



**TURUN
YLIOPISTO**

**Aivojen valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja
ventraalisen radastokokonaisuuksien eheyden yhteys kielellisiin
taitoihin varhaislapsuudessa**

Heini Laukkanen

Vilma Viitaharju

Pro gradu -tutkielma

Ohjaajat: Elina Mainela-Arnold, Kiia Kurila

Turun yliopisto

Yhteiskuntatieteellinen tiedekunta, psykologian ja logopedian laitos, logopedia

13.3.2025

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

TURUN YLIOPISTO

Psykologian ja logopedian laitos / Yhteiskuntatieteellinen tiedekunta

LAUKKANEN, HEINI & VIITAHARJU, VILMA: Aivojen valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheyden yhteys kielellisiin taitoihin varhaislapsuudessa

Tutkielma, 62 s, 1 liite s.

Logopedia

Maaliskuu 2025

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena oli selvittää, ennustavatko vastasyntyneen aivojen valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheys sanavaraston kokoa ja kolmen ilmaisun keskipituutta 30 kuukauden iässä. Tutkielman aineisto (n = 98) on peräisin FinnBrain-kohorttitutkimuksesta ja tässä tutkimuksessa hyödynnettiin dataa kahdesta ikäpisteestä. Tutkittavat osallistuivat aivojen magneettikuvantamistutkimukseen 11–54 päivän ikäisinä, ja kielellisiä taitoja arvioitiin vanhempien täyttämän MCDI-kyselylomakkeen avulla 30 kuukauden iässä. Hypoteesina oli, että radastokokonaisuuksien eheämpi hienorakenne ennustaa suurempaa sanaston kokoa ja pidempää ilmaisupituutta 30 kuukauden iässä. Tutkittavat radastot olivat dorsaalisesta kokonaisuudesta *superior longitudinal fasciculus* (SLF) ja ventraalisesta kokonaisuudesta *inferior fronto-occipital fasciculus* (IFOF), *inferior longitudinal fasciculus* (ILF) ja *uncinate fasciculus* (UF). Tutkimuksessa kontrolloitiin lapsen ikä kuvaushetkellä, sukupuoli, äidin raskaudenaikainen masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilu sekä äidin koulutustaso.

Aikaisempi kuvantamistutkimus on osoittanut yhteyden radastojen eheyden ja kielellisten taitojen välillä lapsuudessa. Dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden eheyden yhteyttä kielellisiin taitoihin on kuitenkin tutkittu niukasti, ja erityisesti pitkittäistutkimuksia on saatavilla vain vähän. Käsitys kielellisen kehityksen aivoperustasta on viimeisempien tutkimusten myötä laajentumassa ja kielellisen käsittelyn on havaittu levittyvän laajoiksi verkostoiksi aivoissa. Dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden katsotaan olevan merkityksellisiä kielellisissä verkostoissa ja kielellisessä prosessoinnissa, ja erityisesti ensimmäisten elinvuosien aikana sekä kielenkehitys että aivojen hermoverkoston kehitys on voimakasta. Tähän kehitykseen vaikuttavat tekijät ovat vielä osittain tuntemattomia, etenkin neurobiologisesta näkökulmasta, mikä tekee aiheen tutkimisesta erityisen tärkeää.

Tämän tutkimuksen päälöydöksenä havaittiin, että SLF-radaston heikompi eheys ennusti pidempää ilmaisupituutta 30 kuukauden iässä. Aivoradastojen ei havaittu olevan yhteydessä sanavaraston kokoon, eikä ventraaliset radastot selittäneet kielellisiä taitoja. Tuloksia saattaa selittää aivojen voimakas kehitys ensimmäisten elinvuosien aikana, eivätkä erot radastojen eheydessä vastasyntyneenä välttämättä selitä kielellistä taitotasoa myöhemmin. Lisäksi nämä tulokset on saatu yhden kuvantamistutkimuksen perusteella, joten jatkossa on tärkeää tarkastella kielen neurobiologiaa useassa eri ikäpisteessä.

Asiasanat: kielenkehitys, sanavarasto, ilmaisupituus, dorsaalinen radasto, ventraalinen radasto, valkean aineen eheys, magneettikuvantaminen, DTI, MCDI, varhaislapsuus

1 JOHDANTO	1
1.1 Kielellisten taitojen kehitys ja arviointi kahden ensimmäisen ikävuoden aikana	2
1.1.1 Varhaisen kielenkehityksen tyypillinen eteneminen	3
1.1.2 Varhaiseen kielenkehitykseen vaikuttavat tekijät	6
1.2 Aivojen valkean aineen kielellisesti merkitykselliset radastokokonaisuudet.....	7
1.2.1 Dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden rakenne ja merkitys.....	8
1.2.2 Valkean aineen kehitys varhaislapsuudessa.....	11
1.2.3 Diffuusiotensorikuvantaminen valkean aineen eheyden tutkimisessa	13
1.2.4 Valkean aineen radastojen kehitykseen vaikuttavat tekijät	15
1.3 Valkean aineen kehittymisen yhteys kognitiivisiin ja kielellisiin taitoihin.....	16
2 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEEESIT	24
3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTON ANALYYSI	25
3.1 Tutkittavat	25
3.2 Tutkimuksen eettisyys	27
3.3 Mittarit.....	27
3.3.1 Varhaisten kielellisten taitojen arviointi MCDI-menetelmällä	27
3.3.2 Magneettikuvantamistutkimuksen aineiston kerääminen ja analysointi	28
4 TULOKSET	34
4.1 Valkean aineen radastojen eheyden yhteys sanavarastoon	34
4.2 Valkean aineen radastojen eheyden yhteys ilmaisupituuteen	35
5 POHDINTA	37
5.1 Tulosten kuvaus ja arviointi	37
5.2 Hypoteesien toteutuminen	39
5.3 Tulkintoja tulosten taustasyistä	40
5.4 Tutkimuksen vahvuudet ja rajoitukset.....	42
5.5 Johtopäätökset ja jatkotutkimus	49
LÄHTEET.....	52
LIITTEET	63

1 JOHDANTO

Aivoverkostot muovautuvat varhaislapsuudessa voimakkaasti ja yhdessä ympäristön sekä geeniperimän kanssa ne vaikuttavat lapsen kykyyn oppia kielellisiä rakenteita sekä merkityksiä (Sanchez-Alonso & Aslin, 2022). Vaikka kielellistä prosessointia on tutkittu vuosisatojen ajan, on sen hermostolliseen järjestäytymiseen liittyviä anatomisia rakenteita silti ollut vaikea määrittellä tarkasti (Hickok & Poeppel, 2007). Aivojen rakenteen ja toiminnan välisiä suhteita on edelleen vaikea hahmottaa täsmällisesti (Dubois ym., 2014), vaikka kuvantamistekniikoiden kehittyminen on auttanut havaitsemaan vauvojen aivoissa tapahtuvaa kielellistä prosessointia. On esimerkiksi havaittu rinnakkaisia ja hierarkkisia kielellisiä prosessointireittejä jo ennen voimakasta puheelle altistumista sekä otsalohkon osallistuminen kognitiivisiin toimintoihin aivan alusta alkaen (Dehaene-Lambertz, 2017). Vaikka kuvantamistutkimusten myötä tieto kielenkäsittelyn hermostollisesta perustasta on laajentumassa, on varhaisvaiheen aivokuvantamistutkimusta tehty vähän, ja näin ollen monet kielenkehitystä selittävät tekijät ovat mahdollisesti vielä selvittämättä. Erityisesti aivojen valkean aineen radastojen eheyden ja kielellisten taitojen välinen yhteys on vielä epäselvä ja tutkimustieto ensimmäisten elinvuosien ajalta niukkaa. Jotta voidaan kokonaisvaltaisesti ymmärtää kielenkehityksen kulkua, on oleellista ymmärtää siihen liittyvät neurobiologiset ilmiöt. Tässä pro gradu -tutkielmassa pyritään selvittämään aivojen kielellisesti merkityksellisten radastokokonaisuuksien eheyden yhteyttä lapsen kielellisiin taitoihin ensimmäisten elinvuosien aikana.

Kielelliset taidot kehittyvät varhaislapsuudessa aivojen monimutkaisten hermoyhteyksien avulla, ja niiden tutkiminen on avainasemassa ymmärtääksemme, miten lapset oppivat kommunikoimaan. Hermoyhteyksiä tutkimalla voidaan hahmottaa kielenkehityksen taustalla vaikuttavia aivojen rakenteellisia ja toiminnallisia muutoksia, jotka voivat johtaa kypsään kielelliseen verkostoon (Dubois ym., 2014). Ensimmäiset elinvuodet ovat aivojen kehityksen kannalta kriittinen vaihe, jolloin synnynnäisillä tai ympäristötekijöiden aiheuttamilla kehitysprosessien häiriöillä voi olla pitkäaikaisia tai pysyviä vaikutuksia aivojen rakenteeseen ja toimintaan (Knickmeyer ym., 2008). Kielellisissä taidoissa esiintyy yksilöllistä vaihtelua läpi elämän, ja erot esimerkiksi sanaston kehityksessä ovat yleisiä (Kidd ym., 2018). Kielellisiä eroavaisuuksia havaitaan jo varhain ja kaikilla kielen osa-alueilla. Varhaiset erot voivat liittyä myös myöhempään vaihteluun äidinkielen osaamisessa. Vaikka ensimmäiset ikävuodet voivat olla kehityksen kannalta haavoittuvainen ajanjakso, voi se myös olla vaihe, jolloin terapeuttisilla toimenpiteillä on suurin myönteinen vaikutus (Knickmeyer ym., 2008).

Silti tutkimusnäyttö ensimmäisten ikävuosien osalta valkean aineen radastojen eheyden yhteydestä kielitaitoon on edelleen vähäistä. On lisäksi huomattava, että kielelliset vaikeudet ovat yleisiä ja niillä on merkittäviä kauaskantoisia vaikutuksia yksilön elämään (Short ym., 2019). Tämänhetkisen tutkimustiedon valossa useampi samanaikainen riskitekijä lisää kielellisten vaikeuksien todennäköisyyttä yksittäistä tekijää enemmän, ja lapsen altistuessa usealle riskitekijälle niiden yhteisvaikutus voi vaikuttaa kielenkehitykseen pitkäaikaisesti (Christensen ym., 2017). Sen vuoksi onkin tärkeää tunnistaa ja ymmärtää kielenkehitykseen vaikuttavia tekijöitä. Puutteellinen kielellinen toimintakyky vaikeuttaa muun muassa puhutun ja kirjoitetun kielen ymmärtämistä, sosiaalista vuorovaikutusta, tunteiden käsittelyä, oppimista ja jo opitun osoittamista (Kielellinen erityisvaikeus: Käypä hoito -suositus 2010). Kielellisillä vaikeuksilla on laajoja vaikutuksia ja näin ollen mahdollisten riskitekijöiden varhainen tunnistaminen ja havaitseminen ovat ensiarvoisen tärkeitä toimia.

Lisäksi on havaittu, että kielellisiin taitoihin yhdistetyt geenit voivat vaikuttaa aivokuoren rakenteeseen (Gialluisi ym., 2017), mikä vahvistaa näkemystä aivojen rakenteellisten ominaisuuksien ja kielellisten taitojen välisestä yhteydestä. Aivokuvantaminen varhaislapsuudessa voikin auttaa ymmärtämään neurobiologiaan liittyviä riskitekijöitä ja kehityskulkuja, mikä mahdollistaa kielellisten kehitysviiveiden tai häiriöiden tunnistamisen ajoissa (Sanchez-Alonso & Aslin, 2022). Tämä mahdollistaa myös kliinisten interventioiden aloittamisen mahdollisimman varhain, jolloin niistä hyödytään eniten.

1.1 Kielellisten taitojen kehitys ja arviointi kahden ensimmäisen ikävuoden aikana

Varhaiset kielelliset taidot, etenkin ymmärtävän ja tuottavan sanaston kehitys rakentavat pohjan myöhemmille kielitaidoille (Vehkavuori & Stolt, 2019) ja siten kommunikointikyvyille (Chiat & Roy, 2008) sekä sosiaaliselle ja emotionaalille kehitykselle (St Clair ym., 2011). Kielenkehityksen voidaan siis ajatella olevan jatkumo jo varhaisista kehitysvaiheista lähtien. Kielelliset taidot kehittyvät ensimmäisten elinvuosien aikana nopeasti ja muodostuvat useista osa-alueista, joista keskeisiä ovat sanasto, äännejärjestelmä eli fonologia, taivutusmuotojärjestelmä eli morfologia sekä lauserakenteiden hallinta eli syntaksi (Stolt & Vehkavuori, 2022b). Kielitaidon kehitystä arvioitaessa voidaan erotella ymmärtävä eli reseptiivinen sekä tuottava eli ekspressiivinen kielitaito, sillä ne kehittyvät varhaisvaiheessa eriaikaisesti ja niitä arvioidaan eri tavoin (Stolt ym., 2008). Kielitaidon eri osa-alueet nivoutuvat kielen kehittyessä yhteen laajaksi kokonaisuudeksi, joka mahdollistaa ajatusten ilmaisun ja kerronnallisten taitojen kehittymisen (Stolt & Vehkavuori, 2022b). Varhaista

kielitaitoa arvioimalla voidaan seurata kehitystä, tarjota tärkeää tietoa lapsen kielenkehityksestä suhteessa ikätovereihin sekä tunnistaa paremmin kielellisen kehityksen riskit (Stolt & Vehkavuori, 2022a). Arviointi varhaisessa vaiheessa voi myös tarkentaa kielen kehityksen taustalla vaikuttavia neurobiologisia ja ympäristöllisiä tekijöitä.

1.1.1 Varhaisen kielenkehityksen tyypillinen eteneminen

Lapsen kielenkehitys alkaa tyypillisesti jo ennen syntymää, kun lapsi kuulee ääniä, alkaa erotella ääniteitä ympäristön äänistä sekä harjoitella spontaanisti suun motorisia liikkeitä (Choi ym., 2023). Syntymän jälkeen vauvoilla on hyvin varhain luontainen taipumus suuntautua sosiaaliseen vuorovaikutukseen hoivaajan kanssa, ja tämä vuorovaikutus luo edellytykset kielen kehittymiselle (Laakso ym., 2014; Paavola-Ruotsalainen & Rantalainen, 2020). Kuulonvaraisen erottelukyvyn kehittyessä noin puolen vuoden iässä lapsi tyypillisesti alkaa muodostamaan yksinkertaisia tavusarjoja, eli oppii jokeltelemään (Choi ym., 2023). Jokeltelu alkaa yksinkertaisten tavusarjojen toistelusta, joka vähitellen muuttuu monimutkaisemmaksi jokelteluksi. Jokeltelu on tärkeä vaihe puheen tuottamisen kannalta motoristen prosessien sekä puuehävaitsemiskyvyn kehittyessä. Samanaikaisesti alkaa ymmärtävän sanaston kehittyminen, kun lapsi oppii yhdistämään kuulemansa tarkoittamaan tiettyä kohdetta (Fenson ym., 1994; Stolt & Salmi, 2020). Ymmärtävä sanasto kehittyikin nopeasti (Stolt & Salmi, 2020), ja suomenkieliset lapset tyypillisesti ymmärtävät yhden vuoden iässä arviolta 70–90 sanaa (Lyytinen, 1999; Stolt ym., 2008). Tuottavan sanaston kehitys on puolestaan hitaampaa ja nopeutuu tyypillisesti toisen ikävuoden lopulla. Tätä kuvaa se, että toisen ikävuoden aikana ymmärtävä sanasto on jo hyvinkin laaja, mutta tuottavaan sanastoon on tyypillisesti omaksuttu keskimäärin vasta noin 70 sanaa (Lyytinen 1999; Stolt ym., 2008). Tuottavan sanaston kasvuvauhti usein kiihtyy kuitenkin toisen ikävuoden lopulla, kun noin 300 sanaa käsittävä äidinkielen perussanasto on omaksuttu (Stolt ym., 2008). Samanaikaisesti kehittyy myös sanaston koostumus, eli se, millaisia sanoja lapsi oppii ja omaksuu (Stolt ym., 2008; Stolt & Vehkavuori, 2022b). Sanaston koko ja koostumus yhdessä antavat tärkeää tietoa lapsen ymmärretyn sekä ilmaistun sanaston kehitysvaiheesta (Stolt & Salmi, 2020). Noin kahden vuoden iässä ilmaantuvat myös ensimmäiset sanayhdistelmät sekä taivutusmuodot (Lyytinen, 1999). Sanaston laajuus myös tukee monipuolisempaa eri sanaluokkiin kuuluvien sanojen käyttöä, mikä mahdollistaa myös monipuolisten lauserakenteiden omaksumisen ja muodostamisen (Stolt & Vehkavuori, 2022b). Vastaavasti sanayhdistelmien syntyyn on yhdistetty sanavaraston kasvu ja lapset, joilla on suurempi sanavarasto, osoittavat edistyneempiä kieliopillisia taitoja (Stolt ym., 2008).

Sanaston kehitys alkaa ensimmäisen ikävuoden lopulla, ja sen varhainen arviointi on keskeistä lapsen myöhemmän kielen kehityksen kannalta, sillä se rakentaa pohjaa myöhempien kielellisten taitojen kehitykselle (Stolt & Salmi, 2020). Kahden vuoden ikä on arviointikohdaksi mielekäs, sillä sanaston kehityksessä esiintyy siihen mennessä huomattavaa vaihtelua. Esimerkiksi suomea omaksuvilla kaksivuotiailla ilmaistun sanaston koko voi vaihdella muutamasta sanasta jopa 600 sanaan (Stolt & Salmi, 2020). Sanaston koko ei kuitenkaan ole vain yksittäinen kielenkehityksen indikaattori, vaan sillä on oleellisia yhteyksiä muihin kielen osa-alueisiin, kuten äännejärjestelmän hallintaan, lauserakenteiden muodostamiseen sekä ilmaisullisten tarpeiden tukemiseen (Stolt & Salmi, 2020). Esimerkiksi suuri ja monipuolinen sanavarasto antaa lapselle paremmat mahdollisuudet rakentaa erilaisia lauserakenteita ja tukea omia ilmaisullisia tarpeitaan, ja siten kehittyä myös muilla kielen osa-alueilla. Arvioimalla sanastoa voidaan tunnistaa myöhään puhumaan oppivat lapset (*late talkers*), sillä alle 50 sanan ilmaistu sanasto kaksivuotiaana tai kolmannen ikävuoden alussa on usein yhdistetty myöhään puhumaan oppimiseen (Stolt & Salmi, 2020). Lisäksi toisen ikävuoden lopulla arvioitu sanaston kehitys on yhdistetty leikki-ikäisen lapsen kielen kokonaiskehitykseen ja kielellisen kehityksen kaikkiin osa-alueisiin (Vehkavuori & Stolt, 2019). Varhaisen sanaston kehitys vaikuttaisi siis muodostavan kielellisen perustan, jolle lapsen muu kielitaito rakentuu (Stolt, 2018).

Lapsen siirtyessä yksittäisten sanojen käytöstä sanayhdistelmien ja lauseiden muodostamiseen, ilmauksen pituuden kasvu heijastaa kykyä hallita kieliopillisesti monimutkaisempia rakenteita (Stolt & Vehkavuori, 2022b). Lapsen syntaktisen sekä morfologisen kehityksen tasosta saadaan tietoa esimerkiksi tarkastelemalla ilmaisun keskipituutta (*mean length of utterance*, MLU), joka on tärkeä osa varhaisen kielitaidon arviointia (Lyytinen, 1999). Ilmaisun keskipituuden arvioiminen perustuu esimerkiksi siihen, että vanhemmat raportoivat lapsensa pisimpiä ilmaisemia lauseita, joista lasketaan morfeemien määrä. Morfeemilla tarkoitetaan pienintä kielellistä yksikköä, jolla on merkitys. Ilmaisun keskipituus antaa arvokasta tietoa lapsen kyvystä käyttää taivutusmuotoja ja lauseenjäsenyyksiä, sekä muita kieliopillisia elementtejä. Vanhempien raportoima MLU on osoittautunut luotettavaksi, sillä se muun muassa korreloi vahvasti lapsen spontaanista puheesta tehtyjen analyysien kanssa (Lyytinen, 1999).

Varhaisen kielitaidon osa-alueita, kuten kommunikaatiota, sanaston kehitystä, taivutusmuotojen hallintaa ja ilmaisupituutta voidaan arvioida vanhempien täyttämällä MCDI-kyselymenetelmällä (*The MacArthur Communicative Development Inventories*, MCDI, Fenson ym., 1994; suom. Varhaisen kommunikaation ja kielen kehityksen arviointimenetelmä, Lyytinen, 1999). Pienten lasten kielellisten taitojen arviointi erilaisissa kliinisissä testausilanteissa voi olla esimerkiksi lapsen

jännittämisen vuoksi hankalaa, ja sen vuoksi vanhemmilta saatu tieto on arvokasta (Thal ym., 2007). Vanhempien arvioon perustuvat varhaisen kielenkehityksen arviointimenetelmät ovatkin nopeita ja helppoja käyttää, ne ovat toistettavissa ja soveltuvat myös seurantaan. Monet tutkimukset ovat myös osoittaneet, että vanhemman antama tieto lapsen senhetkisestä kehityksestä vertautuu muihin käytävissä oleviin menetelmiin (esim. Fenson ym., 1994; Lyytinen, 1999; Stolt ym., 2008). MCDI:n kaltaisen vanhempien arvioon perustuvan arviointimenetelmän vahvuutena on vanhempien mahdollisuus havainnoida lastaan pitkällä aikavälillä ja tutussa toimintaympäristössä (Stolt & Vehkavuori, 2022b).

Suurimmalla osalla lapsista kielenkehitys etenee odotetusti, mutta mahdollisesti jopa viidesosalla lapsista esiintyy jonkinasteisia puheen ja kielen vaikeuksia (Eun ym., 2014; Kunnari ym., 2022). Viive havaitaan usein lapsen ollessa 18–30 kuukauden ikäinen, ja sen ensimmäisiä merkkejä ovat sanavaraston hidaskasvu ja viivästynyt sanayhdistelmien ilmaantuminen (Moyle ym., 2011). Vaikka kielenkehitys saattaisikin aluksi viivästyä, on arvioitu, että suurin osa lapsista kuitenkin saavuttaa ikätoverinsa 4–5 vuoden iässä (Dale ym., 2003). Varhainen kielenkehitys onkin dynaaminen jatkumo, johon vaikuttavat monet biologiset sekä ympäristöön liittyvät tekijät. Tämä varhaisvaiheen kehitys on merkittävä myöhempien kielellisten taitojen kannalta, ja varhaisvuosina ilmenevät kielelliset haasteet voivat enteillä myöhempiä ongelmia: esimerkiksi 5–6 vuoden iässä kielellisiä haasteita kokevat lapset suoriutuivat nuoruusiässä verrokkeja heikommin lähes kaikilla puhutun ja kirjoitetun kielen osa-alueilla (Stothard ym., 1998). Kielellisten vaikeuksien kauaskantoisuus ilmenee usein erityisesti lukemiseen ja kirjoittamiseen liittyvissä taidoissa ja näin ollen vaikuttavat esimerkiksi koulumenestykseen ja myöhempään oppimiseen (Stothard ym., 1998; Tomblin ym., 2003). Kielellisissä taidoissa onkin havaittu jatkuvuutta jo varhain: esimerkiksi 14 kuukauden iässä laajan sanaston on havaittu ennakoivan keskimääräistä suurempaa sanaston kokoa kahden vuoden iässä (Lyytinen, 1999). Osa myöhään, eli noin 2–3-vuotiaana puhumaan oppineista lapsista saattavatkin olla verrokkejaan alttiimpia kehityksellisille kielellisille vaikeuksille, vaikka osa heistä saavuttaakin ikätoverinsa ajan myötä (Rescorla, 2009). Lisäksi lapsilla, joilla on kehityksellinen kielihäiriö (*developmental language disorder, DLD*), on raportoitu olevan siihen liittyviä käyttäytymisen ja tunne-elämän vaikeuksia sekä sosiaalisia haasteita (St Clair ym., 2011). Kielelliset vaikeudet eivät siis välttämättä ole vain ohimeneviä haasteita, vaan ne voivat vaikuttaa moniin elämäntilanteisiin kauaskantoisesti.

1.1.2 Varhaiseen kielenkehitykseen vaikuttavat tekijät

Kielellisten taitojen omaksumiseen vaikuttavat merkittävästi sekä biologiset että ympäristölliset tekijät (Stolt & Salmi, 2020). Työillä on havaittu taipumus omaksua sekä ymmärtävää että tuottavaa sanastoa poikia aikaisemmin (Bornstein ym., 2004; Fenson ym., 1994). Suomalaisaineistossa sukupuolen vaikutuksen sanaston omaksumiseen todettiin olevan vähäinen verrattuna taitojen vaihteluun sukupuolen sisällä (Stolt ym., 2008), vaikka toisaalta miessukupuolen on todettu lukeutuvan puheen ja kielen haasteiden biologisiin riskitekijöihin (Harrison & McLeod, 2010). Lisäksi raskauden aikaiset poikkeamat ovat riskitekijöitä, ja esimerkiksi äidin raskaudenaikainen stressi on riski puheen ja kielen vaikeuksille (Reck ym., 2018).

Lapsen kielellisiin taitoihin on yhdistetty perheen sosioekonominen asema (*socioeconomic status*, SES) (esim. Kohen & Guèvremont, 2014). Muita epäsuorasti vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa verbaalinen älykkyys sekä vanhemmuuteen liittyvä tietämys (Bornstein ym., 1998). Korkeammin koulutettu vanhempi saattaa pitää lapsen kielenkehitystä tärkeänä ja siten tukea sitä aktiivisesti, mikä voi näkyä sanaston nopeampana kehityksenä (Stolt & Salmi, 2020). Myös suomalaisessa aineistossa havaittiin, että sosioekonominen asema voi olla yksi kielellisen viiveen riskitekijä (Korpilahti ym., 2016). Aikuisen ja lapsen välisen vuorovaikutuksen ongelmat voivat vaikuttaa lapsen kielelliseen kehitykseen, ja erityisesti vanhempien masennus voi heikentää vuorovaikutusta ja vähentää kielellisten virikkeiden tarjoamista lapselle (Quevedo ym., 2012). FinnBrain-kohortissa, josta tämän tutkimuksen aineisto on peräisin, on huomioitu raskaudenaikaisen stressin aiheuttajiksi äidin kokema ahdistuneisuus, masentuneisuus sekä kuormittavat elämäntapahtumat (Karlsson ym., 2018). Raskaudenaikaisen ahdistuneisuuden on tunnistettu olevan merkittävä mielenterveydellinen haaste ja se on esiintyvyydeltään korkeinta loppuraskauden ja ensimmäisten synnytyksen jälkeisten kuukausien aikana (Dennis ym., 2017). Myös masennuksen ja ahdistuneisuuden samanaikainen esiintyminen on tunnistettu tutkimuksissa.

Tutkimuksissa on tunnistettu, että tietyt geenit, kuten ATP2C2, FOXP2 ja CMIP, voivat olla kielellisten vaikeuksien taustalla, mutta ne eivät kuitenkaan selitä kielellistä vaihtelua kaikilla (Newbury & Monaco, 2010). Toisaalta osalla niistä, joilla on diagnosoitu kehityksellinen kielihäiriö, on myös löydetty jokin geneettinen poikkeama (Plug ym., 2021). On siis perusteltua tutkia kielenkehityksen biologisia taustatekijöitä laajemminkin. Aivotutkimus voi parhaimmillaan täydentää geneettisistä tutkimuksista saatua tietoa ja näin ollen on mukana luomassa kokonaiskuvaa kielenkehityksestä, etenkin neuraalisen kehityksen näkökulmasta. Tämä tutkimus täydentää tähän

liittyvää tutkimusaukkoa ensimmäisten ikävuosien ajalta, joka on kielenkehityksen kannalta merkityksellinen vaihe.

1.2 Aivojen valkean aineen kielellisesti merkitykselliset radastokokonaisuudet

Kielen prosessoinnin kannalta merkityksellisiä aivoalueita on havaittu olevan erityisesti otsa- sekä ohimolohkoissa (Friederici & Wartenburger, 2010). Näitä aivokuoren alueita ovat esimerkiksi otsalohkon alemman otsapaimun (*inferior frontal gyrus*) alueella olevat *pars triangularis* ja *pars orbitalis*, jotka aktivoituvat esimerkiksi semanttisen eli merkitykseen liittyvän haun ja luokittelun aikana, sekä ohimolohkon ylempi ohimopaimu eli *superior temporal gyrus* ja keskimäinen ohimopaimu eli *middle temporal gyrus*, jotka osallistuvat muun muassa sanan merkityksen ja merkityssuhteiden käsittelyyn. Puheen tuottamista ja ymmärtämistä on pitkään kuvannut klassinen kaksiosainen malli, joka koostuu Brocan ja Wernicken alueista (ks. Tremblay & Dick, 2016). Brocan alue sijaitsee tavallisesti vasemmalla otsalohkolla alemman otsapaimun alueella, ja sen on ajateltu olevan keskeinen alue puheen tuottamisessa. Wernicken alue puolestaan sijoittuu tyypillisesti vasemmalle ohimolohkolle ylemmän ohimopaimun alueelle, ja se on yhdistetty puheen ymmärtämiseen, etenkin kliinisten afasiatutkimusten perusteella (ks. Tremblay & Dick, 2016). Tämä klassinen puheen tuoton ja ymmärtämisen malli on ollut hyödyllinen kielen neurobiologian varhaisessa tutkimuksessa sekä kliinisten oirekuvien ymmärtämisessä. Viimeaikainen tutkimustieto viittaa kuitenkin siihen, että kielelliset toiminnot eivät rajoitu yksittäisiin aivoalueisiin, vaan ovat levittäytyneet aivoissa laajalti erillisiin sekä päällekkäisiin verkostoihin (Saur ym., 2008). Kielen neurobiologian määrittely aivoissa on tarkentunut huomattavasti, ja klassinen Brocan ja Wernicken kielen prosessointia kuvaava malli onkin laajentumassa (Dick ym., 2014), sillä kyseisen mallin on sellaisenaan katsottu olevan suppea kuvaamaan kielen tuottoa ja ymmärtämistä (Tremblay & Dick, 2016).

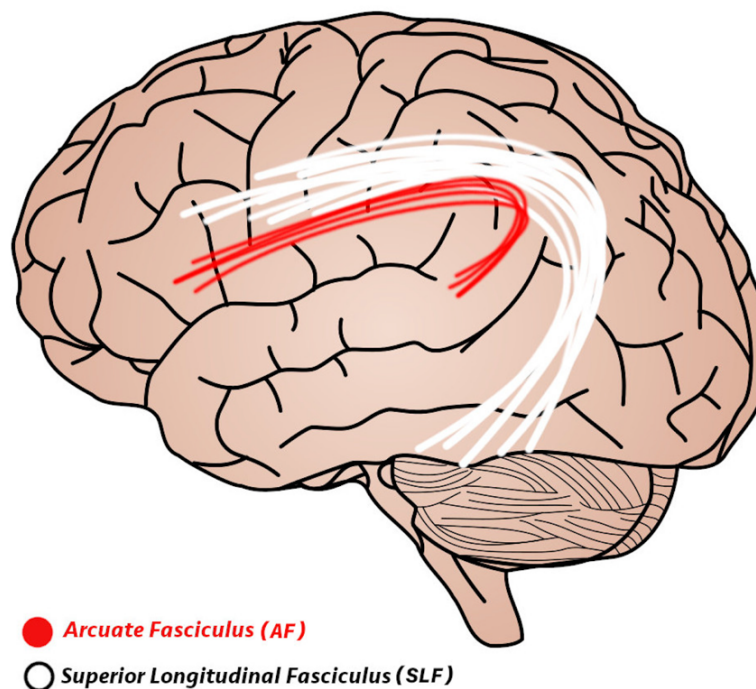
Puheen ja kielen hermoverkostot alkavat kehittyä jo varhain, jopa aikaisemmin kuin usein ajatellaan (Choi ym., 2023). Vauvoilla onkin poikkeuksellisen hyvä kyky havaita puhetta jo ennen syntymää. Kielelliset verkostot ulottuvat matalan tason aistialueilta aina assosiativalueille saakka, ja niiden erikoistuminen kielen prosessointiin näkyy erityisesti siinä, että puhetta ja kieltä käsittelevät pääreitit muodostuvat jo syntymisen aikaan tai pian sen jälkeen (Dubois ym., 2016). Kielen oppiminen edellyttää kahta keskeistä prosessia: puheen äänimallit on kyettävä yhdistämään merkityksiin ja toistamaan nämä äänimallit motorisesti äänihuulten ja artikulaatioelimien avulla (Hickok & Poeppel, 2015). Puheinformaation käsittely edellyttää toisin sanoen kahden eri hermostollisen reitin käyttöä:

kuulo-käsitteellinen reitti, joka tukee puheen merkityksiä, ja kuulomotorinen reitti, joka puolestaan auttaa tuottamaan kuultuja äänteitä puheeksi. Aivokuvantamistutkimusten myötä on havaittu, että kielelliset verkostot koostuvat sekä niille erikoistuneista aivoalueista että niitä yhdistävistä valkean aineen kuituradastoista, jotka mahdollistavat informaation kulun näiden alueiden välillä. Erityistä kiinnostusta on herättänyt se, kuinka nämä hajautetun kieliverkoston osat kommunikoivat keskenään valkean aineen radastojen välityksellä (Dick ym., 2014). Tätä vuorovaikutusta kuvaamaan on ehdotettu kielen prosessoinnin kaksiosaista mallia (*dual stream model of speech processing*; Hickok & Poeppel, 2007), joka muodostuu kahdesta valkean aineen reitistä, joiden tehtävät ovat kielellis-käsitteellinen prosessointi sekä sensomotorinen prosessointi (Hickok & Poeppel, 2015). Näitä reittejä kutsutaan suuntautuneisuutensa mukaisesti dorsaaliseksi ja ventraaliseksi radastokokonaisuudeksi, ja tämän kaksiosaisen mallin osatekijöiden katsotaan vaikuttavan kielellisen prosessoinnin eri vaiheisiin (Dick ym., 2014).

1.2.1 Dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden rakenne ja merkitys

Dorsaalinen sekä ventraalinen radastokokonaisuus koostuvat kuituradastoista, joilla on erilaiset rakenteelliset päätepisteet ja toiminnalliset tehtävät (Brauer ym., 2013). Dorsaalinen radastokokonaisuus yhdistää otsa-, ohimo- ja päälakilohkon alueita (Dick ym., 2014). Tähän kokonaisuuteen kuuluvat *superior longitudinal fasciculus* -radasto (SLF), sekä siihen sisältyvä *arcuate fasciculus* -radasto (AF). Dorsaalinen kokonaisuus yhdistää kielellisesti merkitykselliset Brocan ja Wernicken alueet, ja se on vahvasti lateralisoitunut vasempaan aivopuoliskoon. Sen yhdistämien aivoalueiden eli alemman otsapöimän ja ylemmän ohimopöimän ajatellaan osallistuvan muun muassa puheäänteiden havainnointiin, fonologiseen prosessointiin sekä syntaktisten rakenteiden käsittelyyn. Tämä yhteys on tärkeä erityisesti ensimmäisten syntymän jälkeisten kuukausien aikana, kun vauvat alkavat oppia kieltä (Choi ym., 2023). Dorsaalisen radastokokonaisuuden yhdistämät otsa- ja ohimolohkojen alueet ovatkin toiminnallisesti aktiivisia jo varhain. Samalla vauvat osoittavat kykyä yhdistää ääntöelinten liikkeitä sensomotorisiin yhteyksiin. Tämä puheen verkoston varhainen kypsyminen saattaa tukea moniaistista puheen havaitsemista ja ääntelyn kehitystä, mikä luo pohjan varsinaiselle puheen tuottamiselle ja äidinkielen oppimiselle. Dorsaalisen radastokokonaisuuden kypsyminen onkin erityisen kiihtynyttä 2–3 kuukauden iässä. Aikuisilla AF- ja SLF-radastojen on todettu olevan merkityksellisiä kielellisissä toiminnoissa, ja niiden vaurioituminen esimerkiksi aivoinfarktin seurauksena on liitetty puheen ymmärtämisen ja toiston vaikeuksiin (Breier ym., 2008).

Vaikka SLF- ja AF-radastojen ajatellaan olevan keskeisiä kielen neurobiologiassa, niiden tarkkaa alku- ja päätepistettä tai kulkureittiä aivoissa ei ole pystytty täysin yksiselitteisesti kirjallisuudessa määrittelemään (Dick ym., 2014). Radastojen järjestäytymisestä on olemassa kilpailevia malleja, eikä niiden lopullista kytkentäprofiilia ole toistaiseksi vahvistettu. Siitä huolimatta niiden merkitys kielen neurobiologiaan on tunnistettu. SLF- ja AF-radastot ovat esimerkiksi voimakkaammat ihmisillä kuin muilla kädellisillä, mikä viittaa siihen, että erityisesti dorsaalinen radastokokonaisuus on yhteydessä kielen kehittymiseen (Friederici, 2018). Dorsaalisen radastokokonaisuuden osarakenteet esitetään Kuvassa 1.



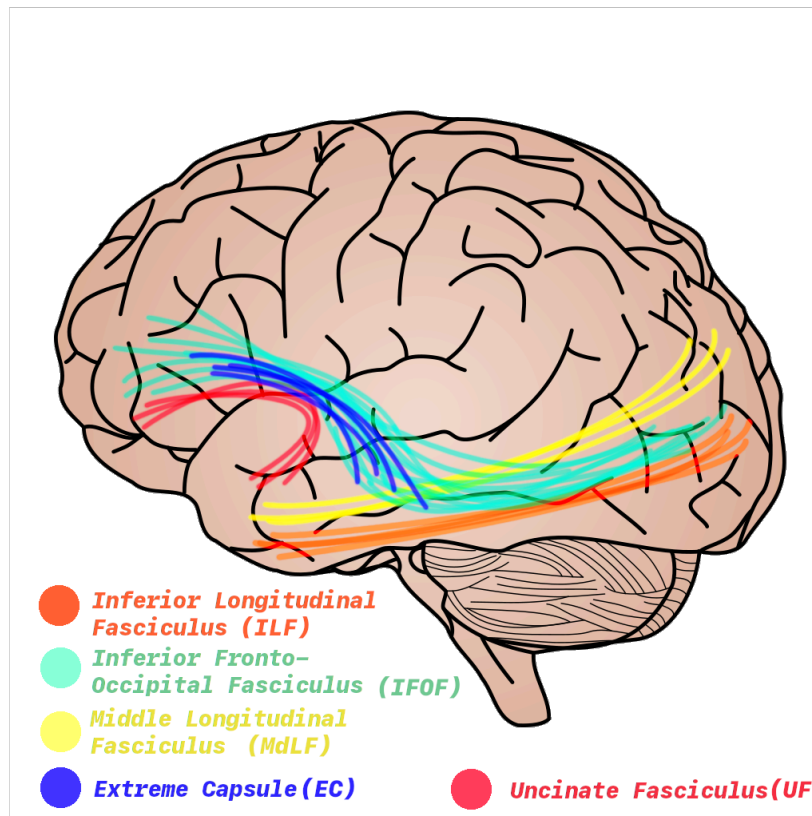
Kuva 1. Aivojen kielellisesti merkityksellisen valkean aineen dorsaalinen radastokokonaisuuden havainnekuva. Mukautettu lähteestä *Human-brain-vector.svg* (ei pvm.), *Wikimedia Commons*. Haettu 2.8.2023, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human-brain-vector.svg#file>

Ventraalinen radastokokonaisuus käsittää ohimolohkon ylemmän ja keskimmäisen osan rakenteita, ja sen on ajateltu osallistuvan korkeamman tason kielellisiin toimintoihin, kuten kielellisen informaation merkityksen prosessointiin (Hickok & Poeppel, 2007; Saur ym., 2008). Lisäksi ventraalisen radastokokonaisuuden uskotaan osallistuvan visuaaliseen sanantunnistukseen sanojen ortografisten eli kirjoitusasuun liittyvien piirteiden prosessoinnin kautta. Ventraalinen radastokokonaisuus on järjestäytynyt bilateraalisesti, joten se itsessään koostuu rinnakkaisista

prosessoinnin radoista (Hickok & Poeppel, 2007). Se koostuu anatomisesti radastoista, joita ovat *inferior fronto-occipital fasciculus* (IFOF), *inferior longitudinal fasciculus* (ILF), *uncinate fasciculus* (UF), *middle longitudinal fasciculus* (MdLF) sekä *extreme capsule* (EC) (Dick ym., 2014).

IFOF- ja ILF-radastot yhdistävät takaraivolohkon etummaiseen ohimolohkoon ja otsalohkoon (Dick ym., 2014). IFOF:n on katsottu olevan merkityksellinen perusnimeämisessä, ja se on yhdistetty ortografiseen ja semanttiseen prosessointiin (Rollans ym., 2017). Semanttiseen järjestelmään on liitetty myös ILF-radasto, jonka on havaittu osallistuvan lukemisen visuaalisortografiseen prosessointiin (Yeatman ym., 2012). Sen on havaittu myös osallistuvan sekä visuaaliseen että auditiiviseen semanttisen tiedon käsittelyyn aikuisilla (Shin ym., 2019; Wong ym., 2011).

UF-radasto yhdistää otsa- ja ohimolohkoja, ja sen on ajateltu osallistuvan kielellisiin toimintoihin, etenkin semanttiseen prosessointiin (Von Der Heide ym., 2013). Radaston ajatellaan olevan merkityksellinen semanttisen tiedon leksikaalisessa hakemisessa, ja sen eheydellä on havaittu olevan yhteys esimerkiksi semanttiseen dementiaan sekä afasian semanttiseen varianttiin (Agosta ym., 2013; Von Der Heide ym., 2013). UF-radaston merkitys kielellisissä toiminnoissa on kuitenkin vielä kiistanalainen, eikä sen osallisuudesta kielen prosessointiin ole saatu yhtenäistä näyttöä (Dick ym., 2014). Lisäksi ventraaliseen radastokokonaisuuteen kuuluvat MdLF- ja EC-radastot, joiden merkityksestä kielellisessä prosessoinnissa on toistaiseksi saatu vain niukkaa sekä hajanaista tutkimusnäyttöä (Dick ym., 2014; Wong ym., 2011). Ventraalisen radastokokonaisuuden valkean aineen radastot ovat esitetty Kuvassa 2.



Kuva 2. Aivojen valkean kielellisesti merkityksellinen ventraalinen radastokokonaisuuden havainnekuva. Radastot piirretty Kuvaan Human-brain-vector.svg. (ei pvm.). Wikimedia Commons. Haettu 2.8.2023, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human-brain-vector.svg#file>

1.2.2 Valkean aineen kehitys varhaislapsuudessa

Valkean aineen varhainen kypsyminen ja kehitys on monivaiheinen prosessi, joka vaikuttaa merkittävästi lapsen kognitiiviseen, emotionaaliseen, motoriseen sekä käyttäytymiseen liittyvään kehitykseen erityisesti lapsuudessa ja nuoruudessa (Barnea-Goraly ym., 2005; Dubois ym., 2014; Lebel & Beaulieu, 2011). Hermosolujen aksonisäikeet alkavat kasvaa ja muodostua jo ennen syntymää, ja ensimmäisten elinviikkojen aikana alkaa poikkeavien ja tarpeettomien yhteyksien karsiutuminen (Dubois ym., 2014). Vähitellen hermosolun aksonin ympärille muodostuu eristävä rasva-aineesta koostuva myeliinituppi, joka nopeuttaa ja tehostaa hermoimpulssin kulkua (Baumann & Pham-Dinh, 2001). Tämä myelinisaatio edesauttaa hermoimpulssien huomattavasti nopeampaa johtumista, ja sen oletetaan myös parantavan aivoverkkojen toiminnallista tehokkuutta (Baumann & Pham-Dinh, 2001). Tämä kypsyminen ilmenee erityisesti lapsuuden sekä nuoruuden aikana tehostuneempana tiedonkäsittelynä, mikä näyttäytyy radastojen eheyden muutoksina (Barnea-Goraly ym., 2005; Lebel & Beaulieu, 2011). Tämä prosessi käynnistyy jo raskauden toisella puoliskolla ja

jatkuu nuoruuden loppuun asti ollen voimakkainta ensimmäisen elinvuoden aikana (Dubois ym., 2014).

Edellä mainitut mekanismit tapahtuvat eri aivoalueilla eri aikaan ja vaihtelevalla nopeudella. Kallon ympärysmittan epälineaarinen kasvu on hyvä esimerkki aivojen voimakkaasta kypsymisestä ensimmäisten elinkuukausien aikana (Dubois ym., 2014; Paus ym., 2001). Vaikka vauvan aivot alkavat järjestäytyä jo varhain, ne eivät kuitenkaan ole pienoiskokoinen versio aikuisten aivoista (Dubois ym., 2014). Aivokuoren kehitys etenee vaiheittain ja alueellisesti eriytyneesti lapsuudesta varhaisaikuisuuteen saakka (Gogtay ym., 2004). Kehitysprosessi etenee hierarkkisesti: perustoimintoihin liittyvät motoriset ja sensoriset aivoalueet kypsyvät ensimmäisenä, kun taas esimerkiksi puheen ja kielen kehitykseen liittyvät ylemmät ja alemmat päälaenlohkot sekä otsalohkot kypsyvät myöhemmin. Samankaltainen hierarkkinen kehitysmalli havaitaan valkean aineen kypsymisessä, sillä esimerkiksi aisti- ja liikeärsykkeiden prosessointiin osallistuvat alueet kehittyvät varhain ja nopeasti, kun taas assosiativiset eli informaatiota välittävät radastot kehittyvät hitaammin ja kypsymisprosessi on pitkäkestoisempi (Lebel & Beaulieu, 2011; Uda ym., 2015; Yu ym., 2020). Yksinkertaisemmasta prosessoinnista vastaavien verkostojen varhaisempi kypsyminen voi näin ollen tarjota vakautta myöhemmin kehittyville, monimutkaisempaan prosessointiin osallistuville toiminnoille (Guillery, 2005).

Ensimmäisten ikävuosien aikana kielen prosessoinnin on havaittu toiminnallisten magneettikuvantamistutkimusten (*functional magnetic resonance imaging, fMRI*) perusteella tapahtuvan molemmissa aivopuoliskoissa (Emerson ym., 2016). Kieli alkaa lateralisoitua eli suuntautua vähitellen aivojen vasemmalle puoliskolle noin kahden vuoden iässä, mikä tekee tästä ikäpisteestä merkityksellisen siirtymävaiheen. Aikuisilla kielellinen prosessointi on vahvasti lateralisoitunut vasempaan aivopuoliskoon, jossa dorsaalinen reitti on keskeinen (Brauer ym., 2011). Lapsillakin havaitaan samankaltaista kielellisten verkostojen järjestäytymistä, ja hekin tukeutuvat dorsaaliseen reittiin kielen prosessoinnissa (Brauer ym., 2011; Dubois ym., 2014; Olulade ym., 2020). Diffuusiokuvantamistutkimuksissa on havaittu, että useat valkean aineen radastot, kuten UF, IFOF, ILF ja SLF ovat tunnistettavissa jo ennen syntymähetkeä (Qiu ym., 2015). Ventraalinen reitti kuitenkin kypsyä dorsaalista reittiä nopeammin, ja sen on havaittu liittyvän kielellisiin toimintoihin lapsilla (Brauer ym., 2011). Vastaavasti 7-vuotiailla lapsilla dorsaalinen prosessointireitti ole vielä tarpeeksi vahva suoriutumaan kielen prosessoinnin tehtävistä (Brauer ym., 2011). Vaikka hyvin pienten lasten aivoissa voidaan havaita samankaltaista kielellisten verkostojen järjestäytymistä kuin aikuisilla, lapsilla kielellinen prosessointi kuitenkin poikkeaa aikuisten rajatummasta

prosessointireitistä ja tukeutuu vaihtoehtoisin reitteihin, jotka yhdistävät kielen käsittelyyn osallistuvat aivokuoren alueet (Brauer ym., 2011). Toisaalta jo 1–4 kuukauden ikäisillä vauvoilla on havaittu vasemmalle painottuvaa AF:n epäsymmetriaa (Dubois ym., 2009), mutta sen suora yhteys kielelliseen prosessointiin on epäselvä (O’Muircheartaigh ym., 2013).

On siis syytä olettaa, että aikuisten kielellinen prosessointiverkosto on rajatumpi kuin lapsilla, joilla se on vasta kypsymissivaiheessa (Brauer ym., 2011). Alle 5-vuotiailla lapsilla onkin havaittu kielen prosessoinnissa vähemmän lateralisaatiota vasemmalle kuin vanhemmilla lapsilla ja aikuisilla (Olulade ym., 2020), ja kielellisen prosessoinnin lateralisaatio alkaa lisääntyä dominoivalle aivopuoliskolle 5–20 vuoden iässä (Szaflarski ym., 2006). Molempien aivopuoliskojen on havaittu osallistuvan kielelliseen prosessointiin, mikä viittaa siihen, etteivät kielelliset toiminnot kuitenkaan rajoitu ainoastaan vasempaan aivopuoliskoon (Emerson ym., 2016). Tämän vuoksi onkin tärkeää tarkastella molempien aivopuoliskojen valkean aineen radastojen rakennetta ja niiden vaikutusta lasten kielellisiin toimintoihin, ja tässä tutkimuksessa huomioidaankin radastot aivojen molemmilta puoliskoilta.

1.2.3 Diffuusiotensorikuvantaminen valkean aineen eheyden tutkimisessa

Magneettikuvantamisen (*magnetic resonance imaging*, MRI) kehittyminen on mahdollistanut aivorakenteiden tutkimisen ei-invasiivisesti eli kajoamatta elimistöön, ja diffuusiotensorikuvantaminen (*diffusion tensor imaging*, DTI) on yksi tärkeimmistä menetelmistä valkean aineen tutkimuksessa. DTI:n avulla tutkitaan veden diffuusiota eli kulkeutumista aivoissa, ja diffuusiomittausten avulla saadaan tietoa esimerkiksi valkean aineen kuitujen suuntautumisesta ja hienorakenteesta (Basser, 1995). Diffuusio valkeassa aineessa on anisotrooppista eli vesimolekyylit eivät liiku tasaisesti kaikissa suunnissa. Valkeassa aineessa myelinisoituneet aksonikuidut kulkevat rinnakkain ja ohjaavat diffuusion suunnan aksonien suuntaisesti (Le Bihan, 2003). DTI-tutkimukset ja sen sovellukset (esim. traktografia) perustuvatkin valkean aineen järjestyneisyyden havainnointiin (Beaulieu, 2009). DTI on erityisen herkkä havaitsemaan valkean aineen poikkeavuuksia, jotka eivät näy perinteisissä kuvantamismenetelmissä, ja sen avulla voidaan tarkastella valkean aineen ominaisuuksia, ennen kaikkea eheyttä hyvin tarkasti (Le Bihan, 2003; Le Bihan ym., 2001). DTI on osoittautunut olevan herkkä havaitsemaan neurologisten sairauksien, esimerkiksi MS-taudin ja skitsofrenian, taustalla vaikuttavia valkean aineen poikkeavuuksia (Le Bihan, 2003), ja näin ollen sillä on ollut kliinisesti merkittävä vaikutus. Kehittyneiden tekniikoiden myötä on pystytty niin ikään tutkimaan kehittyvän hermoston yhteyttä kognitioon ja käyttäytymiseen

(Dubois ym., 2014), ja DTI-kuvantaminen soveltuu aivojen kehityksen arviointiin jo vastasyntyneillä (Le Bihan, 2003).

Diffuusiopohjaisia mittareita on useita, mutta fraktionaalinen anisotropia (*fractional anisotropy*, FA) on vakiintunut käytetyimmäksi DTI-pohjaiseksi indeksiksi aivotutkimuksen kentällä (Assaf & Pasternak, 2008). FA-arvo kuvaa vesimolekyylien taipumusta liikkua kudoksissa tiettyyn suuntaan, ja se on herkkä valkean aineen radastojen eheydelle ja järjestäytyneisyydelle (Le Bihan ym., 2001). FA-arvo vaihtelee 0 ja 1 välillä: 0 tarkoittaa täysin isotrooppista eli suunnasta riippumatonta diffuusiota, kun taas 1 tarkoittaa anisotrooppista diffuusiota ja hyvin järjestäytyntä aksonirakennetta (Assaf & Pasternak, 2008). Korkeammat FA-arvot viittaavat ehjiin ja tiiviisiin kuiturakenteisiin, ja vastaavasti matalammat arvot voivat olla merkki vaurioituneesta tai vähemmän eheästä kuidusta. FA on herkkä valkean aineen hienorakenteen muutoksille ja sitä pidetäänkin eheyden yhteenvetomittarina (Alexander ym., 2011). Sen lisäksi muita diffuusion mittareita ovat diffuusion kokonaismäärää kuvastava keskimääräinen diffuusivisuus (*mean diffusivity*, MD), aksiaalinen diffuusivisuus (*axial diffusivity*, AD), radiaalinen diffuusivisuus (*radial diffusivity*, RD) sekä veden diffuusion voimakkuutta arvioiva näennäinen diffuusiokerroin (*apparent diffusion coefficient*, ADC) (Alexander ym., 2011; Larvie & Fischl, 2016).

FA-arvot kasvavat lapsuudesta aikuisuuteen myelinisaation myötä (Barnea-Goraly ym., 2005; Lebel & Beaulieu, 2011), ja tämä kypsyminenprosessi on merkityksellinen lapsen kognitiivisessa kehityksessä (Nagy ym., 2004; Schmithorst ym., 2005). Aivojen kypsyminenprosessi siis heijastuu DTI-parametreihin: FA-arvot nousevat aivojen kypsymisen myötä, kun taas MD- ja RD-arvot laskevat erityisesti sikiökauden puolivälistä noin kuuden vuoden ikään saakka (Ouyang ym., 2019; Uda ym., 2015). Tämä kehityskulku ei kuitenkaan ole tasalaatuista, vaan esimerkiksi aivorungon radastot kypsyvät nopeammin kuin hitaasti myelinisoituvat assosiaatoradastot (Uda ym., 2015; Yu ym., 2020). Kokonaisuutena valkean aineen kehitys noudattaa eksponentiaalista mallia, jossa voidaan erottaa nopea, keskitasoinen ja hidas vaihe ikävuosien 0–8 aikana (Yu ym., 2020).

Muutokset FA-arvoissa heijastavat erilaisia kehityksellisiä prosesseja. Aksonien lisääntynyt myelinisaatio parantaa hermoyhteyksien nopeutta ja tehokkuutta ja siten nostaa FA-arvoja (Yeatman ym., 2012). Samanaikaisesti tarpeettomien aksoniyhteyksien karsiminen puolestaan laskee FA-arvoja. Yhdessä nämä muutokset muokkaavat diffuusion ominaisarvoja, eikä niiden tulkinta ole aina yksiselitteistä. Myelinisaatiota ja aksonien karsimista säätelevät sekä geneettiset että ympäristölliset tekijät, ja esimerkiksi käyttämättömien aksonien karsimista ohjaa kokemus ja oppiminen ympäristöstä. Nämä prosessit riippuvat vahvasti yksilöllisistä kokemuksista ja ympäristöstä, ja tämä

vaihtelu voi vaikuttaa kognitiivisiin taitoihin (Yeatman ym., 2012). Yhteenvedona voidaan todeta, että FA-arvojen muutokset kuvaavat monien biologisten ja ympäristöön liittyvien tekijöiden yhteisvaikutusta ja yksilöllistä vaihtelua.

1.2.4 Valkean aineen radastojen kehitykseen vaikuttavat tekijät

Valkean aineen anisotropian ja eheyden kehittymiseen vaikuttavat useat kudosten rakenteeseen ja toimintaan liittyvät prosessit, kuten muutokset myelinisaatiossa, aksonien halkaisijassa, tiheydessä sekä säikeiden orientaatioissa (Barnea-Goraly ym., 2005). Myelinisaatio on erityisen merkittävä tekijä, sillä se vaikuttaa sekä anisotropian että valkean aineen tiheyden muutoksiin. Lisäksi aksonien järjestäytyminen ja koherenssin vahvistuminen, jotka tapahtuvat hermoyhteyksien vahvistuessa ja karsiutuessa aivojen kypsyessä, ovat keskeisiä tekijöitä anisotropian lisääntymisessä erityisesti radastojen reuna-alueilla. Tällaiset kehitysprosessit ovat dynaamisia ja aluekohtaisia, ja ne voivat heijastaa myelinisaation, aksonihalkaisijan ja kuitutiheyden muutosten vuorovaikutusta. Toisaalta säikeiden orientaation muutokset voivat vaikuttaa anisotropiaan ilman, että valkean aineen tiheys muuttuu, mikä korostaa näiden tekijöiden itsenäistä ja yhdistynyttä roolia valkean aineen kehityksessä.

Valkean aineen muutokset voivat siis johtua sekä myelinisaatiosta että aksonien rakenteellisista muutoksista, jotka vaikuttavat veden diffuusion anisotropiaan (Fields, 2008). Hermoston muovautuvuuteen vaikuttaa hermoratojen rakenteelliset muutokset, välittäjäaineiden vaihtelu sekä tarpeettomien aksonien karsiutuminen (Fields, 2008; Yeatman ym., 2012). Nämä tapahtumat muokkaavat hermoston kypsymistä yhdessä oppimiskokemusten kanssa, ja tämä tukee oppimista, kognitiivista kehitystä ja tiedonkäsittelyn tehostumista.

Ikä on merkittävä tekijä valkean aineen kehityksessä ja sen eheyden muutoksissa. Myelinisaatio etenee voimakkaasti varhaisnuoruudesta murrosikään, mikä näkyy huomattavina muutoksina radastojen eheyden ominaisarvoissa (Barnea-Goraly ym., 2005). Nuoruuden aikana valkean aineen eheämpi rakenne tukee tehokkaampaa tiedonkäsittelyä (Paus ym., 2001). Kuitenkin iän karttuessa valkean aineen eheys alkaa heiketä, mikä ilmenee myeliinin vähentymisenä, ja tämä heikentää radastojen toiminnallista tehokkuutta (Cox ym., 2016). Terveillä ikääntyneillä vanhenemiseen liittyvät erot valkean aineen rakenteessa voivat liittyä erilaisiin neurobiologisiin prosesseihin, kuten aksonitiheyden vähenemiseen, mikrovaskulaarisiin vaurioihin sekä myeliinitupen rappeutumiseen (Fan ym., 2019; Sullivan & Pfefferbaum, 2006). Nämä muutokset voivat ilmentyä hermoverkkojen heikentyneenä tiedonkäsittelynä. Valkean aineen eheyteen voivat vaikuttaa myös neurologisen

kehityksen poikkeamat, ja esimerkiksi nuorilla autismin kirjon henkilöillä on havaittu alhaisempia FA-arvoja koko aivojen alueella, mutta erityisesti alemman otsapaimun ja alemman päälakilohkon alueilla, jotka ovat myös kielellisesti merkityksellisiä alueita (Bonilha ym., 2008). Monilla autismikirjon lapsilla onkin huomattavia hankaluuksia puheen ja kielen osa-alueilla (Mody ym., 2017). Lisäksi henkilöillä, joilla on kehityksellinen kielihäiriö, ei havaittu merkittävää FA-arvojen kasvua SLF-radastossa nuoruudessa, kun taas vertailuryhmällä FA kasvoi merkittävästi viitaten radastojen heikompaan eheyteen (J. C. Lee ym., 2020). Vastaavasti myös ventraalisissa radoissa on havaittu vertailuryhmää alhaisemmat FA-arvot nuoruudessa ja aikuisuudessa. Poikkeavat toiminnalliset yhteydet heijastuvat valkean aineen ratojen eheyteen, mikä heikentää nopeaa ja tehokasta hermostollista viestintää eri aivoalueiden välillä (Yang ym., 2018).

Valkean aineen radastot eivät ole syntymästä lähtien täysin kypsiä, ja siksi myös kasvuympäristöllä ja myöhemmällä kielellisellä altistuksella on tärkeä rooli valkean aineen eheyden kehittymisessä (Su ym., 2018). Lisäksi lapsen ja vanhemman välinen lisääntynyt keskustelualtistus ja erityisesti keskustelun vuorovaikutuksellisuus lapsuudessa saattavat edistää kielenkehityksen kannalta olennaisten dorsaalisten radastojen kypsymistä (Romeo ym., 2018). Valkean aineen kypsymiseen vaikuttavat useat biologiset ja ympäristölliset tekijät, ja niiden yhteisvaikutus muovaa lapsen kehityskulkua yksilöllisesti. Yksilöiden välillä esiintyy luontaisesti valkeaan aineeseen liittyvää vaihtelua ja esimerkiksi ikä, myelinisaatio ja aksonien rakenteelliset muutokset voivat aiheuttaa eroja yksilöiden välille etenkin kehittyvissä aivoissa. Lisäksi neurobiologiset poikkeamat, kuten autismikirjo vaikuttavat valkean aineen eheyden kehityskulkuun. Myös oppimiskokemukset ja ympäristö muokkaavat osaltaan valkean aineen kehittymistä ja hermoverkkojen toiminnallisuutta.

1.3 Valkean aineen kehittymisen yhteys kognitiivisiin ja kielellisiin taitoihin

Valkean aineen kypsyminen on keskeinen osa hermostollista kehitystä erityisesti ensimmäisten elinvuosien aikana, jolloin myös kielelliset ja kognitiiviset taidot kehittyvät nopeasti. Vaikka valkean aineen kypsymisen ja kognitiivisten taitojen kehityksen välillä on todettu yhteys, näiden prosessien tarkempi vuorovaikutus on edelleen epäselvä. Erityisesti kielelliseen kehitykseen ja valkean aineen eheyteen liittyvä tutkimus ensimmäisiltä ikävuosilta on edelleen hyvin vähäistä. Tutkimustulokset ovat kuitenkin osoittaneet, että valkean aineen kypsyminen, mukaan lukien myelinisaatio, on merkittävä prosessi varhaisessa kielellisessä ja kognitiivisessä kehityksessä (Deoni ym., 2016; O’Muircheartaigh ym., 2014).

Valkean aineen radastojen eheys on olennaisesti yhteydessä varhaislapsuuden kognitiivisiin taitoihin. Eheyden ja kognitiivisten taitojen väliset suhteet vaihtelevat muun muassa lapsen iän ja perinnöllisten tekijöiden mukaan (S. J. Lee ym., 2017). Lisäksi radastojen kypsyminen on epätasaista: esimerkiksi taaemmat radastot, kuten ILF ja AF kypsyvät nopeammin kuin etummaisat radastot, kuten UF (S. J. Lee ym., 2017). Nämä havainnot tukevat aivokuoren hierarkkista kypsymistä sensomotorisista alueista kohti korkeamman tason prosessointia (Guillery, 2005). Hienorakenteen kehityskulku ennustaa kognitiivista kehitystä eri tavoin eri ikävaiheissa: esimerkiksi 1–vuotiailla vähemmän kypsä hienorakenne oli yhteydessä parempiin kognitiivisiin taitoihin, kun taas 2–vuotiaana yhteys oli päinvastainen (S. J. Lee ym., 2017). Lisäksi eräässä tutkimuksessa lapsilla, joilla oli paremmat kognitiiviset kyvyt, myelinisaatio eteni hitaammin mutta pitkäkestoisemmin, mikä johti korkeampaan myelinisaation kokonaismäärään kolmen vuoden iässä (Deoni ym., 2016). Lisäksi esimerkiksi aivokurkiaisien ja muiden keskeisten radastojen kokonaistilavuus on havaittu olevan merkittävästi yhteydessä reseptiivisen ja ekspressiivisen kielen taitoihin neljän ensimmäisen ikävuoden aikana (O’Muircheartaigh ym., 2014).

Näiden tutkimustulosten valossa valkean aineen kehityksen voidaan ajatella olevan keskeinen tekijä sekä kognitiivisen että kielellisen kehityksen taustalla varhaislapsuudessa. Yhteys ei kuitenkaan ole yksiselitteinen, vaan prosesseissa ilmenee yksilöllistä vaihtelua. Vaikka varhaislapsuudessa kielellisten taitojen kehitys sekä aivojen kypsyminen onkin erittäin voimakasta, tässä tutkimuksessa tavoitteena on selvittää, voidaanko valkean aineen radastojen eheyksien eroista syntymähetkellä ennustaa kielellistä suoriutumista taaperoiässä. Aikaisempia tutkimustuloksia dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden eheyden yhteydestä kielellisiin taitoihin on koottu Taulukkoon 1.

Taulukko 1.

Aikaisempien tutkimusartikkeleiden päätuloksia dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden eheyden yhteydestä kielellisiin taitoihin

Tutkimus	n	Tutkimus-asetelma	Ikä (ka) kuvaushetkellä; kognitiivisissa arvioissa	Kieli	Kognitiiviset ja behavioraaliset testimenetelmät	ROI; eheyden parametrit	Päätulokset
Broce ym., 2015	19 (9 n, 10 m)	poikittais-asetelma	5;0–8;0 (6;8); 2 viikkoa MRI-kuvantamisen jälkeen	englanti, espanja	reseptiivinen kieli ja semantiikka (CELF-4 ¹)	AF; FA, ADC, RD	<p>Robusti lineaarimalli: (ennustaja → lopputulema), kaikissa $p < .05$ FA AF_{vasen} → reseptiivinen kieli, semantiikka FA AF_{vasen, anteriorinen} → reseptiivinen kieli, semantiikka FA AF_{vasen, pitkä} → semantiikka FA AF_{oikea, pitkä} → reseptiivinen kieli</p> <p>RD AF_{vasen} → reseptiivinen kieli, semantiikka RD AF_{oikea} → reseptiivinen kieli, semantiikka RD AF_{vasen, anteriorinen} → reseptiivinen kieli, semantiikka RD AF_{oikea, anteriorinen} → semantiikka RD AF_{vasen, pitkä} → reseptiivinen kieli, semantiikka RD AF_{oikea, pitkä} → reseptiivinen kieli RD AF_{oikea, posteriorinen} → reseptiivinen kieli</p> <p>ADC:lla ei merkitseviä yhteyksiä</p>
Girault ym., 2019	447 (207 n, 240 m)	pitkittäis-asetelma, poikittais-asetelma	1. kuvantaminen: 1.71–8.71 vko (3.89) 2. kuvantaminen: 0;11–1;2 (1;1) 1. kognitiivinen arvio: 0;11–1;2 (1;0) 3. kuvantaminen: 1;10–2;2 (2;1) 2. kognitiivinen arvio: 1;10–2;2 (2;1)	englanti, espanja	reseptiivinen ja ekspressiivinen kieli (MSEL ²), josta laskettu varhaisen oppimisen standardoitu kokonaispistemäärä (ELC)	AF, SLF, IFOF, ILF, UF; FA, AD, RD	<p>Regressiomallit: <i>ELC-pisteet:</i> AD SLF_{oikea} $p = .05$, hitaampi väheneminen → korkeammat pisteet <i>Reseptiivinen kielitaito:</i> RD AF_{vasen} $p = .026$ RD AF_{oikea} kaksi segmenttiä $p = .035$, $p = .026$ hitaampi väheneminen → korkeammat pisteet RD IFOF_{vasen} $p = .018$ RD ILF_{vasen} $p = .017$ RD SLF_{vasen} $p = .024$ hitaampi väheneminen → korkeammat pisteet</p>
Kim ym., 2006	14 kielihäiriö= 7	ryhmä-vertailu,	2;6–6;7 (3;10); ei tiedossa	englanti	reseptiivinen ja ekspressiivinen	SLF, ILF; FA	Ei merkitseviä eroja ryhmien välillä

	kontrolli = 7	poikittais- asetelma			kieli (SELSI ³ , PRES ⁴)		
Langer ym., 2017	32 dysleksiariski = 14 (7 n, 7 m) kontrolli= 18 (10 n, 8 m)	ryhmä- vertailu, poikittais- asetelma	Riskiryhmä (333 pv), Kontrolliryhmä (298 pv); ei tiedossa	englanti	reseptiivinen ja ekspressiivinen kieli (MSEL)	AF; FA, AD, RD	Ryhmävertailut: <i>Riskiryhmä < Kontrolliryhmä:</i> FA AF _{vasen} $p = .011$ <i>Riskiryhmä > Kontrolliryhmä:</i> AD AF _{vasen} $p = .024$ Korrelaatiot: <i>Koko otos: ekspressiivinen kieli</i> FA AF _{vasen} $r = .53, p = .022$
Liu ym., 2019	23 ASD-riski=15 kontrolli = 8	ryhmä- vertailu, pitkittäis- asetelma	6 viikkoa (6.42 vkoa); 18 kk iässä	englanti	reseptiivinen ja ekspressiivinen kieli (MCDI ⁵)	AF, SLF; FA, MD, AD, RD	Ryhmävertailut: <i>Kontrolliryhmä > Riskiryhmä:</i> FA SLF _{vasen} ($p = .02$) <i>Kontrolliryhmä < Riskiryhmä:</i> FA SLF _{oikea} ($p = .03$) Korrelaatiot: <i>Koko otos MCDI-pisteet:</i> FA AF _{vasen} $r = .42, p = .02$ FA SLF _{vasen} $r = .44, p = .02$
Morgan ym., 2018	86 kielihäiriö = 13 kehityksellinen puueenhäiriö = 17 puheen ja kielen kehityksellinen häiriö = 11 kontrolli = 45	ryhmä- vertailu, poikittais- asetelma	9;3–11;3; Samassa ikäasteessa kuvantamisen kanssa	englanti	puheentuotto, fonologinen prosessointi (GFTA-II ⁶), reseptiivinen ja ekspressiivinen kieli (CELF-IV)	AF, EC; FA	Ei merkitseviä eroja ryhmien sisällä tai ryhmien välillä.
Roberts ym., 2014	39 kielihäiriö = 14 (6 n, 8 m)	ryhmä- vertailu, poikittais- asetelma	kielihäiriö = 9;9, kontrolli = 11;5;	englanti	reseptiivinen ja ekspressiivinen kieli (CELF-IV, CTOPP ⁷)	AF; FA, AD, MD, RD	Päävaikutukset: <i>Kielihäiriö:</i> MD AF _{vasen} & LI $p = .04$ RD AF _{vasen} & LI $p = .02$

	kontrolli = 25 (9 n, 16 m)		Puheterapeutin ja neuropsykologin arvio edeltävästi				Oikeassa aivopuoliskossa ei merkitseviä päävaikutuksia
							Regressio koko otoksessa: <i>CELF-IV-pisteet:</i> MD AF _{vasen} $p < .01$ RD AF _{vasen} $p = .03$ AD AF _{vasen} $p = .05$ Ei yhteyksiä yksittäisissä alaryhmissä
Sket ym., 2019	78 (35 n, 43 m)	pitkittäis-asetelma	5–58 päivää (26 pv); 12 kk iässä	englanti	reseptiivinen kieli (MCDI)	AF; FA	AF _{vasen} korkeampi FA fronto-parietaalialueella oli yhteydessä parempiin reseptiivisen kielen taitoihin ($p = .008$). AF _{oikea} ei merkittäviä tuloksia.
Verly ym., 2019	39 kielihäiriö = 17 (6 n, 11 m) kontrolli = 22 (7 n, 15 m)	ryhmä-vertailu, poikittais-asetelma	6–12 (kielihäiriö = 10;1), (kontrolli = 11); kielellisten taitojen arviointi samana päivänä kuin MRI, tai 1 kk ennen kuvantamista	hollanti	reseptiivinen ja ekspressiivinen kieli (CELF-4NL ⁸), reseptiivinen sanasto (PPVT-III-NL ⁹)	AF, SLF; EC, ILF, MdLF, UF; FA; ADC	Ryhmävertailut: <i>kielihäiriöryhmä > kontrolli:</i> ADC _{vasen} kaikissa radastoissa $p = .030$ FA SLF _{oikea} $p = .049$ FA SLF, MdLF, ILF & EC oikea $p > .05+$ <i>kielihäiriöryhmä < kontrolli:</i> FA _{vasen} kaikissa radastoissa $p = .0064+$ FA ILF _{vasen} $p = .005$ FA MdLF _{vasen} $p = .0019$ ADC ILF oikea $p = .044$
							Korrelaatiot: <i>reseptiivinen sanasto kontrolliryhmä:</i> FA EC _{oikea} $r = .581, p = .006$ ADC MdLF _{oikea} $r = -.624, p = .003$ Ei merkitseviä korrelaatioita kielihäiriöryhmässä
Vydrova ym., 2015	71 kielihäiriö = 37 (16n, 18 m) kontrolli = 34 (12 n, 25 m)	ryhmä-vertailu, poikittais-asetelma	6–12; kielihäiriöryhmä oli käynyt puheterapeutin klinisessä arvioissa edeltävästi		kliininen puheterapeutin arvio kielellisistä taidoista, vanhempien täyttämä	AF, IFOF, ILF, UF; FA, AD, MD, RD	Ryhmävertailut: <i>kielihäiriöryhmä < kontrolli:</i> FA AF, IFOF, UF, ILF molemmissa aivopuoliskoissa $p < .001$ AD IFOF _{oikea} $p = .022$ AD UF _{vasen} $p = .008$ <i>kielihäiriöryhmä > kontrolli:</i>

					Comprehensive Medical Questionnaire	MD AF _{vasen} $p < .001$ MD AF _{oikea} $p = .016$ MD IFOF _{vasen} $p = .006$ RD AF _{vasen&oikea} , ILF _{vasen} , IFOF _{vasen} $p < .001$ RD UF _{vasen} $p = .014$ RD UF _{oikea} $p = .040$
Walton ym., 2018	68 (31 n, 37 m)	poikittais-asetelma	3;0–5;7 (4;0); kielellinen arviointi samana päivänä kuin MRI	englanti	fonologinen prosessointi, nopea nimeäminen (NEPSY-II ¹⁰)	AF, UF, IFOF, ILF; FA, MD, AD, RD Korrelaatiot: <i>fonologisen prosessoinnin pistemäärä:</i> FA IFOF _{vasen} $r = .340, p < .01$ FA IFOF _{oikea} $r = .248, p < .05$ MD IFOF _{vasen} $r = -.301, p < .05$ MD UF _{vasen} $r = -.278, p < .05$ RD IFOF _{vasen} $r = -.362, p < .01$ RD UF _{vasen} $r = -.265, p < .05$ Ei merkitseviä yhteyksiä nopean nimeämisen ja DTI-parametrien välillä. FA AF _{vasen} ei merkitsevä fonologisen prosessoinnin kannalta jatkovertailuissa
Yeatman ym., 2011	55	poikittais-asetelma	7–11;11 (9;10); kielellinen ja kognitiivinen arviointi tehty Doughertyn ja kumppaneiden (2007) tutkimuksen yhteydessä	englanti	fonologinen muisti ja tietoisuus (CTOPP), peruslukutaito (WJ-III ¹¹)	AF; FA, AD, RD SLF _{vasen} , SLF _{oikea} sekä AF toimivat kontrolliradastoina Korrelaatiot: <i>fonologinen tietoisuus</i> FA AF _{vasen} $r = -.33, p = .01$ RD AF _{vasen} $r = .30, p = .02$ AD AF _{vasen} $r = -.02, p = .88$ AD-arvot eivät olleet merkitseviä Kontrolliradastojen DTI-parametrit eivät korreloineet merkitsevästi kielellisten taitojen kanssa.
Zuk ym., 2021	40 (20 n, 20 m)	pitkittäis-asetelma	1. kuvantaminen: 0;4–1;6 (0;10) 2. kuvantaminen: 4;0–6;6 (5;6); seuranta-arvion yhteydessä	englanti	kuullun ymmärtäminen, sanastotieto (WJ-IV OL ¹² , PPVT-4 ¹³), fonologinen tietoisuus: äänteiden ja tavujen pilkkominen,	AF, ILF; FA Regressiomalli: <i>Äänteiden ja tavujen pilkkominen:</i> FA AF _{vasen} $B = 98.395, \beta = .526, p = .004, R^2 = .422$ <i>Äänteiden ja tavujen yhdistely:</i> FA AF _{vasen} $B = 74.079, \beta = .496, p = .004, R^2 = .506$

äänteiden ja
tavujen yhdistely
(WJ-IV OL)

Sanastotieto:

FA AF_{vasen} B = 47.835, $\beta = .435$, $p = .042$, $R^2 = .217$
ILF:n osalta ei merkitseviä tuloksia

¹Clinical evaluation of language fundamentals 4 (CELF-4; Semel ym., 2003); ²Mullen Scales of Early Learning (MSEL; Mullen, 1995); ³Sequenced Language Scale for Infants (SELSI; Y. T. Kim ym., 2003); ⁴Preschool Receptive-Expressive Language Scale (PRES; Y. T. Kim, 2003) ⁵The MacArthur-Bates Communicative Development Inventory (MCDI; Fenson ym., 2007); ⁶Goldman Fristoe Test of Articulation 2nd Edition (GFTA-II Goldman & Fristoe, 2000); ⁷Comprehensive Test of Phonological Processing (CTOPP; Wagner ym., 1999); ⁸Clinical evaluation of language fundamentals-vierde-editie (CELF-4NL; Kort ym., 2008); ⁹The Peabody Picture Vocabulary Test (PPVT-III-NL; Dunn and Dunn, 2005); ¹⁰NEPSY-Second Edition (NEPSY-II; Korkman ym., 2007); ¹¹Woodcock Johnson-III Tests of Achievement (WJ-III; Woodcock ym., 2001); ¹²Woodcock-Johnson Tests of Oral Language (WJ-IV OL; Schrank ym., 2014); ¹³The Peabody Picture Vocabulary Test (PPVT-4, Dunn, and Dunn, 2007)

⁺ trendi kohti merkitsevyyttä

Dorsaalisten radastojen eheämmän rakenteen havaittiin olevan yhteydessä parempiin kielellisiin taitoihin kielellisesti tyypillisesti kehittyvien lapsien joukossa (Broce ym., 2015; Girault ym., 2019; Liu ym., 2019; Roberts ym., 2014; Sket ym., 2019; Yeatman ym., 2011; Zuk ym., 2021) kuin myös vertaillessa tyypillisesti kehittyviä lapsia niihin, joilla oli jokin kielellinen vaikeus (Langer ym., 2017; Liu ym., 2019; Roberts ym., 2014; Vydrova ym., 2015). Lisäksi viitteitä on saatu siitä, että esimerkiksi kielihäiriöryhmässä dorsaalisisissa radastoissa on alhaisempi eheys kontrolleihin verrattuna (Verly ym., 2019). Toisaalta kaikissa tutkimuksissa ei tämänkaltaisia ryhmäeroja havaittu, (J. Kim ym., 2006; Morgan ym., 2018), eikä kaikkien dorsaalisten radastojen ja kielellisten taitojen välillä havaittu yhteyttä (Walton ym., 2018; Yeatman ym., 2011).

Vastaavanlaisesti ventraalisten radastojen eheämpi hienorakenne on yhdistetty parempiin kielellisiin taitoihin (Girault ym., 2019; Verly ym., 2019; Walton ym., 2018), ja alhaisempi eheys ventraalisissa radastoissa on liitetty kielellisiin vaikeuksiin (Verly ym., 2019; Vydrova ym., 2015). Tämäkään ei ole yksiselitteistä, sillä osassa tutkimuksissa ryhmäeroja ei ole pystytty osoittamaan (J. Kim ym., 2006; Morgan ym., 2018) tai merkitsevää yhteyttä kielellisiin taitoihin ei ylipäättään löydetty (Zuk ym., 2021).

Dorsaalinen ja ventraalinen radastokokonaisuus ovat merkittäviä kielellisten taitojen ja kielellisen prosessoinnin kannalta. Radastokokonaisuuksien eheys on yhdistetty kielellisiin taitoihin ja niissä esiintyvään vaihteluun jo varhaisessa vaiheessa. Vaikka erityisesti ryhmävertailujen osalta tulokset eivät ole yksimielisiä, tukee tutkimusnäyttö vanhempien lasten osalta radastojen osuutta kielellisten taitojen hermostollisessa perustassa. Vastasyntyneillä toteutettuja kuvantamistutkimuksia on saatavilla vain muutama, ja ne eroavat toisistaan sekä tutkimustuloksien että metodiikan osalta (Girault ym., 2019; Liu ym., 2019; Sket ym., 2019). Tämän vuoksi onkin tärkeää tutkia lisää, vaikuttaako valkean aineen radastojen eheys vastasyntyneenä myöhempään kielelliseen kehitykseen. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, ennustaako dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden eheys ensimmäisten elinviikkojen aikana sanavaraston kokoa ja ilmaisupituutta 30 kuukauden eli 2,5 vuoden ikäisenä.

Varhainen aivojen kehitys on monimutkainen prosessi, jossa geneettiset ja ympäristölliset tekijät muovaavat hermoverkostoja edesauttaen motoristen, emotionaalisten ja kognitiivisten toimintojen kehittymistä. Valkean aineen myelinisaatio on olennainen prosessi nopean ja tarkan tiedonvälityksen kannalta jo kehittyvissä aivoissa. Tästä huolimatta useimmat tutkimukset ovat keskittyneet yli 4-vuotiaisiin lapsiin (Deoni ym., 2016), vaikka aivojen ja kognitiivisten taitojen nopein kehitys tapahtuu

ensimmäisten elinvuosien aikana (Gilmore ym., 2018). Varhainen tutkimus on tärkeää, sillä valkean aineen kypsyminenprosessi mahdollisesti heijastaa aivojen kypsymisen herkkyyttä varhaisen kielen ja muiden kognitiivisten taitojen kehitykselle (O’Muircheartaigh ym., 2014).

Tähänastiset tutkimukset ovat osoittaneet, että syntymähetkellä tärkeimmät valkean aineen radastot ovat jo olemassa ja rakenteelliset sekä sensomotoriset lepotilan toiminnalliset verkostot jo hyvin kehittyneet (Gilmore ym., 2018). Kahden vuoden ikään mennessä aivojen rakenteellinen ja toiminnallinen perusrakenne näyttäisi olevan valmis. Tutkimustietoa on kuitenkin hyvin niukasti saatavilla dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheyden yhteydestä kielellisiin taitoihin aivan ensimmäisiltä ikävuosilta. Aikaisemmin esitellyn Taulukon 1 tutkimusartikkeleissa tarkasteltiin valkean aineen eheyttä ja kielellisiä taitoja pääosin päiväkotij- ja kouluikäisiltä lapsilta. Vaikka tutkimustieto valkean aineen kypsymisestä ja sen yhteydestä kognitiivisiin taitoihin lisääntyy jatkuvasti, on tutkimuksessa merkittävä aukko juuri ensimmäisten ikävuosien kohdalla, jolloin kehitys on sekä neuroaalisesti että kognitiivisesti todella voimakasta. Tässä tutkimuksessa keskitytään erityisesti dorsaalisten ja ventraalisten radastojen eheyden yhteyttä sanavarastoon ja ilmaisupituuteen 30 kuukauden iässä. Toinen ikävuosi on kehityksellisesti kriittinen vaihe sanaston kasvun ja ilmaisupituuden kehityksen kannalta, joten tämä tutkimus tarjoaa uuden näkökulman siihen, miten radastokokonaisuudet vaikuttavat kielellisiin taitoihin jo varhaisessa vaiheessa. Tämä tutkimus auttaa hahmottamaan kielellisten taitojen ja vaikeuksien tunnistamista, sekä syventää ymmärrystä kielen neurobiologisista mekanismeista. Tutkimus täydentää varhaislapsuuden tutkimuskentän aukkoa valkean aineen eheyden ja kielellisten taitojen välisestä yhteydestä, ja näin ollen rakentaa samalla pohjaa tuleville tutkimuksille ja sovellusaloille.

2 TUTKIMUSKYSYMYKSET JA HYPOTEESIT

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena on selvittää, voidaanko aivojen valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheydellä ennustaa kielellisiä taitoja, erityisesti sanavaraston kokoa sekä ilmaisun pituutta 30 kuukauden iässä. Tutkielman avulla vastataan seuraaviin kysymyksiin:

1. Ennustaako vastasyntyneen aivojen valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheys sanavaraston kokoa 30 kuukauden iässä?

2. Ennustaako vastasyntyneen aivojen valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheys kolmen pisimmän ilmaisuuden keskipituutta 30 kuukauden iässä?

Aiemman tutkimusnäytön perusteella voidaan olettaa, että valkean aineen radastokokonaisuuksien eheämpi hienorakenne olisi yhteydessä parempiin kielellisiin taitoihin taaperovaiheessa. Tutkimusnäyttö näin varhaisessa ikäpisteessä on kuitenkin vielä niukkaa, eikä jo saatu tutkimusnäyttö ole yhdenmukaista. Tämä tutkimus antaa arvokasta tietoa ensimmäisten elinvuosien aikana tapahtuvasta kielellisestä kehityksen neurobiologiasta sekä valottaa sitä, heijastuuko valkean aineen kypsyamisprofiili juuri syntymähetkellä kielellisiin taitoihin 30 kuukauden iässä. Tulokset voivat osaltaan auttaa kehittämään parempia työkaluja viivästyneen kielenkehityksen tunnistamiseen ja varhaisen tuen mahdollistamiseen.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT JA AINEISTON ANALYYSI

3.1 Tutkittavat

Tutkielman aineisto on peräisin FinnBrain-syntymäkohorttitutkimuksesta, jossa syntymäkohortin lapsia seurataan aina raskausajasta pitkälle aikuisuuteen. Tutkimuksen tavoitteena on saada monitieteisiä sekä toistuvia mittauksia samoista henkilöistä mahdollisimman pitkältä ajalta kehityskulkujen kartoittamiseksi ja niihin vaikuttavien tekijöiden tunnistamiseksi. Tutkimus sisältää useita eri osatutkimuksia eri ikäpisteissä. Kyseisen tutkimuksen päätavoitteena on selvittää, miten perimä ja ympäristötekijät vaikuttavat lapsen kehitykseen eri ikävaiheissa. Tarkastelun kohteena on äidin raskaudenaikaisen stressin sekä raskautta edeltävien masentuneisuus- tai ahdistuneisuusoireiden vaikutus lapsen hermostolliseen kehitykseen.

FinnBrain-kohorttitutkimuksen tutkittavat rekrytoitiin kolmesta eri äitiysneuvolasta ensimmäisellä ultraäänikäynnillä äitien ollessa raskausviikolla 12. Tutkittavat rekrytoitiin Varsinais-Suomen ja Ahvenanmaan alueelta joulukuun 2011 sekä huhtikuun 2015 välillä. Äidin koulutusta koskevat tiedot kerättiin kyselylomakkeella raskausviikolla 14. Äidin koulutustaso jaettiin kolmeen luokkaan: matala (toisen asteen tutkinto), keskitaso (ammattikorkeakoulututkinto) ja korkea (ylempi korkeakoulututkinto tai tohtorintutkinto). Tutkimukseen osallistui 3808 raskaana olevaa naista sekä 2623 isää tai muuta äidin kumppania, ja lopullisessa kohortissa on yhteensä 3837 lasta. Tutkittavat puhuivat äidinkielenään joko suomea tai ruotsia. Syntymäkohortti jaettiin tapaus- ja

kontrolliryhmään, ja tarkoituksena on verrata lapsia, joiden äideillä oli enemmän raskaudenaikaisia masentuneisuus- tai ahdistusoireilua kontrolliryhmään. Lisäksi otoksessa oli tutkittavia, jotka eivät kuuluneet tapaus- tai kontrolliryhmään, vaan heidät oli esimerkiksi rekrytoitu myöhemmin tutkimukseen. Tarkka alkuperäisen syntymäkohortin kuvaus on saatavilla Karlssonin ja kollegoiden (2018) julkaisussa.

Tämän tutkimuksen otoksen tutkittavat osallistuivat vastasyntyneenä magneettikuvantamistutkimukseen, ja heidän kielitaitoaan arvioitiin vanhemman täyttämän ja palauttaman MCDI-kyselylomakkeen avulla. Magneettikuvantamistutkimukseen osallistui alun perin 169 tutkittavaa. Tässä tutkimuksessa tarkasteltava aineisto koostui 98 tutkittavasta, joilta oli saatavilla sekä MCDI-kyselylomake 30 kuukauden eli 2,5 vuoden ikäpisteessä sekä magneettikuvantamisen data. Tähän tutkimukseen sisään otetut tutkittavat olivat magneettikuvantamisen hetkellä 11–54 päivän ikäisiä. Sisäänottokriteerinä oli lisäksi lapsen syntyminen täysiaikaisena. Tutkittavien taustatiedot on esitetty Taulukossa 2.

Taulukko 2.

Tutkittavien frekvenssit jokaisen taustamuuttujan luokassa

Tutkittavien taustatiedot	n	Keskiarvo, keskihajonta, (mediaani)	Minimi, maksimi
Sukupuoli	Tyttö 46 Poika 52		
Ikä kuvaushetkellä (vuorokausina syntymähetkestä)		26.45, 7.81, (25,50)	11, 54*
Äidin koulutustaso**	1 = 23 2 = 30 3 = 44	2.22, 0.81	
Jakomuuttuja	2 = 24 99 = 58 77 = 16		

Koulutustaso: 1 = matala, 2 = keskitaso, 3 = korkea

Jakomuuttuja: 2 = tapaus, 99 = kontrolli, 77 = muu

*Maksimiarvo oli 54; sen jälkeen suurin arvo oli 43

3.2 Tutkimuksen eettisyys

FinnBrain-tutkimuksessa tutkittavilta saatu tieto on kerätty Maailman lääkäriiton Helsingin julistusta noudattaen, ja Varsinais-Suomen sairaanhoitopiirin eettinen lautakunta on hyväksynyt kyseisen tutkimuksen ja sen osat (Karlsson ym., 2018). Vanhemmat antoivat kirjallisen suostumuksensa ja täyttivät sen myös lapsensa puolesta. Tutkittaville kerrottiin mahdollisuudesta keskeyttää FinnBrain-tutkimuksessa, tai jossakin sen osassa ilman syytä missä tutkimuksen vaiheessa tahansa. Lisäksi informoitiin tutkimusaineiston tietoturvalisistä käsittelystä Turun yliopiston tiloissa sekä siitä, ettei yksittäisiä tutkittavia voida tunnistaa aineiston pohjalta tehdyistä tutkimusraporteista. Tutkittaville ilmoitettiin, että kerätty aineisto tuhoetaan FinnBrain-tutkimuksen päätyttyä.

3.3 Mittarit

3.3.1 Varhaisten kielellisten taitojen arviointi MCDI-menetelmällä

Kielellisiä taitoja arvioitiin MCDI-lomakkeen suomenkielisellä versiolla, jolla voidaan arvioida varhaista sanastoa sekä ilmaisupituutta. Menetelmä sisältää kaksi arviointilomaketta eri ikävaiheisiin. Nuorempien lasten versio (Lapsen kommunikaation kehitys: sanat ja eleet, engl. *The Infant MCDI*) on suunnattu 8–16 kuukauden ikäisille lapsille ja hieman vanhempien lasten versio (Lapsen kommunikaation kehitys: Sanat, taivutukset ja lauseet, engl. *The Toddler MCDI*) ikävaiheisiin 16–30 kuukautta. Kahden vuoden iässä omaksutulla sanastolla on vahva yhteys kielellisiin rakenteisiin (Stolt & Salmi, 2020), minkä vuoksi tässä tutkimuksessa tarkasteltiin 16–30 kuukauden ikäisille suunnattua MCDI-lomaketta ja sen osa-alueita. MCDI-lomakkeet pyydettiin koko tutkimuskohortilta, ja lomakkeet lähetettiin perheille joko paperisena tai elektronisena versiona. Vanhemmat täyttivät strukturoituun arviointilomakkeeseen, mitä taitoja lapsi oli omaksunut. Lomake täytettiin tutkittavan ollessa 14 kuukauden ja 30 kuukauden ikäinen, mutta tässä tutkimuksessa analysoitiin ainoastaan 30 kuukauden ikäpisteen aineistoa.

Vanhemmat täyttivät joko suomenkielisen tai ruotsinkielisen kyselylomakkeen riippuen lapsen ensisijaisesta kotikielestä. Molemmissa versioissa sanalistat sisältävät ikätasolle tyypillisiä sanaluokkakategorioiden sanoja. Tarkastelun kohteena olivat lapsen arvioitu sanavarasto sekä kolmen pisimmän ilmaisun keskipituus. Lomakkeen sanavarastoa mittaava osa-alue kuvaa niiden sanojen lukumäärää, jonka lomakkeen täyttänyt vanhempi on arvioinut lapsensa käyttävän (Fenson ym., 1994). Arvio perustuu lomakkeen kattaviin sanaluetteloihin. Tämän tutkimuksen aineistossa

sanavaraston koko ilmoitettiin prosenttiosuutena sanavaraston kokonaispistemäärästä. Ilmaisun keskipituus laskettiin lapsen hiljattain tuottamien kolmen pisimmän ilmaisun perusteella (*maximum sentence length*, MSL). Näistä ilmaisuista laskettiin käytettyjen morfeemien kokonaismäärä ja jaettiin kolmella, jonka perusteella muodostettiin myös ylärajaindeksi (Lyytinen, 1999; Thal ym., 2007). Vaikka MSL eroaa yleisimmin käytetystä ilmaisun keskipituudesta (Brown, 1976), MSL:n ylärajaindeksi tarjoaa kuitenkin tietoa, joka on vertailukelpoista kielinäytteissä yleisimmin käytetyn MLU:n kanssa (Thal ym., 2007).

MCDI:stä on kaksi eri versiota, joista ensimmäinen on 8–16 kuukauden ikäisillä lapsille, ja siihen sisältyy ymmärretyt lauseet (28 kysymystä), sanaston ymmärtäminen ja tuottaminen (396 sanaa, jaoteltu 19 semanttiseen luokkaan) sekä teot ja eleet (63 kysymystä, jaoteltu 5 luokkaan) (Thal ym., 2007). Vanhempien lasten versio on tarkoitettu 16–30 kuukauden ikäisille lapsille, ja sen osa-alueita ovat tuottava sanavarasto, kieliopillinen monimutkaisuus ja esimerkit kolmesta pisimmästä lausumasta, jotka lapsi on hiljattain sanonut. Tuottavan sanaston osio on luettelo 680 sanasta, jotka on jaoteltu 22 eri semanttiseen kategoriaan. Kieliopillisen monimutkaisuuden osio sisältää 37 kohtaa, jotka ilmentävät morfologian käyttöä, toiminnallisia sanoja sekä varhain kehittyviä monimutkaisia lausemuotoja.

Useat tutkimukset ovat osoittaneet MCDI:n olevan luotettava ja pätevä mittari niin tyypillisesti kehittyville lapsille (esim. Heilmann ym., 2005) kuin lapsille, joilla on kielen kehityksen haasteita (esim. Miller ym., 1995; Thal ym., 1999). MCDI:n sanavarastopisteet ovat osoittaneet kohtalaista tai korkeaa korrelaatiota vertailukelpoisten standardoitujen sanavarastotestien pisteisiin (Thal ym., 2007). Lisäksi lauseen monimutkaisuutta sekä lauseen pituutta mittaavat osiot ovat osoittautuneet luotettaviksi korreloiden lasten kielinäytteistä saatujen tulosten kanssa.

3.3.2 Magneettikuvantamistutkimuksen aineiston kerääminen ja analysointi

Tutkittavat kuvattiin luonnollisen unen aikana vanhempien läsnä ollessa. Kuvantaminen suoritettiin Siemens Magnetom Verio T3 -skannerilla käyttäen 12-elementtistä Head Matrix -kelaa. Aineistoa kerättiin vastasyntyneiltä yhteensä neljän vuoden ajan (2011–2015). Kuvantaminen suoritettiin seuraavassa järjestyksessä: 1) aksiaalinen protonitiheys-T2 (PD-T2), 2) sagittaalinen T1-kuvauk (MPRAGE), 3) kenttäkartta, 4) DTI-kuvantaminen ja 5) tehtävä- ja lepotilan fMRI (vain viimeisenä vuonna). Koko kuvauksen kesto oli alle 60 minuuttia, ja kuvantaminen keskeytettiin, mikäli lapsi heräsi. DTI-data kerättiin käyttäen kaksinkertaisesti fokusoitua spin-echo–echo planar imaging (SE-

EPI) -sekvenssiä, ja kuvauksen asetukset olivat seuraavat: b-arvo 1000 s/mm², isotrooppinen resoluutio 2 × 2 × 2 mm³, kuvausala (*field of view*, FOV) 208 mm, 64 viipalekuvaa, toisto-aika (*repetition time*, TR) 8500 ms ja kaiku-aika (*echo time*, TE) 90 ms. Alkuperäisessä protokollassa oli mukana 96 diffuusiokoodattua suuntaa, mutta tässä tutkimuksessa käytettiin kuitenkin vain 20 diffuusiokoodattua suuntaa sisältävää DTI-dattaa. Tarkemmat tiedot kuvausprotokollasta löytyvät Merisaaren ja kumppaneiden (2019) tutkimuksesta.

DTI-kuvien käsittelyyn käytettiin AutoPtx-prosessorointiputkea, jonka avulla käsiteltiin ja rajattiin magneettikuvantamisen avulla otettuja aivokuvia. Tällä menetelmällä kuvista rajattiin esiin tietyt aivoradat, jonka jälkeen aivoradoilta laskettiin keskimääräiset arvot kiinnostuksen kohteena oleville (*region of interest*, ROI) radastoille. Tässä tutkimuksessa kiinnostuksen kohteena olivat SLF-, IFOF-, ILF- ja UF-radastoista molemmissa aivopuoliskoissa. Valitut radastot perustuvat AutoPtx-prosessoroinnin asetuksiin, ja kaikista radastoista valittiin kielellisesti relevantit radastot. Näistä saatiin niin kutsutut aivoperäiset tilastolliset mittarit, joita käytettiin tarkemmissa analyyseissä. Käsitelty data tarkastettiin visuaalisesti varmistaen, että kaikki radat olivat mukana, oikein sijoittuneet, eivätkä ulottuneet aivokuorelle tai harmaaseen aineeseen. Kaikkiaan 169 osallistujasta 152 läpäisi laaduntarkastuksen. Loput 17 suljettiin pois joko kuvista puuttuvan radaston, tai radan epäselvyyden, tai huonon jatkuvuuden vuoksi. DTI-kuvien analysoinnin tuloksena saatiin fraktionaalisen anisotropian (*fractional anisotropy*, FA), keskimääräisen diffuusion (*mean diffusivity*, MD) sekä radiaalisen diffuusion (*radial diffusivity*, RD) arvot. Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin FA-arvoja radastojen eheyden yhteenvetomittarina, sillä tavoitteena oli kuvata radastojen eheyttä mahdollisimman yksinkertaisesti tilastoanalyysissä. FA-arvoja tarkasteltiin tässä tutkimuksessa, sillä pyrittiin muodostamaan mahdollisimman yksinkertainen, mutta informatiivinen malli kuvaamaan radastojen eheyden ja kielellisten taitojen välistä suhdetta.

3.4 Tilastolliset analyysit

Aineistoa analysoitiin IBM SPSS Statistics-ohjelmiston versiolla 29 (IBM Corp., 2023). Sanavaraston sekä ilmaisun keskipituuden ennustamiseksi käytettiin monimuuttujaista lineaarista regressiomallia (*multiple linear regression*), jossa selitettävänä muuttujina olivat MCIDI-lomakkeella mitattu sanavarasto sekä kolmen pisimmän ilmaisun keskipituus ja selittävinä muuttujina valkean aineen radastojen eheyden FA-arvot. Aikaisempaan tutkimustietoon pohjautuen taustamuuttujiksi valikoituivat lapsen ikä vuorokausina kuvaushetkellä, äidin masentuneisuus- ja

ahdistuneisuusoireilua kuvaava jakomuuttuja, lapsen sukupuoli ja äidin koulutustaso. Selittävien sekä selitettävien muuttujien keskeiset tunnusluvut löytyvät Taulukosta 3.

Taulukko 3.

Selittävien sekä selitettävien muuttujien keskiarvot, keskihajonnat sekä vaihteluväli

Muuttuja n = 98	Keskiarvo (mediaani)*	Keskihajonta (kvartiiliväli)*	Vaihteluväli
MLU	8.56 (8.00)*	3.09 (3.75)*	4.00–21.33**
Sanavarasto %	76.06 (79.55)*	19.44 (26.22)*	3.08–100.00
FA IFOF vasen	0.244	0.020	0.195–0.295
FA IFOF oikea	0.248	0.017	0.214–0.279
FA ILF vasen	0.248	0.023	0.188–0.304
FA ILF oikea	0.250	0.019	0.212–0.294
FA SLF vasen	0.204	0.020	0.165–0.255
FA SLF oikea	0.197	0.019	0.158–0.245
FA UF vasen	0.207	0.016	0.174–0.253
FA UF oikea	0.206	0.017	0.164–0.242

*jakaumaltaan vinojen muuttujien kohdalla raportoitu lisäksi mediaani sekä kvartiiliväli

**poikkeava arvo, toiseksi suurin arvo oli 16.67

Muuttujien normaalisuutta tarkasteltiin Shapiro-Wilkin normaalisuustestauksella sekä visuaalisesti histogrammeista. Havaittiin, että taustamuuttujista ikä ei ollut normaalisti jakautunut $p = .016$, vaan jakauma oli oikealle vino, vinous 0.70. Myös kielimuuttujat poikkesivat normaalijakaumasta, ja sanavarasto oli vasemmalle vino $p < .001$, vinous -1.28, kun taas ilmaisun keskipituus oli oikealle vino $p < .001$, vinous 1.32. Sen sijaan valkean aineen radastomuuttujat olivat kaikki normaalisti jakautuneita, ($p > .05$). Keskeisen raja-arvolauseen mukaan otoskoon kasvaessa jakauma lähestyy normaalijakaumaa (Nummenmaa ym., 2017). Tässä otoksessa otoskoko oli riittävän suuri, eikä tästä syystä muuttujamuunnoksia katsottu tarpeellisiksi, vaan alkuperäisiä muuttujia käytettiin analyysien seuraavissa vaiheissa. Aineistossa havaittiin myös yksi poikkeava havaintoarvo muuttujasta, joka mittaa kolmen ilmaisun keskipituutta (21.33). Arvo päätettiin kuitenkin sisällyttää analyysiin, sillä

se saattaa kuvastaa luonnollista vaihtelua kielellisissä taidoissa, ja näin pyrittiin säilyttämään aineiston moninaisuus.

Ennen varsinaisen regressiomallin rakentamista tarkasteltiin taustamuuttujien mahdollisia yhteyksiä sanaston kokoon sekä ilmaisupituuteen. Taustamuuttujina käytettiin lapsen ikää kuvaushetkellä, sukupuolta, äidin koulutustasoa sekä äidin raskausajan masentuneisuus- tai ahdistuneisuusoireiden perusteella määriteltyä jakomuuttujaa (tapaus-, kontrolli- tai muu ryhmä). Taustamuuttujien yhteys selitettävien muuttujien arvoihin esitetään Taulukossa 4.

Taulukko 4.

Taustamuuttujien sekä selittävien muuttujien yhteys sanavarastoon ja ilmaisun keskipituuteen

	Sukupuoli		<i>p</i>	Ikä	<i>p</i>	Koulutustaso	<i>p</i>	Jakomuuttuja	<i>p</i>	
	Keskiarvo	Vertailu		Vertailu		Vertailu		Vertailu		
	Tyttö	Poika	<i>t</i> (96)	<i>r</i>	<i>F</i> (2,96)	<i>F</i> (2,95)				
MCDI MLU	8.84	8.30	-0.85	.397	.024	.817	1.41	.249	3.08	.050*
MCDI sanavarasto (%)	79.84	72.71	-1.84	.070	.073	.474	2.91	.059	5.31	.007**
IFOF vasen	.242	.245	0.75	.457	.32	.001**	2.03	.137	0.92	.404
IFOF oikea	.248	.248	0.02	.986	.21	.037*	0.97	.381	0.76	.473
ILF vasen	.249	.247	-0.42	.673	.28	.006**	0.32	.731	1.06	.352
ILF oikea	.250	.250	-0.02	.984	.26	.011*	0.48	.621	0.28	.757
SLF vasen	.204	.205	0.17	.869	.34	<.001**	0.80	.452	1.07	.348
SLF oikea	.197	.198	0.14	.888	.19	.060*	1.60	.208	0.59	.556
UF vasen	.207	.207	0.15	.879	.15	.130	0.43	.652	0.49	.614
UF oikea	.205	.207	0.58	.564	.31	.002**	0.91	.408	0.99	.375

p* ≤ .05, *p* < .001

Sukupuoli ja äidin koulutustaso eivät olleet yhteydessä kielimuuttujiin, joten ne jätettiin regressiomallin ulkopuolelle. Sen sijaan lapsen ikä oli yhteydessä lähes kaikkiin valittujen radastojen FA-arvoihin, ja lisäksi jakomuuttuja oli yhteydessä kielimuuttujiin. Näin ollen ikä ja jakomuuttuja lisättiin regressiomalliin selittäviksi muuttujiksi, sillä niiden yhteydet selitettäviin muuttujiin olivat selkeitä.

Regressiomallin hyödyntäminen edellyttää, että selittävien muuttujien ja selitettävien muuttujien välillä on oltava lineaarinen yhteys (Nummenmaa, 2021). Tämän vuoksi ennen mallin rakentamista tarkasteltiin siis aivoradastojen eheysarvojen sekä kielimuuttujien muuttujien välisiä korrelaatioita, jotta varmistettiin, että aivoradastojen eheydet voisivat selittää kielimuuttujien vaihtelua. Pearsonin korrelaatiokertoimia tarkasteltaessa havaittiin, että ainoa merkitsevä yhteys löytyi vasemman SLF:n sekä ilmaisupituuden väliltä. Muiden radastojen sekä kielimuuttujien välillä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä korrelaatioita, mutta selittävien ja selitettävien muuttujien väliset korrelaatiot olivat kuitenkin lineaarisia. Eheysarvojen ja kielimuuttujien väliset korrelaatiovertailut ovat esitetty Taulukossa 5.

Lisäksi tarkasteltiin aivoradastojen eheysarvojen keskinäisiä korrelaatioita, jotta voitiin havaita mahdollinen multikollineaarisuus ennen mallin luomista. Havaittiin, että kaikki aivoradastojen eheysarvot korreloivat voimakkaasti toistensa kanssa, mikä saattoi viitata multikollineaarisuuden esiintymiseen ja voi vaikuttaa regressiomallin luotettavuuteen. Ei kuitenkaan ole epätavallista, että aivoradastojen eheysarvot ovat voimakkaasti yhteydessä toisiinsa, sillä niiden katsotaan olevan samaa toiminnallista verkostoa, ja ne ovat yhteydessä toisiinsa sekä rakenteellisesti että toiminnallisesti (Dick ym., 2014). Valkean aineen radastokokonaisuuksien eheysarvojen keskinäisen korrelaatiot esitetään Taulukossa 5.

Taulukko 5

Valkean aineen radastokokonaisuuksien eheysarvojen (FA) ja kielimuuttujien väliset Pearsonin tulomomenttikorrelaatiokertoimet

	Sanavarasto %	MLU	IFOF vasen	IFOF oikea	ILF vasen	ILF oikea	SLF vasen	SLF oikea	UF vasen	UF oikea
IFOF vasen	-.03	-.13	1							
IFOF oikea	-.08	-.15	.74**	1						
ILF vasen	.04	-.03	.76**	.63**	1					

ILF	.04	-.02	.65**	.72**	.66**	1			
oikea									
SLF	.08	-.23*	.62**	.57**	.60**	.50**	1		
vasen									
SLF	.05	-.12	.60**	.62**	.55**	.50**	.71**	1	
oikea									
UF	-.06	-.08	.74**	.68**	.61**	.57**	.57**	.56**	1
vasen									
UF	-.09	-.10	.78**	.76**	.59**	.61**	.53**	.54**	.76**
oikea									

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

Valkean aineen radastojen eheyden yhteyttä sanaston kokoon ja kolmen ilmaisun keskipituuteen tutkittiin monimuuttujaisella lineaarisella regressioanalyysillä. Koska etukäteen ei voitu määrittellä, mitkä muuttujat voivat vaikuttaa kielimuuttujiin merkittävästi, käytettiin analyysiin taaksepäin askeltavaa poistomenetelmää. Mallin selittävinä muuttujina olivat IFOF-, ILF-, SLF- ja UF-radastot bilateraalisesti sekä kontrolloitavina muuttujina ikä, sekä äidin masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireiden perusteella määritelty jakomuuttuja. Näin ollen mallissa oli alun perin kymmenen selittävää muuttujaa.

Regressiomallissa käytettiin AIC-kriteeriä (*Akaike Information Criterion*) (Akaike, 1974), sillä tarkoituksena oli löytää aineistoon tarkimmin sopiva malli. AIC pyrkii tasapainottamaan mallin sovituksen datalle sekä sen yksinkertaisuuden (Akaike, 1974). Mallin valinnassa pienimmän AIC-arvon saanut malli katsotaan parhaaksi, sillä se tasapainottaa mallin tarkkuuden ja yksinkertaisuuden parhaimmalla tavalla. Mallin luominen aloitettiin kaikista potentiaalisista muuttujista, ja poistomenetelmän mukaisesti tilasto-ohjelman algoritmi poisti iteratiivisesti muuttujia, jotka eivät paranna merkittävästi mallin selitysväkyä (Nummenmaa, 2021). Tätä jatkettiin, kunnes jäljelle jäi malli, jolla on pienin AIC-arvo. Tämä jäljelle jäävä malli oli lopullinen tilastollisiin analyysihin mukaan otettava malli. Tässä poistoprosessissa tilasto-ohjelma siis pyrkii varmistamaan, että mallissa ovat mukana vain ne muuttujat, jotka lisäävät tilastollisesti merkittävästi mallin selitysväkyä (Nummenmaa, 2021).

4 TULOKSET

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, voidaanko valkean aineen kielellisesti merkityksellisten radastokokonaisuuksien eheyden avulla ennustaa kielellisiä taitoja varhaislapsuudessa. Kielellisiä taitoja arvioitiin vanhemman täyttämän MCDI-lomakkeen avulla, ja tarkastelun kohteena olivat lapsen sanavaraston koko sekä kolmen pisimmän ilmaisun keskipituus 30 kuukauden iässä. Valkean aineen radastokokonaisuuksien eheyttä arvioitiin laskemalla vastasyntyneiden magneettikuvantamisesta saaduista DTI-kuvista tutkimuksen kohteena olevien radastojen FA-arvot. Aivoradastojen kykyä ennustaa sanaston kokoa sekä ilmaisun keskipituutta analysoitiin monimuuttujaisella lineaarisella regressiomallilla ja tilastollisen merkitsevyyden raja-arvona pidettiin $p < .05$.

4.1 Valkean aineen radastojen eheyden yhteys sanavarastoon

Ensimmäinen tutkimuskysymys käsitteli sitä, voidaanko valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheydellä ennustaa lapsen sanavaraston kokoa 30 kuukauden ikäpisteessä. Radastojen eheyden yhteyttä sanaston kokoon selvitettiin lineaarisen regressiomallin avulla. Mallissa selittävinä tekijöinä olivat radastojen eheyttä kuvaavat FA-arvot. Malliin sisällytettiin kontrolloitaviksi muuttujiksi ikä kuvaushetkellä sekä äidin raskaudenaikaista masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilua kuvaava jakomuuttuja perustuen taustamuuttujavertailuissa havaittuihin yhteyksiin. Regressioanalyysissä muodostui yhteensä 10 mallia, joista ensimmäinen sisälsi kaikki potentiaaliset selittävät muuttujat. Se ei kuitenkaan ollut tyhjää mallia parempi, $F(10,87) = 1.54$, $p = .139$, eikä se selittänyt suurta vaihtelua aineistossa, korjattu $R^2 = .05$. Alkuperäinen, kaikki selittävät muuttujat sisältävä regressiomalli on esitetty liitteessä 1. Askeltavan poistomenetelmän jälkeen malleista seitsemän osoittautui paremmiksi kuin tyhjä malli, jossa ei ole yhtään selittävää tekijää. Parhaimpaan, ja siten viimeiseen malliin jäi selittäväksi muuttujaksi ainoastaan kontrolloitava jakomuuttuja, joka selitti sanaston koon vaihtelusta 7 %, korjattu $R^2 = .07$. Malli oli parempi kuin tyhjä malli, $F(1,96) = 9.08$, $p = .003$. Taulukossa 6 on parhaaksi osoittautunut regressiomalli.

Taulukko 6.

Jakomuuttujan yhteys lapsen sanavarastoon

	<i>B</i>	95 % <i>CI</i>	β	<i>p</i>	VIF
vakio	65.98	[58.36, 73.60]		< .001	

jakomuuttuja	0.14	[0.05, 0.23]	.29	.003*	1.00
--------------	------	--------------	-----	-------	------

* $p < .05$

Jakomuuttujan efektikoko oli lähellä keskikokoisen efektin (0.3) rajaa (Cohen, 1988). Selittävien muuttujien keskinäisen multikollineaarisuuden arvioimiseksi tarkasteltiin selittävien muuttujien varianssin inflaatiokerrointa (*variance inflation factor*, VIF), joka kertoo, kuinka moninkertaiseksi muuttujan keskivirheet kasvavat multikollineaarisuudesta johtuen (O'Brien, 2007). Vaikka aivoradastojen eheysarvot korreloivat voimakkaasti keskenään, tässä analyysissä multikollineaarisuus ei osoittautunut ongelmalliseksi VIF-arvojen ollessa pienempiä kuin viisi (Hair ym., 2011). Jäännöstermien sirontakuvion tarkastelu osoitti jäännöstermien jakautuvan jokseenkin epätasaisesti, mikä näyttäytyi selvinä kasaumina tiettyjen ennustettujen arvojen kohdalla. Tämä voi viitata mahdolliseen poikkeamaan mallin lineaarisuudessa.

4.2 Valkean aineen radastojen eheyden yhteys ilmaisupituuteen

Toisena tutkimuskysymyksenä oli, ennustavatko valkean aineen kielellisesti merkityksellisten dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheys ilmaisun keskipituutta 30 kuukauden iässä. Radastojen eheyden yhteyttä ilmaisupituuteen tarkasteltiin lineaarisen regressiomallin avulla. Mallin selittävät muuttajat olivat radastojen eheyden FA-arvot, ja lisäksi kontrolloitiin ikä kuvaushetkellä ja äidin raskaudenaikainen masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilu. Ensimmäinen malli, joka sisälsi kaikki muuttajat ei ollut parempi kuin tyhjä malli, $F(10,87) = 1.88, p = .058$ ja oli selitysasteeltaankin heikko, korjattu $R^2 = .08$. Tämä alkuperäinen regressiomalli on esitetty liitteessä 2.

Poistomenetelmän jälkeen malliin selittäviksi muuttujiksi jäivät vasemman SLF:n FA-arvot sekä jakomuuttuja. Malli, joka sisälsi nämä selittäjät, oli parempi kuin tyhjä malli, $F(2,95) = 5.88, p = .004$, vaikka se selittikin ilmaisupituuden varianssia heikosti, korjattu $R^2 = .09$. Kaikista selittäjistä vain vasemman SLF:n FA-arvot ja jakomuuttuja olivat yhteydessä ilmaisupituuteen. Näin ollen pidempää ilmaisupituutta ennustivat äidin vähäisempi raskaudenaikainen masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilu sekä vasemman SLF:n alhaisempi eheys. Tarkempi kuvaus näistä tuloksista esitetään Taulukossa 7.

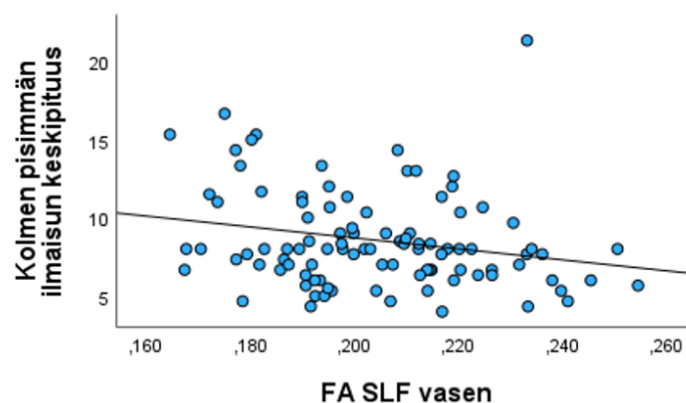
Taulukko 7.

Vasemman SLF:n eheyden ja jakomuuttujan yhteys lapsen ilmaisupituuteen

	<i>B</i>	95 % <i>CI</i>	β	<i>p</i>	VIF
vakio	15.48	[9.44, 21.53]		<.001	
SLF vasen	-40.40	[-70.14, -10.65]	-0.26	.008*	1.02
jakomuuttuja	0.02	[0.004, 0.03]	0.24	.015*	1.02

**p* < .05

Selittävien muuttujien efektikoot olivat lähellä kohtalaista (Cohen, 1988). Multikollineaarisuuden arvioitiin jälleen selittävien muuttujien varianssin inflaatiokerrointa (VIF) tarkastelemalla. Vaikka selittävien muuttujien välillä havaittiinkin voimakkaita korrelaatioita, VIF-arvot olivat alle viisi, mikä viittasi siihen, ettei multikollineaarisuus ollut ongelma (Hair ym., 2011). Jäännöstermien sirontakuviota tarkasteltaessa havaittiin, että jäännöstermit jakautuvat pääosin satunnaisesti. Vaikka kuviossa olikin havaittavissa lievää hajontaa jäännöstermien negatiivisilla arvoilla viitaten heteroskedastisuuteen, ei hajonta ollut kuitenkaan huomattavaa, ja jäännöstermit täyttivät satunnaisuuden olettamuksen pääpiirteittäin. Kuvassa 3 on esitetty vasemman SLF:n eheyden ilmaisupituuteen. SLF:n eheyden sekä äidin raskaudenaikaisen masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilun yhteydestä ei raportoitu kuvaajaa, sillä se ei olisi kovin havainnollistava tai toisi merkittävää lisäarvoa muuttujan ollessa kolmiluokkainen.



Kuva 3.

Vasemman SLF:n FA-arvojen yhteys kolmen pisimmän ilmaisun keskipituuteen morfeemeina 30 kuukauden iässä

5 POHDINTA

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena oli selvittää, ennustaako vastasyntyneen dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden eheys sanavaraston kokoa ja ilmaisun keskipituutta 30 kuukauden iässä, kun aikaisempien taustamuuttujavertailujen perusteella kontrolloitiin ikä kuvaushetkellä, sukupuoli, äidin koulutustaso sekä äidin masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilu raskauden aikana. Tutkielman aineisto oli peräisin FinnBrain-kohorttitutkimuksesta. Tutkittavat kuvattiin keskimäärin 26 päivän ikäisenä ja kielellisiä taitoja arvioitiin 30 kuukauden iässä vanhempien täyttämällä MCDI-lomakkeella. Koska aikaisempi tutkimus on osoittanut, että dorsaalisten ja ventraalisten radastojen eheämpi hienorakenne on yhteydessä parempiin kielellisiin taitoihin lapsuudessa, myös tässä tutkimuksessa odotettiin havaittavan samankaltainen yhteys. Tutkimuksia, jotka käsittelevät juuri näiden radastojen yhteyttä kielellisiin taitoihin aivan ensimmäisten elinvuosien aikana, on niukasti. Näin ollen tämä tutkimus täydentää olennaisesti kielellisten taitojen sekä niihin liittyvien neuraalisten prosessien kehittymistä käsittelevää tutkimuskenttää.

Tämän tutkimuksen tulosten mukaan dorsaalaisella reitillä vasemmassa aivopuoliskossa havaittiin yhteys lapsen ilmaisun keskipituuteen, mutta ei sanavaraston kokoon. Ventraalisella reitillä puolestaan ei havaittu olevan yhteyttä ilmaisun keskipituuteen eikä sanavarastoon. Dorsaalisessa reitissä havaittu yhteys oli negatiivinen, eli hypoteesin vastaisesti alhaisempi eheys ennusti keskimääräisesti pidempää ilmaisua.

5.1 Tulosten kuvaus ja arviointi

Dorsaalisesta reitistä tarkasteltiin SLF-radastoa, jonka eheyden FA-arvot olivat yhteydessä ilmaisupituuteen. Nämä havaitut yhteydet kuitenkin poikkesivat hypoteesista, sillä alhaisempi eheys vastasyntyneenä vasemmassa SLF:ssa ennustikin pidempää ilmaisupituutta 30 kuukauden iässä. Oikeassa aivopuoliskossa SLF-radasto ei ollut yhteydessä kielellisiin taitoihin. Ventraalisista radastoista tarkasteltiin IFOF-, ILF- ja UF-radastoja, mutta nämä ventraaliset radastot eivät ennustaneet sanavaraston kokoa tai ilmaisupituutta. Taustamuuttujista ikä kuvaushetkellä ei ennustanut kielellisiä taitoja. Sen sijaan sekä sanavaraston kokoa että ilmaisupituutta selitti aineistossa parhaiten äidin raskaudenaikaista masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilua kuvaava jakomuuttuja. Tulokset osoittivat, että äidin vähäisempi masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilu ennusti laajempaa sanastoa ja pidempää ilmaisupituutta. Tulokset eivät tukeneet asetettuja

hypoteeseja, joiden mukaan radastojen korkeammat FA-arvot syntymähetkellä ennustaisivat parempia kielellisiä taitoja myöhemmin. Aikaisemman tutkimustiedon perusteella ei ole yllättävää, että äidin vähäisempi masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilu heijastaa lapsen parempia kielellisiä taitoja (esim. Reck ym., 2018).

Tässä tutkimuksessa dorsaalista radastokokonaisuudesta vasemman SLF:n alhaisempi eheys ennusti pidempää ilmaisupituutta 30 kuukauden iässä. Tämä tulos on vastoin alkuperäistä hypoteesia, jonka mukaan eheampi valkean aineen hienorakenne ennustaisi parempia kielellisiä taitoja lapsuudessa. Aiemmin on havaittu, että lapsuuden aikana SLF:n eheampi rakenne on yhteydessä parempiin kielellisiin taitoihin (Liu ym., 2019). Vastaavasti lapsilla, joilla on kielellisiä vaikeuksia, kuten kehityksellinen kielihäiriö, on havaittu SLF-radaston alhaisempi eheys tyypillisesti kehittyviin kontrolleihin verrattuna (Verly ym., 2019). Toisaalta tämänkaltaisia ryhmäeroja ei ole havaittu osassa tutkimuksista (J. Kim ym., 2006). Vaikka tämän tutkimuksen tulosten perusteella SLF:n alhaisempi eheys ennusti pidempää ilmaisupituutta, on kuitenkin huomattava, että mallin selityssaste ei ollut kovin suuri. Malli, jossa radaston eheys ennusti ilmaisupituutta, selitti havaitusta vaihtelusta 9,1 %. Tuloksista oli havaittavissa heikohko negatiivinen yhteys SLF:n eheyden ja ilmaisupituuden välillä. Näihin tuloksiin tuleekin suhtautua suuntaa antavina, eikä mallia tule ylitulkita.

Ventraalisten radastojen eheysarvot eivät tässä tutkimuksessa ennustaneet sanavaraston kokoa tai ilmaisun keskipituutta. Toisaalta aiempi tutkimus ventraalisen radastokokonaisuuden eheydestä on tukenut eritoten radastojen eheyden merkittävyyttä lukemisen ja kirjoittamisen valmiuksissa (Gebauer ym., 2012; Vanderauwera ym., 2017; Vandermosten ym., 2015; Walton ym., 2018). Näitä taitoja onkin mitattu tyypillisesti vanhemmilta lapsilta, joten voi olla, että ventraalisten radastojen eheys ei tämän tutkimuksen pienillä vauvoilla vielä heijasta tämänkaltaisia parempia valmiuksia. Lisäksi ventraalisten radastojen ajatellaan liittyvän olennaisesti etenkin korkeampitasoiseen kielelliseen käsittelyyn (Hickok & Poeppel, 2007; Saur ym., 2008). Kielellisen tiedon käsittely tässä ikäpisteessä on vasta kehittymässä, eikä ventraalisen reitin kypsymisen vaikutus ole välttämättä havaittavissa näin varhain.

Dorsaalista radoista SLF:n päävaikutus havaittiin vasemmassa aivopuoliskossa. Efektikoon mukaan radaston vaikutus ilmaisupituuteen oli lähes keskisuuri. Oikeasta aivopuoliskosta ei havaittu merkitseviä tuloksia aivoradastojen eheyden osalta. On hyvä huomioida, että lapsilla kielellinen prosessointiverkosto on vasta kypsymissaiheessa, eikä ole niin spesifisti rajautunut kuin aikuisilla (Brauer ym., 2011). On siis mahdollista, että lasten kielellinen prosessointireitti tukeutuu

vaihtoehtoisiin reitteihin, jotka yhdistävät kielen käsittelystä vastaavia aivokuoren alueita, tai eri kielen prosessoinnin reitit ovat merkityksellisiä eri kielenkehityksen vaiheissa. Tämän vuoksi onkin tärkeää tarkastella molempien aivopuoliskojen osallisuutta kielen prosessoinnissa, etenkin varhaislapsuudessa, mikä huomioitiin myös tässä tutkimuksessa.

5.2 Hypoteesien toteutuminen

Odotusten mukaisesti SLF:n eheys ennusti kielellistä suoriutumista lapsuudessa, mutta hypoteesista poiketen yhteys oli negatiivinen. Vasemman SLF:n alhaisempi eheys ennusti pidempää ilmaisupituutta. Vastaavasti hypoteesi ei toteutunut ventraalisissa radastoissa, sillä merkitseviä yhteyksiä kieleen ei löytynyt. Näitä havaintoja voi selittää hidaskestoinen valkean aineen rakenteen kypsyminen. Myelinisaatio on pitkäkestoinen prosessi, joka etenee vaiheittain aina aikuisikään saakka, ja johon vaikuttavat olennaisesti oppiminen ja kokemukset ympäristöstä (Dubois ym., 2014). Etenkin varhaislapsuudessa aivojen ollessa hyvin muovautuvat oppiminen muokkaa niitä voimakkaasti. Vastaavasti aivojen muovautuvuus ja kehittyvät hermoyhteydet vaikuttavat kognitiivisten taitojen kehitykseen (O'Muirheartaigh ym., 2014). On mahdollista, että aivan ensimmäisinä ikävuosina aivojen muovautuessa voimakkaasti valkean aineen radastojen alhaisempi eheys ja sitä myöden hermoverkostojen vakiintumattomuus edesauttaa kielellisten taitojen omaksumista (Estrada ym., 2023; Girault ym., 2019), mikä selittäisi tämän tutkimuksen hypoteesin suunnasta poikkeavia tuloksia. Pitkittyneempi valkean aineen kehitys varhaislapsuudessa on yhdistetty parempiin kielellisiin (Estrada ym., 2023; Girault ym., 2019) sekä kognitiivisiin taitoihin (Deoni ym., 2016). Pitkäkestoisempi myelinisaatio voi heijastaa sellaista valkean aineen kehityskulkua, jossa hitaampi kypsyminen antaa aivoille enemmän aikaa sopeutua ympäristön ärsykkeisiin ja yhdistellä monimutkaisia hermoyhteyksiä, jotka ovat oleellisia kielellisessä prosessoinnissa. Tämä hitaampi kypsyminen voi siis johtaa suotuisampaan kielellisten taitojen kehittymiseen ensimmäisten elinvuosien aikana.

Hypoteesista poikkeavia tuloksia voivat myös selittää myelinisaation hierarkkinen ja epätasainen kypsyminen prosessi. Vaikka myelinisaatio on merkittävä prosessi valkean aineen kehittymisen ja tehokkaamman tiedonvälityksen kannalta, vaikuttavat myös muut tekijät, kuten solukalvojen lisääntyminen, aksonien koon muutokset ja kuitujen tiiviimpi järjestäytyminen diffuusiosignaalin muutoksiin (Dubois ym., 2014). Tämä vaikeuttaa valkean aineen kehityksen ja kognition yhteyden tarkkaa määrittelyä. Lapsuudessa ja nuoruudessa radastojen FA-arvojen epälineaariset kehityskulut osoittavatkin iän vaikuttavan rakenteiden kypsymiseen (Barnea-Goraly ym., 2005; Lebel & Beaulieu,

2011). Näin ollen lapsen varhaisen kehityksen aikana, jolloin aivot muovautuvat voimakkaasti, onkin vaikeaa luotettavasti määrittellä valkean aineen kehityksen ja kognition väliset mekanismit. Valkean aineen kypsymistä kuvaa hierarkkisesti etenevä kehitys, joka alkaa yksinkertaisempiin toimintoihin erikoistuneista alueista edeten kohti vaativampaan prosessointiin osallistuvia alueita (Lebel & Beaulieu, 2011; S. J. Lee ym., 2017; Uda ym., 2015; Yu ym., 2020). Tämä hierarkia voi mahdollistaa vaativampien kielellisten prosessien käsittelemisen. Toisaalta anisotropian eli vesimolekyylien hermoratojen suuntaisen liikkeen lisääntyminen ei riipu ainoastaan myeliinistä. Myeliini itsessään ei ole välttämätöntä anisotropian syntymiselle, vaan kuitujen järjestäytyminen tiiviimmiksi luo luonnollista anisotropiaa kudoksessa (Beaulieu, 2002). On siis mahdollista, että anisotropian arvoja on selittämässä osaltaan kudosten järjestäytymisiin liittyvä luonnollinen anisotropia aivoissa.

On huomionarvoista, että valkean aineen radastojen kehitys voi ennustaa kognitiivisia ja kielellisiä eri tavoin eri ikävaiheissa. On esimerkiksi havaittu, että valkean aineen radastojen kypsymättömämpi rakenne 1-vuotiaana liittyi parempiin kognitiivisiin taitoihin, mutta 2-vuotiailla vaikutus oli päinvastainen (S. J. Lee ym., 2017). Lisäksi kestoaltaan pidempi, mutta sitä myöden korkeampaan myeliinin kokonaismäärään johtava myelinisaatio on yhdistetty parempiin kognitiivisiin taitoihin lapsuudessa (Deoni ym., 2016). Kahden vuoden iässä myös demografisten tekijöiden, kuten sukupuolen tai äidin koulutustason vaikutuksen on todettu korostuvan enemmän kuin ensimmäisenä ikävuotena (Girault ym., 2019). Toisaalta varhaisia kognitiivisia ja kielellisiä toimintoja ja niiden kehittymistä on vaikeaa tutkia tarpeeksi kattavasti ensimmäisen ikävuoden aikana, jolloin taidot vasta alkavat kehittyä. Näistä seikoista huolimatta tässä tutkimuksessa kyettiin havaitsemaan merkitsevä yhteys neurobiologian ja kielellisten taitojen välillä. Tämän tutkimuksen tulokset ennen kaikkea vahvistavat käsitystä siitä, että ensimmäisten ikävuosien aikana tapahtuva neurobiologinen ja kognitiivinen kehitys on monimutkainen ja monitekijäinen prosessi, jossa esiintyy voimakasta vaihtelua. Aivojen kehitykseen liittyvät prosessit, kuten myelinisaatio, eivät siis ole lineaarisia, vaan ennen kaikkea kyseessä on dynaaminen sekä yksilöllinen prosessi.

5.3 Tulkintoja tulosten taustasyistä

Aivojen neurobiologisista prosesseista myös harmaan aineen kehittyminen saattaa vaikuttaa kielellisten taitojen omaksumiseen varhaislapsuudessa, sillä niillä on toisiaan tukevat tehtävät informaation prosessoinnissa: harmaa aine vastaa tiedonkäsittelystä ja valkea aine toimii tiedonvälittäjänä (Filley & Fields, 2016). Esimerkiksi lukemisen valmiuksiin 3,5-vuotiailla on yhdistetty valkean ja harmaan aineen aivorakenteiden yhteiskehitys (Manning ym., 2022).

Tämänkaltainen toiminnallisten verkostojen kehittyminen ja integroituminen todennäköisesti vaikuttavat kielellisten taitojen kehittymiseen.

Tässä tutkimuksessa äidin raskaudenaikaista masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilua kuvaava jakomuuttuja oli merkitsevä selittäjä kummassakin regressiomallissa. Äidin vähäisempi oireilu siis ennusti sekä laajempaa sanavaraston kokoa että pidempää ilmaisupituutta 30 kuukauden iässä. Äidin synnytystä edeltävästi koetun ahdistuneisuuden, masentuneisuuden ja elämänmuutoksiin tai arkipäiväisiin asioihin liittyvän stressin on todettu vaikuttavan esimerkiksi lapsen behavioraaliseen ja emotionaaliseen kehitykseen (Korja ym., 2017; O'Donnell ym., 2014). Masennus- ja ahdistusoireet vaikuttavat äidin ja lapsen vuorovaikutussuhteen muodostumiseen. Raskaudenaikainen masennus vaikeuttaa äitiä luomaan sidettä syntymättömään lapseen sekä vaikuttaa kiintymyssuhteen muodostumiseen (Dubber ym., 2015). On havaittu, että lapsen kognitiiviseen kehitykseen vaikuttaa enemmän äidin raskaudenaikainen stressi kuin synnytyksen jälkeiset stressioireet tai muut sekoittavat tekijät (Lin ym., 2017). Lisäksi ahdistuneisuusoireilu on yhdistetty lapsen kielenkehitykseen. Pikkulapsilla, joiden äidit kokivat ahdistuneisuutta raskauden aikana, oli heikommat kielelliset taidot verrokkeihin nähden (Reck ym., 2018). Äidin ahdistuneisuus sekä äidin ja vauvan välinen vuorovaikutus ennustivat vahvimmin vauvan kielen kehitystä Reckin ja kumppaneiden tutkimuksessa (2018), ja vastaavasti äidin välttelevällä käyttäytymisellä oli yhteys kielellisiin taitoihin. Kieli opitaan vuorovaikutuksessa, joten on oletettavaa, että ahdistuneisuus- ja masennusoireet heijastuvat äidin ja lapsen väliseen suhteeseen ja sitä myöden kielellisten taitojen kehitykseen. Voi olla, että äidit, joilla on vähemmän raskaudenaikaisia ahdistuneisuus- ja masennusoireita pystyvät tukemaan lapsen kielen kehittymistä optimaalisemmin kuin ne, joilla oireilua esiintyy enemmän.

On kuitenkin huomioitava, etteivät masennuksen ja ahdistuneisuuden vaikutukset lapsen kehitykseen ole yksiselitteisiä, ja niiden itsenäisten vaikutusten osoittaminen on haastavaa (Kingston ym., 2015). Yksilölliset ja ympäristöön liittyvät tekijät todennäköisesti vaikuttavat synnytystä edeltävän oireilun ja lapsen kehityksen väliseen vuorovaikutukseen (Korja ym., 2017). Esimerkiksi koulutustaso, päihteiden käyttö ja lapsen syntymäpaino ovat tunnistettuja lapsen kehitykseen vaikuttavia seikkoja, jotka saattavat vaikeuttaa ahdistuneisuuden ja masentuneisuuden itsenäisen vaikutuksen osoittamista.

Vaikka tässä tutkimuksessa masentuneisuus- ja ahdistuneisuusoireilu oli merkitsevä selittäjä, oli sekä sanavaraston kokoa että ilmaisupituutta ennustavien mallien selityksasteet heikohkot. Näin ollen tulosten perusteella ei voida yksiselitteisesti todeta raskauden aikana koetun ahdistuneisuuden ja masentuneisuuden selittävän suoraviivaisesti lapsen kielellistä kehitystä ensimmäisten ikävuosien

aikana. Tulokset tukevat ajatusta lapsen kielellisen kehityksen moniulotteisuudesta, jossa useat tekijät ja syy-seuraussuhteet ovat kehityksen taustalla. Näin ollen on haastavaa osoittaa suoria syy-seuraussuhteita niin psyykkisten, ympäristöllisten kuin neurobiologistenkin tekijöiden suhteen. Yhden itsenäisen vaikutuksen osoittaminen laajasta vuorovaikutusten verkostosta onkin haaste, joka tulee huomioida tulevaisuuden tutkimuksissa. Pitkittäistutkimusten lisäksi tarvitaan myös metodologisesti yhtenäisempiä tutkimuksia, jotta yksittäiset kieleen ja kehitykseen vaikuttavat tekijät voitaisiin tunnistaa luotettavasti.

On myös huomioitava, että tutkimuksen otoksessa on enemmän korkeasti kuin matalasti koulutettuja äitejä. Matalasti koulutettuja oli otoksessa 23 ja loppuilla (75) oli joko alempi tai ylempi korkeakoulututkinto. Voi olla, että tutkimukseen osallistui enemmän tutkimusmyönteisiä ja aktiivisia vanhempia, joilla voi olla enemmän tietoa vanhemmuudesta ja taitoa tukea lapsen vuorovaikutusta. Vastaavasti äidit, joilla on vähemmän resursseja osallistua sitoutumista vaativaan tutkimukseen, ovat voineet jäädä otoksesta pois. Lisäksi varhaislapsuuden sanaston kehitys saattaa heijastaa enemmän perheympäristöä sekä vanhemman ja lapsen välistä vuorovaikutusta kotona, kun taas peruskoulun alkamisen jälkeen se saattaa heijastaa enemmän lapsen omia aloitteita kielen oppimisessa (Su ym., 2018). Nämä seikat voivat vaikuttaa osaltaan tuloksiin ja näin ollen täyttää varmuutta otoksen edustavuudesta on hankala arvioida. Vastaavasti tutkimustulosten yleistettävyyys ei ole yksiselitteistä, vaikka tulokset ovat päteviä tässä otoksessa. Epävarmaa kuitenkin on, voidaanko tuloksia yleistää koskemaan niitä, joilla on selkeitä kielenkehityksen riskitekijöitä.

5.4 Tutkimuksen vahvuudet ja rajoitukset

Tämän tutkimuksen vahvuutena on se, että aineisto on peräisin monitieteisestä ja neurologiseen kehitykseen keskittyvästä tutkimusprojektista. FinnBrain-kohortti on kattava ja kerätty laajalta alueelta, ja sisäänotto- ja poissulkukriteerit ovat tarkasti määritelty (Karlsson ym., 2018). Aineiston suhteellisen suuri otoskoko ja tutkimuksen pitkittäisasetelma mahdollistavat lasten kehityksen tutkimisen useassa ikävaiheessa. Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu samojen tutkittavien dataa muutaman viikon sekä 30 kuukauden ikäisenä.

Tämänkaltaiset pitkittäistutkimukset aivokuvantamisen kentällä näinkin suurella otoskoolla ovat harvinaisia, joten tämä tutkimus täydentää olennaisesti vielä suhteellisen alkuvaiheessa olevaa kenttää, etenkin kielellisen kehityksen osalta. Lähes sadan tutkittavan otoskoko suomalaisessa kielenkehityksen tutkimuksessa ja erityisesti aivokuvantamistutkimuksessa on merkittävä. Sen lisäksi

usea aiempi tutkimus on keskittynyt valkean aineen ja kognitiivisen kehityksen välisiin yhteyksiin, ja etenkin dorsaaliseen ja ventraaliseen radastoon ja niiden merkityksestä varhaisvaiheen kielenkehitykseen on tehty vähän tutkimusta. Aiemmissa kielenkehityksen ja valkean aineen radastojen eheyden tutkimuksissa tutkittavien ikähajonta on ollut suhteellisen suurta, kun taas tässä tutkimuksessa tutkittavat ovat samanikäisiä. Tämä mahdollistaa tulosten keskinäisen vertailukelpoisuuden sekä keskittymisen yhden tietyn kehitysvaiheen ja aivorakenteen yhteyteen ilman, että tulosten tulkintaan on vaikuttanut kuukausien tai vuosien ikäerot tutkittavien välillä. Lisäksi sisäisen validiteetin parantamiseksi tutkimuksessa pyrittiin kontrolloimaan taustamuuttujien vaikutus kielelliseen kehitykseen. Tämä on erityisen tärkeää tutkittavien ollessa samanikäisiä, sillä taustamuuttujat voivat vaikuttaa kielelliseen kehitykseen eri tavoin iän mukaan. Tutkimuksen vahvuutena on myös se, ettei tutkittavien välillä tehty minkäänlaista ryhmävertailua. Näin kyettiin tarkastelemaan nimenomaan neurobiologian vaikutusta kielenkehitykseen koko otoksessa samoilla tutkittavilla.

Kattava kielellinen arviointimenetelmä on tutkimuksen eräs vahvuuksista. Kielellisiä taitoja on tässä tutkimuksessa arvioitu lapsen luonnollisessa ympäristössä, jossa kielenkäyttötilanteet kuvastavat paremmin kielenkehitystä, kuin yksittäiset melko keinotekoiset tutkimustilanteet (Fenson ym., 1994). Viralliset testaustilanteet voivat myös olla lapsen kannalta jännittäviä tai epämukavia, minkä vuoksi tilanteissa ei välttämättä saada esiin lapsen todellista taitotasoa. Lapsen kielenkehitys ja erityisesti sanaston kasvu etenevät nopeasti tässä ikäpisteessä, joten vanhempien raportoimat havainnot kuvaavat lapsen viimeisintä kielellistä taitotasoa jokapäiväisessä ympäristössä. Toisaalta on mahdollista, että vanhemmat yli- tai aliarvioivat lapsen kielitaitoa, ja esimerkiksi vanhempien keskinäiset tulkintaerot voivat rajoittaa lapsen käyttämien sanojen tunnistamista. Kuitenkin MCDI:n on todettu olevan luotettava reliabeeli ja validi arviointimenetelmä (Fenson ym., 1994). Suomenkieliset lomakkeet ovat luotettavia ja tarjoavat vastaavaa tietoa kuin ammattilaisten käyttöön suunnatut menetelmät ja lapsen spontaanista puheesta tehdyt analyysit (Lyytinen, 1999). Suomenkielisessä aineistossa MCDI:n erottelukyky oli parhaimmillaan kahden ikävuoden molemmin puolin. Erityisesti 16–30 kuukauden ikäisten lomakkeen sanalistat ovat kattavampia kuin monet muut strukturoidut testit, eikä monissa testaustilanteissa olisi mahdollista kartoittaa lapsen sanastoa näin laajasti (Fenson ym., 1994). Vaikka tämän ikäpisteen lomake sisältääkin 680 sanaa, voidaan nopeasti kehittyvien lasten kohdalla havaita kattovaikutus, sillä noin 25–30 % lapsista omaksuu enemmän sanoja 30 kuukauden ikään mennessä.

Vanhempien raportoimien kolmen pisimmän ilmaisun pituuden arvioiden on havaittu korreloivan vahvasti todellisten MLU-mittausten kanssa, mikä on merkki yhteneväisyydestä erityisesti lauseiden monimutkaisuuden arvioinnissa (Lyytinen, 1999). Kuitenkin MCDI:n ilmaisupituuden arviointiin liittyy rajoituksia yksittäisten lasten kohdalla, sillä mittaus perustuu ryhmien keskiarvoihin. Se soveltuu siis erityisen hyvin ryhmävertailuihin ja antaa arvokasta tietoa kielenkehityksestä yleisesti, vaikkei se välttämättä ole soveltuvin yksittäisten lasten tarkkaan arviointiin. Kuitenkin MCDI:llä on korkea sisäinen johdonmukaisuus eli eri osa-alueet mittaavat samaa ilmiötä johdonmukaisesti ja tukevat näin ollen toisiaan. Kaiken kaikkiaan MCDI on tehokas ja luotettava mittari lapsen kielellisten taitojen arviointiin sekä yleisesti että yksityiskohtaisesti (Lyytinen, 1999). Varhaisessa vaiheessa lapsi oppii kielellisiä muotoja muutama kerrallaan. Koska tämänkaltainen hienovarainen kehitys voi jäädä huomaamatta yksittäisissä testitilanteissa, on MCDI-lomake hyödyllinen juuri varhaisen kielenkehityksen yksityiskohtaiseen tarkasteluun (Thal ym., 2007).

Tutkimuksen rajoitukset liittyvät osittain tilastollisiin haasteisiin. Taustamuuttujat sekä kielimuuttujat eivät olleet normaalisti jakautuneita, mutta tästä huolimatta esimerkiksi muuttujamuunnoksia ei tehty. Keskeisen raja-arvolauseen mukaan parametrisia testejä voidaan tehdä aineistolla, joka ei ole normaalisti jakautunut, mikäli otoskoko on riittävän suuri (Kwak & Kim, 2017). Keskeinen raja-arvolause osoittaa, että vaikka alkuperäisen aineiston jakauma olisi vinoutunut tai muuten poikkeava, otoskoon kasvaessa otoskeskiarvojen jakauma alkaa lähestyä normaalijakaumaa. Jo otoskoolla 30 otoskeskiarvojen jakauma on huomattavan lähellä normaalijakaumaa, ja jo 50 otoskeskiarvon jakauma muistuttaa enemmän normaalijakaumaa kuin otoksen alkuperäistä jakaumaa (Nummenmaa, 2021). Normaalijakaumaa voidaan käyttää mallina populaation keskiarvoja koskevassa päättelyssä, jos otoskoko on suurempi kuin 30. Tämän tutkimuksen aineiston koko ($n = 98$) ylitti selvästi tämän rajan ja oli siten riittävän suuri keskeiseen raja-arvolauseeseen tukeutumista varten.

Regressioanalyysin osalta esitetään, että usean selittäjän mallissa aineiston koon tulisi olla vähintään 100, jotta regressiomallin tuloksia voitaisiin yleistää luotettavasti muihin vastaaviin aineistoihin (Nummenmaa, 2021). Vaikka tämän tutkimuksen aineiston koko jäi juuri ja juuri tästä suosituksesta, on 98 havaintoarvoa kuitenkin hyvin lähellä riittävää otoskokoa. Lisäksi regressiomallin tiedetään toimivan melko hyvin myös pienemmillä aineistoilla, kunhan muut oletukset, kuten riippumattomuus, lineaarisuus ja homoskedastisuus, täyttyvät. Parametriset testit tuottavat tarkempia ja täsmällisempiä estimaatteja sekä suuremman tilastollisen tehon kuin ei-parametriset testit (Nummenmaa, 2021). Tämä on erityisen tärkeää, kun pyritään tekemään johtopäätöksiä otoksesta populaatioon, vaikka alkuperäisen aineiston jakauma ei täyttäisikään normalisuuden oletusta. Koska

tämän tutkimuksen otoskoko on lähes 100, ja keskeisen raja-arvolauseen mukaan otoskeskiarvojen jakauma on normaalijakautunut riittävän suurilla otoksilla, parametriin testeihin perustuva analyysi on tässä tapauksessa perusteltua.

Ennustettaessa sanavarastoa sekä ilmaisupituutta regressiomallit selittivät näiden vaihtelua hieman alle 10 prosenttia. Cohenin (1988) mukaan nämä selityksasteet ovat pienen ja keskisuuren efektin välillä, mutta nämä raja-arvot ovat kuitenkin saaneet myöhemmin kritiikkiä. Cohenin suuntaa antavia raja-arvoja voidaan pitää tilastollisissa analyyseissä vakiintuneina efektin estimaatteina, mutta niitä on kritisoitu mielivaltaisuudesta ja epäjohdonmukaisuudesta (Correll ym., 2020). Raja-arvot saattavat siis olla liian yleistäviä ja voivat johtaa merkittävien mutta matalien selityksasteiden vähättelyyn. Tässä tutkimuksessa ilmenneet pienet tai kohtalaiset selityksasteet voivat siis olla kuitenkin tärkeitä käytännön merkityksen kannalta.

DTI-kuvantamiseen liittyy niin vahvuuksia kuin heikkouksiakin. DTI-kuvantaminen on viimeisimpien vuosien aikana vakiinnuttanut asemansa aivotutkimuksen kentällä, ja menetelmää hyödyntämällä on saatu arvokasta tietoa neuraalisten prosessien ja kognitiivisen kehityksen välisestä vuorovaikutuksesta. Tärkeä DTI:n sovellus onkin aivojen eri osien välisten anatomisten yhteyksien visualisointi (Assaf & Pasternak, 2008). DTI-kuvantaminen on objektiivinen menetelmä mitata aivojen rakenteissa ilmenevää vaihtelua, ja parhaimmillaan se täydentää kielellisiä ja kognitiivisia arviointimenetelmiä. Kuvantamistutkimukset tuovat kielellisten taitojen tarkasteluun mukaan neurobiologisen näkökulman, joka valottaa kielen kehityksen taustalla vaikuttavia neuraalisia ilmiöitä ja näin ollen laajentaa käsitystä kielen kehitykseen vaikuttavista tekijöistä.

Vaikka diffuusiokuvantaminen on toistaiseksi ainoa ei-invasiivinen menetelmä valkean aineen kuitujen tarkastelemisessa, voivat useat tekijät vaikuttaa diffuusiomittauksiin ja niiden luotettavuuteen. Esimerkiksi solurakenteet ja kudoksen ominaisuudet, kuten diffuusion rajoittuneisuus, solukalvojen läpäisevyys, kudosten epäyhtenäisyys ja anisotropian vaihtelevuus voivat vaikeuttaa DTI-tulosten tulkitsemista (Assaf & Pasternak, 2008). Lisäksi DTI-datan analysointitapoihin liittyy omanlaiset virhelähteensä ja niiden perusteella tulokset voivat poiketa toisistaan, vaikka analyysit olisivatkin tehty asianmukaisesti (Valanne & Brander, 2013). DTI on myös altis erilaisille kuvantamiseen ja datan käsittelyyn liittyville teknisille haasteille, kuten kuvien vääristymille, suuntatiedon epätarkkuudelle ja kohinalle (Jones & Cercignani, 2010). Diffuusiomittausten avulla saadaan siis arvokasta tietoa aivoradastojen eheydestä ja järjestäytyneisyydestä, mutta tulosten tulkinnassa on noudatettava erityistä huolellisuutta luotettavien

johtopäätösten saavuttamiseksi. Eräs haaste muutaman viikon ikäisiä vauvoja kuvatessa on myös se, että vaikka kuvaus suoritettaisiin vauvan nukkuessa, vauvat liikkuvat myös rauhallisen unen aikana. Näin ollen pään liike kuvantamisen aikana voi osaltaan vääristää DTI-parametreja (Merisaari ym., 2019). Toisaalta Merisaaren ja kumppaneiden (2019) vastasyntyneiden aivokuvantamista käsittelevässä työssä toteutettiin test-restest-protokolla, jonka mukaan valkean aineen mittaukset olivat luotettavia sekä yksittäisissä vokseleissa (pikselin kolmiulotteinen vastine) että useimmissa ROI:ssa, eikä esimerkiksi liike kuvantamisen aikana vaikuttanut merkittävästi lopputulokseen.

Tutkimuksen rajoituksia liittyy myös DTI-parametreihin, sillä radastojen eheyttä tarkasteltiin ainoastaan FA-arvojen avulla. FA toimii hyvin radastojen eheyden yhteenvetomittarina, sillä sen on todettu olevan herkkä hienorakenteen eheyden muutoksille, mutta sen rinnalla olisi hyödyllistä tarkastella myös muita DTI-parametreja (Alexander ym., 2011). AD tarkoittaa aksonaalista eheyttä, RD arvioi myelinisaation tilaa ja MD ja ADC kuvaavat diffuusion voimakkuutta ilman suuntatietoa (Larvie & Fischl, 2016). Yhdessä nämä parametrit tarjoavat siis kattavamman kuvan hermokuitujen hienorakenteen eheydestä ja järjestäytyneisyydestä kuin yksittäisen diffuusioparametrin tarkastelu. Esimerkiksi vertailtaessa kielihäiriöryhmää verrokkeihin kielellisten taitojen vaihtelua heijasta AF-radastossa MD- ja RD- arvot, kun taas yhteyttä kielellisissä arviointimenetelmissä suoriutumisen ja FA-arvojen välillä yhteyttä ei todettu (Roberts ym., 2014). Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli muodostaa mahdollisimman yksinkertaiset regressiomallit, joten radastojen eheyttä tarkasteltiin vain FA-arvojen avulla, sillä usean eri eheyden mittarin sisällyttäminen malleihin olisi voinut paisuttaa sitä liian suureksi ja siten kasvattaa virheriskiä. FA-arvojen tulkintaan liittyy kuitenkin epävarmuutta etenkin varhaiskehityksen aikana. FA-arvot kasvavat ennen varsinaista myelinisaatiota sekä sen aikana, mutta ristikkäisten kuitujen myelinisaatio voi ilmetä FA-arvojen laskuna kuitujen risteyskohdassa (Dubois ym., 2014). Sitä vastoin RD-arvot vähenevät johdonmukaisesti valkean aineen eri kehitysvaiheissa ja on näin ollen melko vahva kypsymisen mittari erityisesti varhaisessa ikävaiheessa (Dubois ym., 2014).

Näin ollen on mahdollista, että ainoastaan FA-arvoja tarkastelemalla ei kyetä toteamaan radastojen eheyden ja kielellisten taitojen välisiä yhteyksiä, vaikka niitä todellisuudessa olisikin. Valkean aineen ja kielellisen kehityksen välisiä suhteita ensimmäisinä elinvuosina voisi siis valottaa myös muiden eheyden parametrien tarkastelu. Toisaalta on huomionarvoista, että aikaisemmassa tutkimuksessa valkean aineen parametrit ovat liitetty kognitiivisiin kykyihin, mutta nämä yhteydet heikkenivät merkittävästi, kun demografiset muuttujat huomioitiin (Girault ym., 2019). Tämä ei tarkoita sitä, etteikö hermostollisilla prosesseilla olisi vaikutusta lapsen kielelliseen ja kognitiiviseen kehitykseen,

vaan ennemminkin korostaa kehitysprosessien monitekijäisyyttä. Esimerkiksi Giraultin ja kumppaneiden tutkimuksessa (2019) lapsen kognitiivisiin taitoihin kahden vuoden iässä vaikuttivat enemmän muun muassa sukupuoli, äidin koulutustaso ja kuvantamiseen liittyvät tekniset seikat, kuin valkean aineen eheys, vaikka merkittäviä yhteyksiä radastojen ja kognitiivisten kykyjen välillä havaittiinkin.

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin radastojen eheyttä kokonaisuutena, mutta eheyden ominaisarvoja radastojen yksittäisissä segmenteissä ei huomioitu. Tulosten perusteella dorsaalisten ja ventraalisten radastojen korkeammat FA-arvot eivät ennustaneet parempia kielellisiä taitoja kahden ja puolen vuoden iässä. Lisäksi tässä tutkimuksessa dorsaalista radoista, joiden tiedetään olevan merkittäviä kielellisessä prosessoinnissa, tarkasteltiin ainoastaan SLF-radastoa. Kuitenkin aiemmassa tutkimuksessa, jossa vastaavasti suoritettiin aivokuvantaminen 5–58 päivän ikäisillä lapsilla ja kielellisiä taitoja arvioitiin MCDI-lomakkeella, havaittiin AF:n päälakilohkon segmentin korkeampien FA-arvojen olevan yhteydessä parempiin kielellisiin taitoihin 12 kuukauden iässä (Sket ym., 2019). AF:n eheämpi hienorakenne on yhdistetty laajasti parempiin taitoihin myös muilla kielen osa-alueilla ja monessa eri ikäpisteessä (esim. Broce ym., 2015; Langer ym., 2017; Liu ym., 2019; Vandermosten ym., 2012; Vydrova ym., 2015; Yeatman ym., 2011; Zuk ym., 2021). Näin ollen AF:n sisällyttäminen mukaan tähän tutkimukseen sekä mahdollisesti radastojen rakenteiden tarkempi tarkastelu olisi voinut olla perusteltua. Toisaalta tulee huomioida, että AF-radastoa käytetään usein tutkimuskentällä synonyyminä SLF-radastolle, sillä sen katsotaan joissain tutkimuksissa sisältyvän SLF-radaston rakenteeseen (Dick ym., 2014). Voi olla, että radastojen eheyden tarkastelu kokonaisuutena jättää huomioimatta radastojen eri kohdista saatavaa informaatiota, ja jatkotutkimuksissa olisikin hyödyllistä tarkastella näitä radastoja mahdollisesti erikseen. Toisaalta tässä tutkimuksessa määriteltiin radastojen eheys kokonaisuudessaan käyttäen FA-arvoja, jotka ovat vahvoja kuvaamaan kuitujen järjestäytymistä, tiivyyttä ja rakennetta (Dubois ym., 2014), mikä osaltaan tarjoaa arvokasta tietoa radastojen eheyden kokonaiskuvasta hyvin varhaisessa vaiheessa.

Tutkimuksen tulosten yleistämistä hankaloittaa myös taustamuuttujien vaikutusten tulkinta. Lapsen sanaston varhaisen kehityksen yksilölliseen vaihteluun vaikuttavat aivojen rakenteelliset ja toiminnalliset ominaisuudet sekä moninaiset ympäristötekijät. Ympäristötekijöihin kuuluvat lapsen lähiympäristössä olevat tekijät, kuten perheen vuorovaikutus ja vanhempien kielelliset taidot, sekä kauempana lapsesta olevat tekijät, kuten yhteiskunnalliset ja kulttuuriset tekijät, kuten sosioekonominen asema (Bornstein ym., 1998). Kieli siis kehittyy monimutkaisessa vuorovaikutuksessa ympäristön sekä biologisten tekijöiden kanssa, ja läheisten ja

ympäristötekijöiden sekä biologisten seikkojen yhteisvaikutus auttaa ymmärtämään, miksi lasten sanaston kehittämisessä nähdään yksilöllisiä eroja jo varhain (Bornstein ym., 1998). Ympäristötekijöillä voi olla myös epäsuora vaikutus kielenkehitykseen, ja vaikka tässä tutkimuksessa pyrittiin kontrolloimaan kielenkehitykseen mahdollisesti liittyviä taustamuuttujia, kuten äidin koulutustasoa, voi todellisuudessa niiden vaikutus välittyä monimutkaisempien mekanismien kautta.

Lisäksi huomionarvoista on, että tässä tutkimuksessa aikaväli aivokuvantamisen ja kielellisten taitojen arvion välillä on melko pitkä. Aivokuvantaminen on tehty tutkittavien ollessa noin kuukauden ikäisiä ja kielellisiä taitoja on arvioitu 30 kuukauden iässä. Tämä osaltaan tekee tulosten tulkinnasta haasteellista, sillä varhaiskehityksessä sekä hermostollinen että kognitiivinen kehitys on voimakasta. Lisäksi ympäristö muokkaa lapsen kehityskulkua. Toisaalta tässä tutkimuksessa varhaisen aivokuvantamisen perusteella ympäristön vaikutus valkean aineen radastojen kehitykseen on saatu rajattua verrattuna siihen, että kuvantaminen olisi suoritettu tutkittavien ollessa vanhempia. Näin ollen yksilöiden väliset neurobiologiset erot pian syntymän jälkeen on saatu huomioitua. Myös kielellisten taitojen ja siinä esiintyvän variaation mittaaminen yksilöiden välillä aikaisemmassa ikävaiheessa luotettavasti on haasteellista. Tässä tutkimuksessa kielellisten taitojen arvioinnissa 30 kuukauden ikäpisteessä oli saatavilla sekä sanavaraston koko että ilmaisupituus, jotka yhdessä mahdollisesti antavat kattavamman kuvan lasten kielenkehityksestä verrattuna esimerkiksi MCDI:n 14 kuukauden ikäpisteen lomakkeeseen, jossa arvio perustuu pääosin vain sanavaraston kokoon.

On mahdollista, että lapsen kielellinen ympäristö on voinut selittää kielellisten taitojen vaihtelua. Tutkimukset ovat osoittaneet, että sekä kodin että päiväkodin tarjoama kielellinen ympäristö ja vuorovaikutustyyli ovat merkittäviä lapsen kielellisten taitojen kannalta (esim. Landry ym., 2002; Pinto ym., 2013). Kielellinen ympäristö vaikuttaa siis kielellisiin taitoihin ja sitä kautta muovaa myös aivoja. Tämän tutkimuksen tulokset voivat viitata siihen, että aivot muovautuvat voimakkaasti kielellisten taitojen omaksumisen yhteydessä. Kielellisten taitojen kehitystä voidaankin ymmärtää paremmin, kun huomioidaan sekä biologiset että kontekstuaaliset tekijät, jotka yhdessä muodostavat kielen yksilölliset kehityspotit.

5.5 Johtopäätökset ja jatkotutkimus

Tämä pro gradu -tutkielma tukee kielenkehityksen neuraalisten taustatekijöiden ymmärtämistä. Tässä tutkielmassa tarkasteltiin, voidaanko aivojen kielellisesti merkityksellisten valkean aineen dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien eheyden perusteella ennustaa kielellisiä taitoja 30 kuukauden iässä, ja tulosten perusteella vasemman SLF:n alhaisempi eheys ennusti pidempää ilmaisupituutta ja radaston vaikutus oli lähes keskisuuri. Toisaalta sanavaraston sekä tutkittujen aivoradastojen välillä ei havaittu yhteyttä. Tutkimuksen tulokset aivojen radastojen eheydestä ensimmäisten elinviikkojen aikana sekä niiden yhteydestä kielellisiin taitoihin myöhemmässä ikävaiheessa ovat arvokkaita kielen kehityskulun hahmottamisessa. Tutkimus luo pohjaa seuraaville kielenkehityksen ja dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden suhteita käsitteleville tutkimuksille. Tämänkaltaiset tutkimukset auttavat hahmottamaan tyypillistä kielellistä kehityskulkua sekä sen poikkeavuuksia henkilöillä, joilla on kielellisiä vaikeuksia (Barnea-Goraly ym., 2005).

On tärkeää huomioida, että FA-arvojen kasvu voi johtua myös neuroniyhteyksien järjestäytymisestä sekä radastojen suunnan yhtenäistymisestä, eikä ainoastaan rakenteellisista muutoksista, kuten myeliinin lisääntymisestä (Barnea-Goraly ym., 2005). Jatkotutkimuksissa olisi tarpeellista tarkastella eheyden lisäksi valkean aineen tiheyttä, jotta voidaan varmemmin erottaa iän myötä tapahtuvat kypsymisprosessit eheyteen liittyvistä muutoksista. Tulosten tulkinnassa on syytä noudattaa varovaisuutta ja huomioida myös eri mittaus tapoihin liittyvät rajoitukset virheellisten tulkintojen välttämiseksi.

Aikaisempien aivotutkimusten haasteena on ollut vaikeus määrittää tarkasti, johtuvatko kielelliset vaikeudet neuraalisista poikkeavuuksista vai johtavatko kielelliset vaikeudet poikkeamiin aivoissa (Leminen & Laasonen, 2019). Tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään tätä ongelmaa, sillä aivokuvantaminen oli tehty vastasyntyneenä. Tässä tutkimuksessa havaitut löydökset vastasyntyneiden aivoissa viittaisivat siihen suuntaan, että aivot muokkautuvat kielellisten taitojen oppimisen rinnalla. Jatkossa olisikin syytä jatkaa kielellistä arviointia sekä aivokuvantamista pitkittäistutkimusten avulla, jotta voidaan muodostaa johdonmukainen kokonaiskuva kielenkehityksen neurobiologiasta. Jatkotutkimuksissa voisi olla hyödyllistä tarkastella sekamallien avulla myös ryhmien välisiä eroja, sillä niiden avulla saadaan tarkemmin selville radastojen eheyden vaikutus esimerkiksi kielihäiriöön. Mitä varhaisemmin neuraaliset tunnusmerkit tunnustetaan, sitä aikaisemmin voidaan tukea tarvitsevat lapset saavuttaa. Mahdollisten kielellisten häiriöiden riskien

varhainen tunnistaminen on tärkeää, jotta kuntouttavat toimenpiteet voidaan aloittaa oikea-aikaisesti ja ohjata perheet tuen piiriin.

Kielelliset verkostot ja reitit toimivat yhteistyössä ja kiinteässä vuorovaikutuksessa, mikä johtaa korkeampaan kielelliseen taitotasoon kehityksen edetessä (Hickok & Poeppel, 2007). Kielellisten aivoverkostojen toiminta ja järjestäytyminen ovat monimutkaisia prosesseja, joihin vaikuttavat monet vuorovaikutussuhteet, joten yksittäisten hermostollisten kielelliseen kehitykseen vaikuttavien tekijöiden osoittaminen on haasteellista. Vaikka tämä tutkimus rajautuu yhden ikäpisteen valkean aineen eheyden ja kielellisten taitojen väliseen suhteeseen, se tuo esiin kuitenkin tärkeitä havaintoja varhaisesta kielellisestä ja hermostollisesta kehityksestä. Tämän perusteella ei voida täysin tehdä johtopäätöksiä yhteyden kehityskulusta, mikä korostaakin pitkäaikaisten ja usean ikäpisteen jatkotutkimuksien tarpeellisuutta. Näin saadaan kokonaiskäsitys siitä, miten radastojen eheyden kehitys pitkällä aikavälillä vaikuttaa laajemmin kielellisten taitojen kehittymiseen. Dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuden ja kielellisten taitojen välistä suoraa yhteyttä ei tässä tutkimuksessa havaittu. Dorsaalisen radaston ja ilmaisupituuden välillä havaittiin heikko negatiivinen yhteys ja ventraalisten radastojen osalta ei havaittu yhteyttä lainkaan. Näin ollen täyttä varmuutta mahdollisten yhteyksien laajuudesta tai luonteesta ei voitu näin varhaisessa vaiheessa havaita. Tämä ei kuitenkaan vähennä löydösten arvoa, vaan korostaa kielenkehityksen moniulotteisuutta, jossa biologiset sekä ympäristölliset tekijät nivoutuvat yhteen. Ottaen huomioon aikaisempien tutkimustulosten niukkuus ja vaihtelevuus, on kuitenkin merkityksellistä, että ylipäätään jo vastasyntyneiden aivoista löydettiin yhteys myöhempisiin kielellisiin taitoihin. Kyseessä on mahdollisesti ensimmäisiä tämänkaltaisia tutkimuksia tuoreella tutkimuskentällä. Tässä tutkimuksessa saatiin viitteitä siitä, että aivojen valkean aineen dorsaalisen radastokokonaisuuden eheydellä vastasyntyneenä on jonkinlainen yhteys kielellisiin taitoihin myöhemmässä ikävaiheessa. Suoria syy-yhteyksiä on kuitenkin haasteellista varmasti osoittaa, sillä kyseessä on voimakkaasti muovautuva, yksilöllinen kehitysprosessi, johon vaikuttavat useat eri biologiset sekä ympäristölliset tekijät. Tämän tutkimuksen mittakaavassa ei voida kattavaa kokonaiskuvaa valkean aineen radastojen merkityksestä kielenkehitykseen muodostaa, mutta tämä tutkimus kuitenkin valottaa kielen varhaista neurobiologiaa, ja tulokset antavat tukea aiheen laajentamiselle ja jatkotutkimuksille. Näin ollen tämä tutkimus luo perustaa ja suuntaviivoja seuraaville varhaisen kielenkehityksen ja neurobiologian tutkimuksille. Kuvantamistutkimus tuo parhaimmillaan arvokasta lisätietoa näiden kehityskulkujen taustalla vaikuttavista biologisista prosesseista. Tässä tutkimuksessa yhdistyy luotettavasti kielellisten taitojen

ilmeneminen sekä kuvantamistutkimuksista saatu tieto, mikä on harvinaista etenkin suomalaisella tutkimuskentällä.

LÄHTEET

- Agosta, F., Galantucci, S., Canu, E., Cappa, S. F., Magnani, G., Franceschi, M., Falini, A., Comi, G., & Filippi, M. (2013). Disruption of structural connectivity along the dorsal and ventral language pathways in patients with nonfluent and semantic variant primary progressive aphasia: A DT MRI study and a literature review. *Brain and Language*, *127*(2), 157–166.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.06.003>
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, *19*(6), 716–723.
- Alexander, A. L., Hurley, S. A., Samsonov, A. A., Adluru, N., Hosseinbor, A. P., Mossahebi, P., Tromp, D. P. M., Zakszewski, E., & Field, A. S. (2011). Characterization of Cerebral White Matter Properties Using Quantitative Magnetic Resonance Imaging Stains. *Brain Connectivity*, *1*(6), 423–446.
<https://doi.org/10.1089/brain.2011.0071>
- Assaf, Y., & Pasternak, O. (2008). Diffusion Tensor Imaging (DTI)-based White Matter Mapping in Brain Research: A Review. *Journal of Molecular Neuroscience*, *34*(1), 51–61.
<https://doi.org/10.1007/s12031-007-0029-0>
- Barnea-Goraly, N., Menon, V., Eckert, M., Tamm, L., Bammer, R., Karchemskiy, A., Dant, C. C., & Reiss, A. L. (2005). White Matter Development During Childhood and Adolescence: A Cross-sectional Diffusion Tensor Imaging Study. *Cerebral Cortex*, *15*(12), 1848–1854.
<https://doi.org/10.1093/cercor/bhi062>
- Basser, P. J. (1995). Inferring microstructural features and the physiological state of tissues from diffusion-weighted images. *NMR in Biomedicine*, *8*(7), 333–344.
<https://doi.org/10.1002/nbm.1940080707>
- Baumann, N., & Pham-Dinh, D. (2001). Biology of Oligodendrocyte and Myelin in the Mammalian Central Nervous System. *Physiological Reviews*, *81*(2), 871–927.
<https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.2.871>
- Beaulieu, C. (2002). The basis of anisotropic water diffusion in the nervous system—a technical review. *NMR in Biomedicine: An International Journal Devoted to the Development and Application of Magnetic Resonance In Vivo*, *15*(7-8), 435–455.
- Beaulieu, C. (2009). The Biological Basis of Diffusion Anisotropy. *Teoksessa Diffusion MRI* (ss. 105–126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374709-9.00006-7>
- Bonilha, L., Cendes, F., Rorden, C., Eckert, M., Dalgalarondo, P., Li, L. M., & Steiner, C. E. (2008). Gray and white matter imbalance—typical structural abnormality underlying classic autism? *Brain and Development*, *30*(6), 396–401.
- Bornstein, M. H., Haynes, M. O., & Painter, K. M. (1998). Sources of child vocabulary competence: A multivariate model. *Journal of Child Language*, *25*(2), 367–393.
<https://doi.org/10.1017/S0305000998003456>
- Bornstein, M. H., Leach, D. B., & Maurice Haynes, O. (2004). Vocabulary competence in first- and secondborn siblings of the same chronological age. *Journal of Child Language*, *31*(4), 855–873.
<https://doi.org/10.1017/S0305000904006518>
- Brauer, J., Anwander, A., & Friederici, A. D. (2011). Neuroanatomical Prerequisites for Language Functions in the Maturing Brain. *Cerebral Cortex*, *21*(2), 459–466.

<https://doi.org/10.1093/cercor/bhq108>

- Brauer, J., Anwander, A., Perani, D., & Friederici, A. D. (2013). Dorsal and ventral pathways in language development. *Brain and Language*, *127*(2), 289–295. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2013.03.001>
- Breier, J. I., Hasan, K. M., Zhang, W., Men, D., & Papanicolaou, A. C. (2008). Language Dysfunction After Stroke and Damage to White Matter Tracts Evaluated Using Diffusion Tensor Imaging. *American Journal of Neuroradiology*, *29*(3), 483–487. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A0846>
- Broce, I., Bernal B, Altman N, Tremblay P, & Dick AS. (2015). Fiber tracking of the frontal aslant tract and subcomponents of the arcuate fasciculus in 5-8-year-olds: Relation to speech and language function. *Brain and Language*, *149*, 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.06.006>
- Brown, R. (1976). *First Language: The Early Stages*. Harvard University Press.
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/kutu/detail.action?docID=3300136>
- Chiat, S., & Roy, P. (2008). Early phonological and sociocognitive skills as predictors of later language and social communication outcomes. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *49*(6), 635–645. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2008.01881.x>
- Choi, D., Yeung, H. H., & Werker, J. F. (2023). Sensorimotor foundations of speech perception in infancy. *Trends in Cognitive Sciences*, *27*(8), 773–784. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2023.05.007>
- Christensen, D., Taylor, C. L., & Zubrick, S. R. (2017). Patterns of Multiple Risk Exposures for Low Receptive Vocabulary Growth 4-8 Years in the Longitudinal Study of Australian Children. *PLOS ONE*, *12*(1), e0168804. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168804>
- Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (0 p.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203771587>
- Correll, J., Mellinger, C., McClelland, G. H., & Judd, C. M. (2020). Avoid Cohen’s ‘Small’, ‘Medium’, and ‘Large’ for Power Analysis. *Trends in Cognitive Sciences*, *24*(3), 200–207.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.12.009>
- Cox, S. R., Ritchie, S. J., Tucker-Drob, E. M., Liewald, D. C., Hagenaars, S. P., Davies, G., Wardlaw, J. M., Gale, C. R., Bastin, M. E., & Deary, I. J. (2016). Ageing and brain white matter structure in 3,513 UK Biobank participants. *Nature Communications*, *7*(1), 13629.
<https://doi.org/10.1038/ncomms13629>
- Dale, P. S., Price, T. S., Bishop, D. V. M., & Plomin, R. (2003). Outcomes of Early Language Delay: I. Predicting Persistent and Transient Language Difficulties at 3 and 4 Years. *Journal of speech, language, and hearing research*, *46*(3), 544–560. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2003/044\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2003/044))
- Dehaene-Lambertz, G. (2017). The human infant brain: A neural architecture able to learn language. *Psychonomic Bulletin & Review*, *24*(1), 48–55. <https://doi.org/10.3758/s13423-016-1156-9>
- Dennis, C.-L., Falah-Hassani, K., & Shiri, R. (2017). Prevalence of antenatal and postnatal anxiety: Systematic review and meta-analysis. *British Journal of Psychiatry*, *210*(5), 315–323.
<https://doi.org/10.1192/bjp.bp.116.187179>
- Deoni, S. C. L., O’Muircheartaigh, J., Elison, J. T., Walker, L., Doernberg, E., Waskiewicz, N., Dirks, H., Piryatinsky, I., Dean, D. C., & Jumble, N. L. (2016). White matter maturation profiles through early childhood predict general cognitive ability. *Brain Structure and Function*, *221*(2), 1189–1203.
<https://doi.org/10.1007/s00429-014-0947-x>

- Dick, A. S., Bernal, B., & Tremblay, P. (2014). The language connectome: New pathways, new concepts. *The Neuroscientist: A Review Journal Bringing Neurobiology, Neurology and Psychiatry*, 20(5), 453–467. <https://doi.org/10.1177/1073858413513502>
- Dubber, S., Reck, C., Müller, M., & Gawlik, S. (2015). Postpartum bonding: The role of perinatal depression, anxiety and maternal–fetal bonding during pregnancy. *Archives of Women's Mental Health*, 18(2), 187–195. <https://doi.org/10.1007/s00737-014-0445-4>
- Dubois, J., Dehaene-Lambertz, G., Kulikova, S., Poupon, C., Hüppi, P. S., & Hertz-Pannier, L. (2014). The Early Development of Brain White Matter: A Review of Imaging Studies in Fetuses, Newborns and Infants. *Neuroscience*, 276, 48–71. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.12.044>
- Dubois, J., Hertz-Pannier, L., Cachia, A., Mangin, J. F., Le Bihan, D., & Dehaene-Lambertz, G. (2009). Structural Asymmetries in the Infant Language and Sensori-Motor Networks. *Cerebral Cortex*, 19(2), 414–423. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhn097>
- Dubois, J., Poupon, C., Thirion, B., Simonnet, H., Kulikova, S., Leroy, F., Hertz-Pannier, L., & Dehaene-Lambertz, G. (2016). Exploring the Early Organization and Maturation of Linguistic Pathways in the Human Infant Brain. *Cerebral Cortex*, 26(5), 2283–2298. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv082>
- Dunn, L. M. & Dunn, L. M. (2005). Peabody picture vocabulary test-IIINL. Pearson Assessment and Information B.V.
- Dunn, L.M., Dunn, D.M., (2007). Peabody Picture Vocabulary Test, fourth edition. The Psychological Corporation, Inc., (PPVT-4)
- Emerson, R. W., Gao, W., & Lin, W. (2016). Longitudinal Study of the Emerging Functional Connectivity Asymmetry of Primary Language Regions during Infancy. *The Journal of Neuroscience*, 36(42), 10883–10892. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3980-15.2016>
- Estrada, K. A., Govindaraj, S., Abdi, H., Moraglia, L. E., Wolff, J. J., Meera, S. S., Dager, S. R., McKinstry, R. C., Styner, M. A., Zwaigenbaum, L., Piven, J., & Swanson, M. R. (2023). Language exposure during infancy is negatively associated with white matter microstructure in the arcuate fasciculus. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 61, 101240. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2023.101240>
- Eun, J. J., Lee, H. J., & Kim, J. K. (2014). Developmental profiles of preschool children with delayed language development. *Korean Journal of Pediatrics*, 57(8), 363. <https://doi.org/10.3345/kjp.2014.57.8.363>
- Fan, Y.-T., Fang, Y.-W., Chen, Y.-P., Leshikar, E. D., Lin, C.-P., Tzeng, O. J. L., Huang, H.-W., & Huang, C.-M. (2019). Aging, cognition, and the brain: Effects of age-related variation in white matter integrity on neuropsychological function. *Aging & Mental Health*, 23(7), 831–839. <https://doi.org/10.1080/13607863.2018.1455804>
- Fenson, L., Dale, P. S., Reznick, J. S., Bates, E., Thal, D. J., & Pethick, S. J. (1994a). Variability in early communicative development. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 59(5), 1–173; discussion 174-185.
- Fenson, L., Dale, P. S., Reznick, J. S., Bates, E., Thal, D. J., & Pethick, S. J. (1994b). Variability in early communicative development. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 59(5), 1–173; discussion 174-185.
- Fenson, L., Marchman, V. A., Thal, D. J., Dale, P. S., Reznick, J. S., & Bates, E. (2007). *MacArthur-Bates Communicative Development Inventories: User's guide and technical manual* (Versio 2nd ed.)

[Dataset].

- Fields, R. D. (2008). White matter in learning, cognition and psychiatric disorders. *Trends in Neurosciences*, *31*(7), 361–370. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2008.04.001>
- Filley, C. M., & Fields, R. D. (2016). White matter and cognition: Making the connection. *Journal of Neurophysiology*, *116*(5), 2093–2104. <https://doi.org/10.1152/jn.00221.2016>
- Friederici, A. D. (2018). The neural basis for human syntax: Broca's area and beyond. *Current opinion in behavioral sciences*, *21*, 88–92. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.03.004>
- Friederici, A. D., & Wartenburger, I. (2010). Language and brain. *WIREs Cognitive Science*, *1*(2), 150–159. <https://doi.org/10.1002/wcs.9>
- Gebauer, D., Fink, A., Filippini, N., Johansen-Berg, H., Reishofer, G., Koschutnig, K., Kargl, R., Purgstaller, C., Fazekas, F., & Enzinger, C. (2012). Differences in integrity of white matter and changes with training in spelling impaired children: A diffusion tensor imaging study. *Brain Structure and Function*, *217*(3), 747–760. <https://doi.org/10.1007/s00429-011-0371-4>
- Gialluisi, A., Guadalupe, T., Francks, C., & Fisher, S. E. (2017). Neuroimaging genetic analyses of novel candidate genes associated with reading and language. *Brain and Language*, *172*, 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.07.002>
- Gilmore, J. H., Knickmeyer, R. C., & Gao, W. (2018). Imaging structural and functional brain development in early childhood. *Nature Reviews Neuroscience*, *19*(3), 123–137. <https://doi.org/10.1038/nrn.2018.1>
- Girault, J. B., Cornea, E., Goldman, B. D., Knickmeyer, R. C., Styner, M., & Gilmore, J. H. (2019). White matter microstructural development and cognitive ability in the first 2 years of life. *Human Brain Mapping*, *40*(4), 1195–1210. <https://doi.org/10.1002/hbm.24439>
- Gogtay, N., Giedd, J. N., Lusk, L., Hayashi, K. M., Greenstein, D., Vaituzis, A. C., Nugent, T. F., Herman, D. H., Clasen, L. S., Toga, A. W., Rapoport, J. L., & Thompson, P. M. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(21), 8174–8179. <https://doi.org/10.1073/pnas.0402680101>
- Goldman, R., & Fristoe, M. (2000). *Goldman-Fristoe Test of Articulation, Second Edition* [Dataset]. <https://doi.org/10.1037/t15098-000>
- Guillery, R. W. (2005). Is postnatal neocortical maturation hierarchical? *Trends in Neurosciences*, *28*(10), 512–517. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2005.08.006>
- Hair, J. F., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2011). PLS-SEM: Indeed a Silver Bullet. *Journal of Marketing Theory and Practice*, *19*(2), 139–152. <https://doi.org/10.2753/MTP1069-6679190202>
- Harrison, L. J., & McLeod, S. (2010). Risk and Protective Factors Associated With Speech and Language Impairment in a Nationally Representative Sample of 4- to 5-Year-Old Children. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *53*(2), 508–529. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2009/08-0086\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2009/08-0086))
- Heilmann, J., Weismer, S. E., Evans, J., & Hollar, C. (2005). Utility of the MacArthur—Bates Communicative Development Inventory in Identifying Language Abilities of Late-Talking and Typically Developing Toddlers. *American Journal of Speech-Language Pathology*, *14*(1), 40–51. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2005/006\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2005/006))
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews*

- Neuroscience*, 8(5), 393–402. <https://doi.org/10.1038/nrn2113>
- Hickok, G., & Poeppel, D. (2015). Neural basis of speech perception. Teoksessa *Handbook of Clinical Neurology* (Vsk. 129, ss. 149–160). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-62630-1.00008-1>
- IBM Corp. (2023). *IBM SPSS Statistics for Windows, versio 29.0.2.0* (Versio 29.0.2.0) [Software].
- Jones, D. K., & Cercignani, M. (2010). Twenty-five pitfalls in the analysis of diffusion MRI data. *NMR in Biomedicine*, 23(7), 803–820. <https://doi.org/10.1002/nbm.1543>
- Karlsson, L., Tolvanen, M., Scheinin, N. M., Uusitupa, H.-M., Korja, R., Ekholm, E., Tuulari, J. J., Pajulo, M., Huutilainen, M., Paunio, T., Karlsson, H., & FinnBrain Birth Cohort Study Group. (2018). Cohort Profile: The FinnBrain Birth Cohort Study (FinnBrain). *International Journal of Epidemiology*, 47(1), 15–16j. <https://doi.org/10.1093/ije/dyx173>
- Kidd, E., Donnelly, S., & Christiansen, M. H. (2018). Individual Differences in Language Acquisition and Processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(2), 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.11.006>
- Kim, J., Kim, Y. W., Park, C., Park, E. S., Kim, H.-H., Lee, S.-K., & Kim, D. I. (2006). Diffusion-tensor magnetic resonance imaging in children with language impairment. *NeuroReport*, 17(12), 1279–1282. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000230516.86090.67>
- Kim, Y. T. (2003). *Preschool Receptive-Expressive Language Scale (PRES)*.
- Kim, Y. T., Kim, K., Yoon, H. R., & Kim, H. (2003). *Sequenced language scale for infants (SELSI)*.
- Kingston, D., McDonald, S., Austin, M.-P., & Tough, S. (2015). Association between Prenatal and Postnatal Psychological Distress and Toddler Cognitive Development: A Systematic Review. *PLOS ONE*, 10(5), e0126929. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126929>
- Knickmeyer, R. C., Gouttard, S., Kang, C., Evans, D., Wilber, K., Smith, J. K., Hamer, R. M., Lin, W., Gerig, G., & Gilmore, J. H. (2008). A Structural MRI Study of Human Brain Development from Birth to 2 Years. *The Journal of Neuroscience*, 28(47), 12176–12182. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3479-08.2008>
- Kohen, D., & Guèvremont, A. (2014). Income disparities in preschool outcomes and the role of family, child, and parenting factors. *Early Child Development and Care*, 184(2), 266–292. <https://doi.org/10.1080/03004430.2013.785539>
- Korja, R., Nolvi, S., Grant, K. A., & McMahon, C. (2017). The Relations Between Maternal Prenatal Anxiety or Stress and Child’s Early Negative Reactivity or Self-Regulation: A Systematic Review. *Child Psychiatry & Human Development*, 48(6), 851–869. <https://doi.org/10.1007/s10578-017-0709-0>
- Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2007). *NEPSY II: Clinical and interpretive manual* [Dataset]. Harcourt Assessment, PsychCorp.
- Korpilahti, P., Kaljonen, A., & Jansson-Verkasalo, E. (2016). Identification of biological and environmental risk factors for language delay: The Let’s Talk STEPS study. *Infant Behavior and Development*, 42, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2015.08.008>
- Kort, W., Schittekatte, M., & Compaaan, E. (2008). *CELF-4-NL: clinical evaluation of language fundamentals* [Dataset].
- Kunnari, S., Arkkila, E., & Laasonen, M. (2022). Puheen ja kielen kehityksen vaikeuksien syyt, esiintyvyys ja ilmiäsuut. Teoksessa S. Kunnari & M. Laasonen, *Lasten kielelliset vaikeudet* (Vsk. 2022). PS-kustannus.

- Kunnari, S., & Laasonen, M. (2022). Lasten puheen, kielen ja kommunikoinnin vaikeudet. Teoksessa S. Kunnari & M. Laasonen, *Lasten kielelliset vaikeudet* (Vsk. 2022). PS-kustannus.
- Kwak, S. G., & Kim, J. H. (2017). Central limit theorem: The cornerstone of modern statistics. *Korean Journal of Anesthesiology*, 70(2), 144. <https://doi.org/10.4097/kjae.2017.70.2.144>
- Laakso, M.-L., Siiskonen, T., Aro, T., Ahonen, T., & Ketonen, R. (2014). Esikielellinen vuorovaikutus ja viestintä. Teoksessa *Joko se puhuu? - Kielen kehityksen vaikeudet varhaislapsuudessa* (ss. 22–50). PS-Kustannus.
- Landry, S. H., Smith, K. E., & Swank, P. R. (2002). Environmental effects on language development in normal and high-risk child populations. *Seminars in Pediatric Neurology*, 9(3), 192–200. <https://doi.org/10.1053/spen.2002.35499>
- Langer, N., Peysakhovich B, Zuk J, Drottar M, Sliva DD, Smith S, Becker BL, Grant PE, & Gaab N. (2017). White Matter Alterations in Infants at Risk for Developmental Dyslexia. *Cerebral Cortex* (New York, N.Y. : 1991), 27(2), 1027–1036. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv281>
- Larvie, M., & Fischl, B. (2016). Volumetric and fiber-tracing MRI methods for gray and white matter. Teoksessa *Handbook of Clinical Neurology* (Vsk. 135, ss. 39–60). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53485-9.00003-9>
- Le Bihan, D. (2003). Looking into the functional architecture of the brain with diffusion MRI. *Nature Reviews Neuroscience*, 4(6), 469–480. <https://doi.org/10.1038/nrn1119>
- Le Bihan, D., Mangin, J., Poupon, C., Clark, C. A., Pappata, S., Molko, N., & Chabriat, H. (2001). Diffusion tensor imaging: Concepts and applications. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 13(4), 534–546. <https://doi.org/10.1002/jmri.1076>
- Lebel, C., & Beaulieu, C. (2011). Longitudinal Development of Human Brain Wiring Continues from Childhood into Adulthood. *Journal of Neuroscience*, 31(30), 10937–10947. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.5302-10.2011>
- Lee, J. C., Dick, A. S., & Tomblin, J. B. (2020). Altered brain structures in the dorsal and ventral language pathways in individuals with and without developmental language disorder (DLD). *Brain Imaging and Behavior*, 14(6), 2569–2586. <https://doi.org/10.1007/s11682-019-00209-1>
- Lee, S. J., Steiner, R. J., Yu, Y., Short, S. J., Neale, M. C., Styner, M. A., Zhu, H., & Gilmore, J. H. (2017). Common and heritable components of white matter microstructure predict cognitive function at 1 and 2 y. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(1), 148–153. <https://doi.org/10.1073/pnas.1604658114>
- Leminen, M., & Laasonen, M. (2019). Kehityksellisen kielihäiriön hermostolliset ilmenemismuodot. *Puheen ja kielen tutkimuksen yhdistyksen julkaisuja*, 51, 43–55.
- Lin, Y., Xu, J., Huang, J., Jia, Y., Zhang, J., Yan, C., & Zhang, J. (2017). Effects of prenatal and postnatal maternal emotional stress on toddlers' cognitive and temperamental development. *Journal of Affective Disorders*, 207, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2016.09.010>
- Liu, J., Tsang, T., Jackson, L., Ponting, C., Jeste, S. S., Bookheimer, S. Y., & Dapretto, M. (2019). Altered lateralization of dorsal language tracts in 6-week-old infants at risk for autism. *Developmental Science*, 22(3), e12768. <https://doi.org/10.1111/desc.12768>
- Lyytinen, P. (1999). *Varhaisen kommunikaation ja kielen kehityksen arviointimenetelmä*. Jyväskylän

yliopiston lapsitutkimuskeskus.

- Manning, K. Y., Reynolds, J. E., Long, X., Llera, A., Dewey, D., & Lebel, C. (2022). Multimodal brain features at 3 years of age and their relationship with pre-reading measures 1 year later. *Frontiers in Human Neuroscience, 16*, 965602. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.965602>
- Merisaari, H., Tuulari, J. J., Karlsson, L., Scheinin, N. M., Parkkola, R., Saunavaara, J., Lähdesmäki, T., Lehtola, S. J., Keskinen, M., Lewis, J. D., Evans, A. C., & Karlsson, H. (2019). Test-retest reliability of Diffusion Tensor Imaging metrics in neonates. *NeuroImage, 197*, 598–607. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.04.067>
- Miller, J. F., Sedey, A. L., & Miolo, G. (1995). Validity of Parent Report Measures of Vocabulary Development for Children With Down Syndrome. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 38*(5), 1037–1044. <https://doi.org/10.1044/jshr.3805.1037>
- Mody, M., Shui, A., Nowinski, L., Golas, S., Ferrone, C., O'Rourke, J., & McDougale, C. (2017). Communication deficits and the motor system: Exploring patterns of associations in autism spectrum disorder (ASD). *Journal of autism and developmental disorders, 47*, 155–162.
- Morgan, A. T., Su, M., Reilly, S., Conti-Ramsden, G., Connelly, A., & Liégeois, F. J. (2018). A Brain Marker for Developmental Speech Disorders. *The Journal of Pediatrics, 198*, 234–239.e1. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2018.02.043>
- Moyle, J., Stokes, S. F., & Klee, T. (2011). Early Language Delay and Specific Language Impairment: Early Language Delay and SLI. *Developmental Disabilities Research Reviews, 17*(2), 160–169. <https://doi.org/10.1002/ddr.1110>
- Nagy, Z., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Maturation of White Matter is Associated with the Development of Cognitive Functions during Childhood. *Journal of Cognitive Neuroscience, 16*(7), 1227–1233. <https://doi.org/10.1162/0898929041920441>
- Newbury, D. F., & Monaco, A. P. (2010). Genetic Advances in the Study of Speech and Language Disorders. *Neuron, 68*(2), 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2010.10.001>
- Niemitalo-Haapola, E., Haapala, S., & Ukkola, S. (2020). *Lapsen kielenkehitys* (Vsk. 2020). PS-kustannus.
- Nummenmaa, L. (2021). *Tilastotieteen käsikirja*. Werner Söderström Ltd.
- Nummenmaa, L., Holopainen, M., & Pulkkinen, P. (2017). *Tilastollisten menetelmien perusteet* (1.–3. painos, Vsk. 2017). Sanoma Pro Oy.
- O'Brien, R. M. (2007). A Caution Regarding Rules of Thumb for Variance Inflation Factors. *Quality & Quantity, 41*(5), 673–690. <https://doi.org/10.1007/s11135-006-9018-6>
- O'Donnell, K. J., Glover, V., Barker, E. D., & O'Connor, T. G. (2014). The persisting effect of maternal mood in pregnancy on childhood psychopathology. *Development and Psychopathology, 26*(2), 393–403. <https://doi.org/10.1017/S0954579414000029>
- Olulade, O. A., Seydell-Greenwald, A., Chambers, C. E., Turkeltaub, P. E., Dromerick, A. W., Berl, M. M., Gaillard, W. D., & Newport, E. L. (2020). The neural basis of language development: Changes in lateralization over age. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 117*(38), 23477–23483. <https://doi.org/10.1073/pnas.1905590117>
- O'Muircheartaigh, J., Dean, D. C., Dirks, H., Waskiewicz, N., Lehman, K., Jerskey, B. A., & Deoni, S. C.

- L. (2013). Interactions between White Matter Asymmetry and Language during Neurodevelopment. *The Journal of Neuroscience*, 33(41), 16170–16177. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1463-13.2013>
- O’Muircheartaigh, J., Dean, D. C., Ginestet, C. E., Walker, L., Waskiewicz, N., Lehman, K., Dirks, H., Piryatinsky, I., & Deoni, S. C. L. (2014). White matter development and early cognition in babies and toddlers. *Human Brain Mapping*, 35(9), 4475–4487. <https://doi.org/10.1002/hbm.22488>
- Ouyang, M., Dubois, J., Yu, Q., Mukherjee, P., & Huang, H. (2019). Delineation of early brain development from fetuses to infants with diffusion MRI and beyond. *NeuroImage*, 185, 836–850. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.04.017>
- Paavola-Ruotsalainen, L., & Rantalainen, K. (2020). Varhaiset vuorovaikutustaidot. Teoksessa P. Peura (Toim.), *Lapsen kielenkehitys*. PS-Kustannus.
- Paus, T., Collins, D. L., Evans, A. C., Leonard, G., Pike, B., & Zijdenbos, A. (2001). Maturation of white matter in the human brain: A review of magnetic resonance studies. *Brain Research Bulletin*, 54(3), 255–266. [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(00\)00434-2](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(00)00434-2)
- Pinto, A. I., Pessanha, M., & Aguiar, C. (2013). Effects of home environment and center-based child care quality on children’s language, communication, and literacy outcomes. *Early Childhood Research Quarterly*, 28(1), 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2012.07.001>
- Plug, M. B., Van Wijngaarden, V., De Wilde, H., Van Binsbergen, E., Stegeman, I., Van Den Boogaard, M.-J. H., & Smit, A. L. (2021). Clinical Characteristics and Genetic Etiology of Children With Developmental Language Disorder. *Frontiers in Pediatrics*, 9, 651995. <https://doi.org/10.3389/fped.2021.651995>
- Qiu, A., Mori, S., & Miller, M. I. (2015). Diffusion Tensor Imaging for Understanding Brain Development in Early Life. *Annual Review of Psychology*, 66(1), 853–876. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010814-015340>
- Quevedo, L. A., Silva, R. A., Godoy, R., Jansen, K., Matos, M. B., Tavares Pinheiro, K. A., & Pinheiro, R. T. (2012). The impact of maternal post-partum depression on the language development of children at 12 months. *Child: Care, Health and Development*, 38(3), 420–424. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2214.2011.01251.x>
- Reck, C., Van Den Bergh, B., Tietz, A., Müller, M., Ropeter, A., Zipser, B., & Pauen, S. (2018). Maternal avoidance, anxiety cognitions and interactive behaviour predicts infant development at 12 months in the context of anxiety disorders in the postpartum period. *Infant Behavior and Development*, 50, 116–131. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2017.11.007>
- Rescorla, L. (2009). Age 17 Language and Reading Outcomes in Late-Talking Toddlers: Support for a Dimensional Perspective on Language Delay. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 52(1), 16–30. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2008/07-0171\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2008/07-0171))
- Roberts, T. P. L., Heiken, K., Zarnow, D., Dell, J., Nagae, L., Blaskey, L., Solot, C., Levy, S. E., Berman, J. I., & Edgar, J. C. (2014). Left Hemisphere Diffusivity of the Arcuate Fasciculus: Influences of Autism Spectrum Disorder and Language Impairment. *American Journal of Neuroradiology*, 35(3), 587–592. <https://doi.org/10.3174/ajnr.A3754>
- Rollans, C., Cheema, K., Georgiou, G. K., & Cummine, J. (2017). Pathways of the inferior frontal occipital fasciculus in overt speech and reading. *Neuroscience*, 364, 93–106. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.09.011>

- Romeo, R. R., Segaran, J., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., Yendiki, A., Rowe, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Language Exposure Relates to Structural Neural Connectivity in Childhood. *The Journal of Neuroscience*, *38*(36), 7870–7877. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0484-18.2018>
- Sanchez-Alonso, S., & Aslin, R. N. (2022). Towards a model of language neurobiology in early development. *Brain and Language*, *224*, 105047. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2021.105047>
- Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M.-S., Umarova, R., Musso, M., Glauche, V., Abel, S., Huber, W., Rijntjes, M., Hennig, J., & Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(46), 18035–18040. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805234105>
- Schmithorst, V. J., Wilke, M., Dardzinski, B. J., & Holland, S. K. (2005). Cognitive functions correlate with white matter architecture in a normal pediatric population: A diffusion tensor MRI study. *Human Brain Mapping*, *26*(2), 139–147. <https://doi.org/10.1002/hbm.20149>
- Schrank, F., McGrew, K., & Mather, N. (2014). *Woodcock-Johnson IV Tests of Cognitive Abilities*.
- Semel, E., Wiig, E., & Secord, W. (2003). Clinical evaluation of language fundamentals 4 (CELF-4) technical manual. *The Psychological Corporation*.
- Shin, J., Rowley, J., Chowdhury, R., Jolicoeur, P., Klein, D., Grova, C., Rosa-Neto, P., & Kobayashi, E. (2019). Inferior Longitudinal Fasciculus' Role in Visual Processing and Language Comprehension: A Combined MEG-DTI Study. *Frontiers in Neuroscience*, *13*, 875. <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00875>
- Short, K., Eadie, P., & Kemp, L. (2019). Paths to language development in at risk children: A qualitative comparative analysis (QCA). *BMC Pediatrics*, *19*(1), 94. <https://doi.org/10.1186/s12887-019-1449-z>
- Sket, G. M., Overfeld, J., Styner, M., Gilmore, J. H., Entringer, S., Wadhwa, P. D., Rasmussen, J. M., & Buss, C. (2019). Neonatal White Matter Maturation Is Associated With Infant Language Development. *Frontiers in Human Neuroscience*, *13*, 434. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00434>
- St Clair, M. C., Pickles, A., Durkin, K., & Conti-Ramsden, G. (2011). A longitudinal study of behavioral, emotional and social difficulties in individuals with a history of specific language impairment (SLI). *Journal of communication disorders*, *44*(2), 186–199. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2010.09.004>
- Stolt, S. (2018). Early lexicon, and the development that precedes it and the development that follows – a developmental view to early lexicon. Teoksessa A. Bar-On, D. Ravid, & E. Dattner (Toim.), *Handbook of Communication Disorders: Theoretical, Empirical, and Applied Linguistic Perspectives*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9781614514909>
- Stolt, S., Haataja, L., Lapinleimu, H., & Lehtonen, L. (2008). Early lexical development of Finnish children: A longitudinal study. *First Language*, *28*(3), 259–279. <https://doi.org/10.1177/0142723708091051>
- Stolt, S., & Salmi, P. (2020). Sanaston kehitys. Teoksessa E. Niemitalo-Haapola, S. Haapala, & S. Ukkola, *Lapsen kielenkehitys* (Vsk. 2020). PS-kustannus.
- Stolt, S., & Vehkavuori, S. (2022a). Varhaisen kielellisen kehityksen arviointi ja seulonta. Teoksessa S. Kunnari & M. Laasonen, *Lasten kielelliset vaikeudet* (Vsk. 2022). PS-kustannus.
- Stolt, S., & Vehkavuori, S.-M. (2022b). Lapsen varhaisen sanaston kehityksen arviointi Sanaseula-menetelmän avulla. *NMI-bulletin*, *32*(1).

- Stothard, S. E., Snowling, M. J., Bishop, D. V. M., Chipchase, B. B., & Kaplan, C. A. (1998). Language-Impaired Preschoolers: A Follow-Up Into Adolescence. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 41*(2), 407–418. <https://doi.org/10.1044/jslhr.4102.407>
- Su, M., Thiebaut De Schotten, M., Zhao, J., Song, S., Zhou, W., Gong, G., McBride, C., Ramus, F., & Shu, H. (2018). Vocabulary growth rate from preschool to school-age years is reflected in the connectivity of the arcuate fasciculus in 14-year-old children. *Developmental Science, 21*(5), e12647. <https://doi.org/10.1111/desc.12647>
- Sullivan, E. V., & Pfefferbaum, A. (2006). Diffusion tensor imaging and aging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 30*(6), 749–761. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.06.002>
- Szaflarski, J. P., Holland, S. K., Schmithorst, V. J., & Byars, A. W. (2006). fMRI study of language lateralization in children and adults. *Human Brain Mapping, 27*(3), 202–212. <https://doi.org/10.1002/hbm.20177>
- Thal, D., DesJardin, J. L., & Eisenberg, L. S. (2007). Validity of the MacArthur–Bates Communicative Development Inventories for Measuring Language Abilities in Children With Cochlear Implants. *American Journal of Speech-Language Pathology, 16*(1), 54–64. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2007/007\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2007/007))
- Thal, D., O’Hanlon, L., Clemmons, M., & Fralin, L. (1999). Validity of a Parent Report Measure of Vocabulary and Syntax for Preschool Children With Language Impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 42*(2), 482–496. <https://doi.org/10.1044/jslhr.4202.482>
- Tomblin, J. B., Zhang, X., Buckwalter, P., & O’Brien, M. (2003). The Stability of Primary Language Disorder: Four Years After Kindergarten Diagnosis. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 46*(6), 1283–1296. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2003/100\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2003/100))
- Tremblay, P., & Dick, A. S. (2016). Broca and Wernicke are dead, or moving past the classic model of language neurobiology. *Brain and Language, 162*, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.08.004>
- Uda, S., Matsui, M., Tanaka, C., Uematsu, A., Miura, K., Kawana, I., & Noguchi, K. (2015). Normal Development of Human Brain White Matter from Infancy to Early Adulthood: A Diffusion Tensor Imaging Study. *Developmental Neuroscience, 37*(2), 182–194. <https://doi.org/10.1159/000373885>
- Valanne, L., & Brander, A. (2013). Diffuusiotensorikuvaus ja aivovamman jälkitila. *Duodecim, 129*(14), 1449–1455.
- Vanderauwera, J., Wouters, J., Vandermosten, M., & Ghesquière, P. (2017). Early dynamics of white matter deficits in children developing dyslexia. *Developmental Cognitive Neuroscience, 27*, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.003>
- Vandermosten, M., Vanderauwera, J., Theys, C., De Vos, A., Vanvooren, S., Sunaert, S., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2015). A DTI tractography study in pre-readers at risk for dyslexia. *Developmental Cognitive Neuroscience, 14*, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2015.05.006>
- Vehkavuori, S.-M., & Stolt, S. (2019). Early lexicon and language skills at 42 months. *Clinical Linguistics & Phonetics, 33*(9), 854–868. <https://doi.org/10.1080/02699206.2019.1584721>
- Verly, M., Gerrits, R., Sleurs, C., Lagae, L., Sunaert, S., Zink, I., & Rommel, N. (2019). The mis-wired language network in children with developmental language disorder: Insights from DTI tractography. *Brain Imaging and Behavior, 13*(4), 973–984. <https://doi.org/10.1007/s11682-018-9903-3>

- Von Der Heide, R. J., Skipper, L. M., Klobusicky, E., & Olson, I. R. (2013). Dissecting the uncinate fasciculus: Disorders, controversies and a hypothesis. *Brain*, *136*(6), 1692–1707. <https://doi.org/10.1093/brain/awt094>
- Vydrova, R., Komarek, V., Sanda, J., Sterbova, K., Jahodova, A., Maulisova, A., Zackova, J., Reissigova, J., Krsek, P., & Kyncl, M. (2015). Structural alterations of the language connectome in children with specific language impairment. *Brain and Language*, *151*, 35–41. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.10.003>
- Wagner, R. K., Torgesen, J. K., Rashotte, C. A., & Pearson, N. A. (1999). *Comprehensive test of phonological processing: CTOPP*. Pro-ed.
- Walton, M., Dewey, D., & Lebel, C. (2018). Brain white matter structure and language ability in preschool-aged children. *Brain and Language*, *176*, 19–25. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2017.10.008>
- Wong, F. C. K., Chandrasekaran, B., Garibaldi, K., & Wong, P. C. M. (2011). White Matter Anisotropy in the Ventral Language Pathway Predicts Sound-to-Word Learning Success. *Journal of Neuroscience*, *31*(24), 8780–8785. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0999-11.2011>
- Woodcock, R. W., McGrew, K. S., & Mather, N. (2001). *Woodcock-Johnson III tests of achievement*.
- Yang, Q., Huang, P., Li, C., Fang, P., Zhao, N., Nan, J., Wang, B., Gao, W., & Cui, L.-B. (2018). Mapping alterations of gray matter volume and white matter integrity in children with autism spectrum disorder: Evidence from fMRI findings. *Neuroreport*, *29*(14), 1188–1192.
- Yeatman, J. D., Dougherty, R. F., Ben-Shachar, M., & Wandell, B. A. (2012). Development of white matter and reading skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(44). <https://doi.org/10.1073/pnas.1206792109>
- Yeatman, J. D., Dougherty, R. F., Rykhlevskaia, E., Sherbondy, A. J., Deutsch, G. K., Wandell, B. A., & Ben-Shachar, M. (2011). Anatomical Properties of the Arcuate Fasciculus Predict Phonological and Reading Skills in Children. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *23*(11), 3304–3317. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00061
- Yu, Q., Peng, Y., Kang, H., Peng, Q., Ouyang, M., Slinger, M., Hu, D., Shou, H., Fang, F., & Huang, H. (2020). Differential White Matter Maturation from Birth to 8 Years of Age. *Cerebral Cortex*, *30*(4), 2674–2690. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz268>
- Zuk, J., Yu, X., Sanfilippo, J., Figuccio, M. J., Dunstan, J., Carruthers, C., Sideridis, G., Turesky, T. K., Gagoski, B., Grant, P. E., & Gaab, N. (2021). White matter in infancy is prospectively associated with language outcomes in kindergarten. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *50*, 100973. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.100973>

LIITTEET

Liite 1. Alkuperäinen sanavarasto ennustava regressiomalli, johon on sisällytetty kaikki mahdolliset selittävät muuttujat

	<i>B</i>	95 % <i>CI</i>	β	<i>p</i>	VIF
vakio	83.35	[23.91, 142.80]		.007	
jakomuuttuja ikä kuvaus- hetkellä (vrk)	0.15	[0.05, 0.24]	0.31	.003	1.05
FA IFOF vasen	0.22	[-0.33, 0.78]	0.09	.423	1.28
FA IFOF oikea	11.97	[-394.130, 418.07]	0.01	.953	4.45
FA ILF vasen	-273.65	[-697.721, 150.42]	-0.24	.203	3.62
FA ILF oikea	18.57	[-259.01, 296.14]	0.02	.895	2.86
FA SLF vasen	204.07	[-113.80, 521.95]	0.20	.205	2.45
FA SLF oikea	62.50	[-243.07, 368.06]	0.07	.685	2.61
FA UF vasen	99.36	[-216.64, 415.37]	0.10	.534	2.40
FA UF oikea	-76.48	[483.43, 330.47]	-0.06	.710	3.02
	-150.58	[-581.69, 280.52]	-0.13	.489	3.81

Liite 2. Alkuperäinen kolmen pisimmän ilmaisun keskipituutta ennustava regressiomalli, johon on sisällytetty kaikki mahdolliset selittävät muuttujat

	<i>B</i>	95 % <i>CI</i>	β	<i>p</i>	VIF
vakio	14.17	[4.87, 23.46]		.003	
jakomuuttuja ikä kuvaus- hetkellä (vrk)	0.02	[0.01, 0.04]	0.26	.011	1.05
FA IFOF vasen	0.06	[-0.03, 0.14]	0.15	.187	1.28
FA IFOF oikea	-21.95	[-85.46, 41.56]	-0.14	.494	4.45
FA ILF vasen	-43.93	[-110.25, 22.39]	-0.24	.191	3.62
FA ILF oikea	22.81	[-20.60, 66.22]	0.17	.299	2.86
FA SLF vasen	28.79	[-20.92, 78.50]	0.18	.253	2.45
FA SLF oikea	-65.65	[-113.44, -17.86]	-0.43	.008	2.61
FA UF vasen	20.20	[-29.22, 69.62]	0.12	.419	2.40
FA UF oikea	22.00	[-41.64, 85.65]	0.12	.494	3.02
	-1.37	[-68.79, 66.05]	-0.01	.968	3.81