain. *Cereb. Cortex* **21**, 459–66 (2011).
- Brauer, J., Anwander, A., Perani, D. & Friederici, A. D. Dorsal and ventral pathways in language development. *Brain Lang.* **127**, 289–295 (2013).
- Xiao, Y. *et al.* Development of the Intrinsic Language Network in Preschool Children from Ages 3 to 5 Years. *PLoS One* **11**, e0165802 (2016).
- Urger, S. E. *et al.* The Superior Longitudinal Fasciculus in Typically Developing Children and Adolescents. *J. Child Neurol.* **30**, 9–20 (2015).

Aivojen toiminnallinen kehitys lapsuudessa

Semanttinen tiedonkäsittely

- Schmithorst, V. J., Holland, S. K. & Plante, E. Object identification and lexical/semantic access in children: a functional magnetic resonance imaging study of word-picture matching. *Hum. Brain Mapp.* **28**, 1060–74 (2007).
- Balsamo, L. M., Xu, B. & Gaillard, W. D. Language lateralization and the role of the fusiform gyrus in semantic processing in young children. *Neuroimage* **31**, 1306–1314 (2006).
- Wu, C.-Y., Vissienon, K., Friederici, A. D. & Brauer, J. Preschoolers' brains rely on semantic cues prior to the mastery of syntax during sentence comprehension. *Neuroimage* **126**, 256–266 (2016).
- Moore-Parks, E. N. *et al.* An fMRI study of sentence-embedded lexical-semantic decision in children and adults. *Brain Lang.* **114**, 90–100 (2010).

Syntaksinen tiedonkäsittely

- Skeide, M. A., Brauer, J. & Friederici, A. D. Syntax gradually segregates from semantics in the developing brain. *Neuroimage* **100**, 106–11 (2014).
- Knoll, L. J., Obleser, J., Schipke, C. S., Friederici, A. D. & Brauer, J. Left prefrontal cortex activation during sentence comprehension covaries with grammatical knowledge in children. *Neuroimage* **62**, 207–16 (2012).
- Weiss-Croft, L. J. & Baldeweg, T. Maturation of language networks in children: A systematic review of 22years of functional MRI. *Neuroimage* **123**, 269–81 (2015).
- Xiao, Y., Friederici, A. D., Margulies, D. S. & Brauer, J. Development of a selective left-hemispheric fronto-temporal network for processing syntactic complexity in language comprehension. *Neuropsychologia* **83**, 274–282 (2016).
- Nuñez, S. C. *et al.* fMRI of syntactic processing in typically developing children: Structural correlates in the inferior frontal gyrus. *Dev. Cogn. Neurosci.* **1**, 313–323 (2011).

Puheen kuunteleminen ja ymmärtäminen

- Redcay, E., Haist, F. & Courchesne, E. Functional neuroimaging of speech perception during a pivotal period in language acquisition. *Dev. Sci.* **11**, 237–252 (2008).
- Berl, M. M. *et al.* Functional anatomy of listening and reading comprehension during development. *Brain Lang.* **114**, 115–125 (2010).
- Sroka, M. C. *et al.* Relationship between receptive vocabulary and the neural substrates for story processing in preschoolers. *Brain Imaging Behav.* **9**, 43–55 (2015).
- Weiss-Croft, L. J. & Baldeweg, T. Maturation of language networks in children: A systematic review of 22 years of functional MRI. *Neuroimage* **123**, 269–81 (2015).
- Lidzba, K., Schwilling, E., Grodd, W., Krägeloh-Mann, I. & Wilke, M. Language comprehension vs. language production: Age effects on fMRI activation. *Brain Lang.* **119**, 6–15 (2011).
- Hutton, J. S. *et al.* Story time turbocharger? Child engagement during shared reading and cerebellar activation and connectivity in preschool-age children listening to stories. *PLoS One* **12**, (2017).
- Hutton, J. S. *et al.* Shared Reading Quality and Brain Activation during Story Listening in Preschool-Age Children. *J. Pediatr.* **191**, 204–211.e1 (2017).
- Vissienon, K., Friederici, A. D., Brauer, J. & Wu, C.-Y. Functional organization of the language network in three- and six-year-old children. *Neuropsychologia* **98**, 24–33 (2017).
- Xiao, Y., Friederici, A. D., Margulies, D. S. & Brauer, J. Longitudinal changes in resting-state fMRI from age 5 to age 6 years covary with language development. *Neuroimage* **128**, 116–124 (2016).
- Karunanayaka, P. R. *et al.* Age-related connectivity changes in fMRI data from children listening to stories. *Neuroimage* **34**, 349–360 (2007).

Kielen tuottaminen

- Lidzba, K., Schwilling, E., Grodd, W., Krägeloh-Mann, I. & Wilke, M. Language comprehension vs. language production: Age effects on fMRI activation. *Brain Lang.* **119**, 6–15 (2011).

- Karunanayaka, P. *et al.* A group independent component analysis of covert verb generation in children: A functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage* **51**, 472–487 (2010).
- Szaflarski, J. P. *et al.* A longitudinal functional magnetic resonance imaging study of language development in children 5 to 11 years old. *Ann. Neurol.* (2006). doi:10.1002/ana.20817
- Hashizume, H. *et al.* Developmental changes in brain activation involved in the production of novel speech sounds in children. *Hum. Brain Mapp.* **35**, 4079–4089 (2014).
- Duff, F. J., Reen, G., Plunkett, K. & Nation, K. Do infant vocabulary skills predict school-age language and literacy outcomes? *J. Child Psychol. Psychiatry* **56**, 848–856 (2015).
- Weiss-Croft, L. J. & Baldeweg, T. Maturation of language networks in children: A systematic review of 22 years of functional MRI. *Neuroimage* **123**, 269–81 (2015).

Lukeminen

- Brem, S. *et al.* Brain sensitivity to print emerges when children learn letter-speech sound correspondences. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **107**, 7939–44 (2010).
- Duff, F. J., Reen, G., Plunkett, K. & Nation, K. Do infant vocabulary skills predict school-age language and literacy outcomes? *J. Child Psychol. Psychiatry* **56**, 848–856 (2015)
- Horowitz-Kraus, T., Hutton, J. S., Phelan, K. & Holland, S. K. Maternal reading fluency is positively associated with greater functional connectivity between the child's future reading network and regions related to executive functions and language processing in preschool-age children. *Brain Cogn.* **121**, 17–23 (2018).
- Monzalvo, K. & Dehaene-Lambertz, G. How reading acquisition changes children's spoken language network. *Brain Lang.* **127**, 356–365 (2013).
- Centanni, T. M., King, L. W., Eddy, M. D., Whitfield-Gabrieli, S. & Gabrieli, J. D. E. Development of sensitivity versus specificity for print in the visual word form area. *Brain Lang.* **170**, 62–70 (2017).

- Dekker, T. M., Mareschal, D., Johnson, M. H. & Sereno, M. I. Picturing words? Sensorimotor cortex activation for printed words in child and adult readers. *Brain Lang.* **139**, 58–67 (2014)

Aivotoiminnan lateralisaation kehitys lapsuudessa

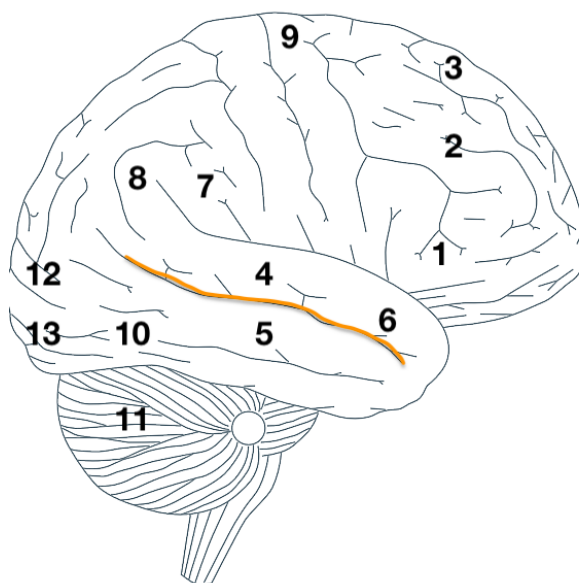
- O’Muircheartaigh, J. *et al.* Interactions between White Matter Asymmetry and Language during Neurodevelopment. *J. Neurosci.* **33**, 16170–16177 (2013).
- Yeatman, J. D. *et al.* Anatomical properties of the arcuate fasciculus predict phonological and reading skills in children. *J. Cogn. Neurosci.* **23**, 3304–17 (2011).
- Berl, M. M. *et al.* Regional differences in the developmental trajectory of lateralization of the language network. *Hum. Brain Mapp.* **35**, 270–84 (2014).
- Balsamo, L. M., Xu, B. & Gaillard, W. D. Language lateralization and the role of the fusiform gyrus in semantic processing in young children. *Neuroimage* **31**, 1306–1314 (2006).
- Berl, M. M. *et al.* Functional anatomy of listening and reading comprehension during development. *Brain Lang.* **114**, 115–125 (2010).
- Szaflarski, J. P., Holland, S. K., Schmithorst, V. J. & Byars, A. W. fMRI study of language lateralization in children and adults. *Hum. Brain Mapp.* **27**, 202–212 (2006).
- Xiao, Y. *et al.* Development of the Intrinsic Language Network in Preschool Children from Ages 3 to 5 Years. *PLoS One* **11**, e0165802 (2016).
- Lidzba, K., Schwilling, E., Grodd, W., Krägeloh-Mann, I. & Wilke, M. Language comprehension vs. language production: Age effects on fMRI activation. *Brain Lang.* **119**, 6–15 (2011)
- Szaflarski, J. P. *et al.* Left-handedness and language lateralization in children. *Brain Res.* **1433**, 85–97 (2012).
- McNealy, K., Mazziotta, J. C. & Dapretto, M. Age and experience shape developmental changes in the neural basis of language-related learning. *Dev. Sci.* **14**, 1261–1282 (2011).
- Weiss-Croft, L. J. & Baldeweg, T. Maturation of language networks in children: A systematic review of 22years of functional MRI. *Neuroimage* **123**, 269–81 (2015).

- Yu, V. Y. *et al.* Age-related sex differences in language lateralization: A magnetoencephalography study in children. *Dev. Psychol.* **50**, 2276–2284 (2014).
- Kadis, D. S. *et al.* Characterizing the Normal Developmental Trajectory of Expressive Language Lateralization Using Magnetoencephalography. *J. Int. Neuropsychol. Soc.* **17**, 896–904 (2011).
- Szaflarski, J. P. *et al.* A longitudinal functional magnetic resonance imaging study of language development in children 5 to 11 years old. *Ann. Neurol.* (2006). doi:10.1002/ana.20817

Yhteenveto lapsilla kielellisen tiedonkäsittelyn aikana aktivoituvista aivoalueista.

Taulukko 1. Eri kielitoimintojen yhteydessä lapsilla pääasiallisesti aktivoituvat aivoalueet.

Kielitoiminto	Aivoalue												
	IFG	MFG	SFG	STG	MTG	STS	supra- marginal gyrus	angular gyrus	SMA	fusiform gyrus	pikku- aivot	cuneus	lingual gyrus
semantiikka	x	x		x	x			x	x	x	x	x	x
syntaksi	x			x	(x)	x							
puheen kuunteleminen/ ymmärtäminen	x	x		x	x	x	x	x			x		
kielen tuottaminen	x	x		x	x		x	x			x		x
lukeminen	x		x	x		x				x		x	x



Kuva 6. Taulukossa 1 kuvatut aivoalueet: 1. IFG 2. MFG 3. SFG 4. STG 5. MTG 6. STS (oranssi uurre) 7. supramarginal gyrus 8. angular gyrus 9. SMA 10. fusiform gyrus (ohimo-/takaraivolohkon alapinnalla) 11. pikkuaivot 12. cuneus 13. lingual gyrus.