



**TURUN  
YLIOPISTO**

**Aivojen valkean aineen integriteetin yhteys puheen tyypillisiin  
sujumattomuuksiin 5-vuotiailla**

Ella Partanen

Riina Vidgren

Pro gradu -tutkielma

Ohjaajat: Elina Mainela-Arnold & Kiia Kurila

Turun yliopisto

Psykologian ja logopedian laitos,  
logopedia

5.8.2025

**Turun yliopiston laatuja järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä**

TURUN YLIOPISTO

Psykologian ja logopedian laitos/Yhteiskuntatieteellinen tiedekunta

PARTANEN, ELLA & VIDGREN, RIINA: Aivojen valkean aineen integriteetin yhteys puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin 5-vuotiailla

Pro gradu -tutkielma, 42 s., 4 liite s.

Logopedia

Elokuu 2025

---

Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena oli selvittää 5-vuotiaiden lasten aivojen valkean aineen integriteetin yhteyttä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Mahdollista yhteyttä tarkasteltiin dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien kielelliseen prosessointiin osallistuvissa radastoissa. Puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteyttä aivojen valkean aineen radastojen integriteettiin ei ole vielä tutkittu. Aiemman radastojen integriteetin ja kielellisen prosessoinnin välisen tutkimuksen ja niiden välisen havaitun yhteyden valossa voidaan kuitenkin odottaa yhteyden olevan mahdollinen myös puheen tyypillisten sujumattomuuksien ja radastojen eheyden välillä. Tyypillisesti kehittyvien lasten kypsyvän integriteetin ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteyden tutkiminen laajentaa ymmärrystä mikrostruktuurallisten rakenteiden osallisuudesta puheen sujuvuuteen.

Tutkimuksen aineisto (N = 82) on kerätty osana monitieteistä FinnBrain-kohorttitutkimusta. Puheen tyypillisiä sujumattomuuksia mittaava data on saatu puheen ja kielen osatutkimuksesta, ja radastojen integriteettiä on tutkittu diffuusiotensorikuvantamisen (engl. *Diffusion Tensor Imaging*, DTI) menetelmällä. Radastojen integriteetin tarkastelussa käytettiin sen parametreista käytetyintä, fraktionaalisen anisotropian (engl. *Fractional Anisotropy*, FA), arvoa. Tarkastelun kohteeksi valikoitui dorsaalista radastokokonaisuudesta *Superior Longitudinal Fasciculus* (SLF) ja ventraalisesta radastokokonaisuudesta *Inferior Fronto-occipital Fasciculus* (IFOF), *Inferior Longitudinal Fasciculus* (ILF) ja *Uncinate Fasciculus* (UNC). Puheen tyypillisten sujumattomuuksien ja radastojen integriteetin välistä yhteyttä tutkittiin regressioanalyysillä.

Tutkimuksen tulosten mukaan aivojen valkean aineen integriteetti on yhteydessä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Dorsaalista radastokokonaisuudesta havaittiin, että oikean hemisfäärin SLF on positiivisesti yhteydessä tyypillisiin sujumattomuuksiin. Ventraalisessa radastokokonaisuudessa puolestaan oikean hemisfäärin IFOF selittää puheen tyypillisten sujumattomuuksien määrää, kun otetaan huomioon sukupuolten välinen vaihtelu. Pojilla yhteyden havaittiin olevan positiivinen ja tytöillä negatiivinen. Vasenta hemisfääriä tarkasteltaessa ei havaittu radastojen selittävän sujumattomuuksia, mutta sen sijaan sukupuoli selitti puheen tyypillisten sujumattomuuksien määrää. Sukupuolen vaikutuksen tarkemmassa tarkastelussa pojilla havaittiin keskimääräisesti enemmän tyypillisiä sujumattomuuksia kuin tytöillä.

Tämän tutkimuksen tulokset antavat viitteitä siitä, että aivojen valkean aineen radastojen integriteetti on yhteydessä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Lisää tutkimusta kuitenkin tarvitaan tarkemman syy-seuraussuhteen selvittämiseksi. Jatkotutkimuksessa olisi mielekästä tarkastella integriteetin ominaisuuksia sen muillakin parametreilla ja useammassa eri kielellisessä radastossa laajemman kokonaiskäsityksen saavuttamiseksi.

Asiasanat: puheen tyypilliset sujumattomuudet, valkean aineen radastot, diffuusiotensorikuvantaminen, integriteetti

## **SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b> .....	1
1.1 Puheen tyypillinen sujumattomuus .....	2
1.2 Aivojen mikrostruktuurialisten rakenteiden ja yhteyksien osallistuminen puheen prosessointiin.....	5
1.2.1 Dorsaalinen radastokokonaisuus .....	6
1.2.2 Ventraalinen radastokokonaisuus .....	7
1.2.3 Aivojen valkean aineen integriteetti .....	9
1.3 Aivojen valkean aineen integriteetin ja kielellisen prosessoinnin yhteys .....	12
<b>2 TUTKIMUSKYSYMYKSET</b> .....	14
<b>3 MENETELMÄT</b> .....	15
3.1 Aineisto .....	15
3.2 Tutkittavat .....	15
3.3 Tutkimuksen eettisyys.....	18
3.4 Puheen sujuvuuden mittaaminen.....	19
3.5 Fraktionaalinen anisotropia integriteetin mittarina .....	20
3.6 Aineiston tilastolliset analyysit .....	21
<b>4 TULOKSET</b> .....	26
<b>5 POHDINTA</b> .....	30
<b>LÄHTEET</b> .....	36
<b>LIITTEET</b> .....	42

# 1 JOHDANTO

Tässä pro gradu -tutkielmassa selvitämme aivojen dorsaalisen ja ventraalisen valkean aineen radastokokonaisuuden integriteetin yhteyttä 5-vuotiaiden puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Puheen tyypillisillä sujumattomuuksilla, joita kutsutaan myös termillä *maze*, tarkoitetaan puheessa esiintyviä toistoja sekä interjektioita ja itsekorjauksia (Ambrose & Yairi, 1999; Kaur ym., 2016). Erityisesti lapsuudessa ilmenevien puheen tyypillisten sujumattomuuksien esiintymiseen ajatellaan vaikuttavan motorinen oppiminen, puheen ja kielen kehitys tai muu kehitykseen tai ympäristöön liittyvä tekijä (Guitar, 2019, s. 131). Tyypillisten sujumattomuuksien taustatekijät ovat vielä epäselviä, joten on mielekästä tarkastella aivorakenteiden yhteyttä niihin. Aivojen valkean aineen radastojen ja tyypillisten sujumattomuuksien yhteyden tutkiminen on keskeistä myös siksi, että sujumattomuudet ovat osa jokaisen lapsen kielen kehitystä, minkä vuoksi tutkimus tarjoaa merkityksellistä tietoa radastojen kypsymisen ja kielen kehityksestä.

Kielen kehityksen neuraalista taustaa funktionaalisen, eli toiminnallisen, anatomian näkökulmasta on pyritty ymmärtämään yhä enemmän kuvantamislaitteiston kehittyessä (Hickok & Poeppel, 2004; Tremblay & Dick, 2016). Aiemman käsityksen siitä, että kielen prosessointi tapahtuu vasemmalla hemisfäärillä, haastoivat Hickok ja Poeppel (2007) ehdottaen kahden reitin mallia (engl. *dual-stream model*), jossa prosessointi tapahtuu molemmissa hemisfääreissä rinnakkain. Tässä mallissa aivojen valkean aineen radastot muodostavat radastokokonaisuuksilla dorsaalisen ja ventraalisen reitin, jotka osallistuvat eri puheen prosessoinnin osa-alueisiin (Hickok & Poeppel, 2007; Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 30). Vahvasti vasemmalle hemisfäärille painottuvan dorsaalisen reitin on esitetty osallistuvan puheen tuottoon yhdistäen auditorisen ja motorisen tiedon edustumat (Dick ym., 2014; Hickok & Poeppel, 2007; Saur ym., 2008). Molemmille hemisfääreille paikallistuvan ventraalisen reitin on esitetty osallistuvan puheen ymmärtämisen prosessiin yhdistämällä kuullut äänteet merkityksiin (Dick ym., 2014; Hickok & Poeppel, 2007).

Näitä radastokokonaisuuksia tulemme tutkimuksessamme tarkastelemaan aivojen valkean aineen integriteetin eli eheyden fraktionaalisella anisotropialla (engl. *fractional anisotropy*, FA), joka saadaan magneettikuvantamiseen (engl. *Magnetic Resonance Imaging*, MRI) pohjautuvalla diffuusitensorkuvantamismenetelmällä (engl. *Diffusion Tensor Imaging*, DTI) (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 36). Integriteetti kehittyy valkean aineen radastojen kypsyessä saavuttaen huippunsa noin 30–50-vuotiaana, jonka jälkeen se kääntyy laskuun (Yetman ym.,

2014). Radastojen valkean aineen integriteetin poikkeavuudet on yhdistetty muun muassa kielelliseen kehitykseen ja kielen kehityksen häiriöihin, minkä vuoksi onkin merkityksellistä tutkia sen yhteyttä erityisesti lasten puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin.

Radastojen valkean aineen integriteetin poikkeavuudet, sekä tyypillistä korkeammat että matalammat integriteetin arvot, on yhdistetty kielellisiin taitoihin, kuten fonologisiin prosesseihin ja lukutaitoon (Yeatman ym., 2012; Walton ym., 2018). Lisäksi on saatu viitteitä siitä, että puheen sujuvuuden häiriö, änkytys, on yhteydessä vähäisempään aivojen valkean aineen radastojen integriteettiin kielellisissä radastoissa, kun tarkastellaan FA-arvoa (Etchell ym., 2018). Tutkimusta tyypillisten eli jokaisen puheessa esiintyvien sujumattomuuksien yhteydestä aivojen valkean aineen integriteettiin ei kuitenkaan vielä ole. Aiemman änkytykseen ja muihin kielellisiin taitoihin keskittyneen tutkimuksen valossa on perusteltua olettaa, että myös puheen tyypilliset sujumattomuudet voisivat olla yhteydessä aivojen valkean aineen integriteettiin. Tässä tutkimuksessamme tarkastelemme sitä, ennustaako ventraalisen tai dorsaalisen radastokokonaisuuden integriteetti, FA-arvolla mitattuna molemmissa hemisfääreissä, 5-vuotiaiden lasten puheen tyypillisiä sujumattomuuksia. Tutkimuksen uutuusarvo on merkittävä, sillä aiheesta ei ole aiempaa tutkimusta. Lisäksi tutkimus tarjoaa erityislaatuista tietoa suomenkielisistä lapsista tarkassa ikäpisteessä, jolloin sekä radastojen integriteetin määrän että kielen kehityksen tasoa voidaan pitää tasaisena.

## **1.1 Puheen tyypillinen sujumattomuus**

Puheen sujuvuuden määrittely on hankalaa ja usein se määritelläänkin sen vastakohtaan, sujumattomuuden, kautta (Guitar, 2019, s. 7). Sujuvuutta määrittelee puheen tauot, rytmi, intonaatio, painotukset ja nopeus sekä informaation välittyminen (Starkweather, 1980, 1987, Guitarin kirjassa, 2019, s. 7–8). Sujuvuutta voidaan kuvailla yksinkertaisesti vaivattomana puheen virtana. Puheessa esiintyvä sujumattomuus voi olla tyypillistä tai änkytykseen liittyvää (Guitar, 2019, s. 5). Tyypillisillä sujumattomuuksilla tarkoitetaan jokaisen tyypillisesti kehittyvän lapsen puheessa esiintyviä sujumattomuuksia. Änkytys on puolestaan puheen sujuvuuden häiriö, jota määrittää epätyypillinen puheen rytmi ja nopeus sekä sekundääriset piirteet eli välttelykäyttäytyminen ja myötäliikkeet (American Speech-Language-Hearing Association [ASHA], 1993; Guitar, 2019, s. 9–10).

Puheen sujumattomuudet voidaan luokitella tyypillisiin sujumattomuuksiin ja änkytyksen kaltaisiin sujumattomuuksiin (Ambrose & Yairi, 1999). Tyypillisiin sujumattomuuksiin

luokitellaan fraasin toistot, monitavuisten sanojen toistot, itsekorjaukset ja interjektiot eli huudahduspartikkelit. Näistä yleisimpiä esiintymismuotoja ovat interjektiot, itsekorjaukset ja monitavuisten sanojen toistot (Guitar, 2019, s. 133). Änkytyksen kaltaisia sujumattomuuksia ovat äänten ja tavun toistot, yksitavuisten sanojen toistot, venytykset (engl. *prolongations*) ja lukot (engl. *blocks*) (Ambrose & Yairi, 1999). Sujuvasti puhuvien lasten puheessa esiintyy sekä tyypillisiä sujumattomuuksia että änkytyksen kaltaisia sujumattomuuksia, mutta ei kuitenkaan lukkoja. Sujumattomuuksien luokittelua tyypillisiin ja änkytyksen kaltaisiin sujumattomuuksiin on avattu taulukossa 1.

## Taulukko 1

*Sujumattomuuksien luokittelu (Ambrose & Yairi, 1999). Esimerkit mukailevat Jansson-Verkasalo ja kumppaneiden (2021) artikkelia.*

	Sujumattomuus	Esimerkki
Tyypilliset sujumattomuudet	Fraasin toisto	<i>Minä haluan minä haluan kanin</i>
	Monitavuisten sanojen toisto	<i>Ehkä ehkä</i>
	Itsekorjaukset	<i>Kani hyppäsi loikkasi pensaaseen</i>
	Interjektiot	<i>Tykkäätkö sinä mmmm kissoista</i>
Änkytyksen kaltaiset sujumattomuudet	Äänten, tavun tai sanan osan toisto	<i>Ki-ki-kissa</i>
	Yksitavuisten sanojen toisto	<i>Tai tai</i>
	Venytykset	<i>Kkkissa keeehrää</i>
	Lukot ja sanakatkokset <sup>a</sup>	<i>...kissa, ka...ni</i>

<sup>a</sup>= Ei esiinny puheen tyypillisissä sujumattomuuksissa

Tyypillisessä puheessa esiintyvät sujumattomuudet erotellaan yleensä änkytyksestä sen perusteella, kuinka paljon sujumattomuuksia puheessa esiintyy, esiintyykö lukkoja sekä arvioimalla liittyykö sujumattomuuksiin negatiivisia tunteita tai asenteita ja sekundäärisiä piirteitä (Guitar, 2019, s. 149). Sekundääriset piirteet liittyvät änkytykseen ja niillä tarkoitetaan Guitarin (2019, s. 9–10) mukaan välttelykäyttäytymistä sekä myötäliikkeitä, kuten

päännyökkäystä. Tyypilliseen sujumattomuuteen ei liity sekundäärisiä käyttäytymismalleja eikä negatiivisia ajatuksia tai asenteita, ja yleensä puhuja ei ole sujumattomuuksistaan tietoinen (Guitar, 2019, s. 149). Sujumattomuuksien määrä ajatellaan tyypilliseksi, kun niitä esiintyy puheessa kymmenen tai alle kymmenen sadassa sanassa.

Tyypilliset sujumattomuudet kuuluvat jokaisen puheeseen ja erityisesti lapsuudessa voi vaihdella paljonkin, miten paljon puheessa esiintyy sujumattomuuksia (Guitar, 2019, s. 130–131). Tyypillisessä kehityksessä lapsen kieli kehittyy nopeasti varhaislapsuudessa (esim. Feldman, 2019) ja Guitarin (2019, s. 127) mukaan tyypillisiä sujumattomuuksia esiintyykin eniten noin 2–6-vuotiailla, kun lapsi vielä opettelee puhetta ja kieltä vuorovaikutuksessa. On havaittu, että puheen tyypillisiä sujumattomuuksia esiintyy pojilla enemmän kuin tytöillä alle alakouluikäisenä (Tumanova ym., 2014). Tyypilliset sujumattomuudet yhdistetäänkin usein kielen kehitykseen, motoriseen oppimiseen ja muuhun kehityksellisiin tai ympäristötekijöihin liittyviin seikkoihin (Guitar, 2019, s. 127). Esimerkiksi kielen kehityksen vaatimukset, tehoton puhemotorinen kontrolli, stressi ja innostuminen voivat lisätä sujumattomuuksia (Guitar, 2019, s. 134). On muun muassa havaittu, että sujumattomat ilmaisut ovat tyypillisesti pidempiä ja monimutkaisempia kuin sujuvat ilmaisut (Yaruss ym., 1999).

Kielellisten taitojen yhteydestä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin on siis jo aiempaa tutkimusta, mutta aivojen mikrostruktuurallisten rakenteiden yhteyttä sujumattomuuksiin ei ole vielä selvitetty. Toisaalta änkytyksen ja valkean aineen integriteetin yhteydestä on jo tutkimusnäyttöä (Etchell ym., 2018). On saatu viitteitä siitä, että henkilöillä, jotka änkyttävät, on vähäisempi integriteetti, kielelliseen prosessointiin osallistuvissa radastoissa, verrattuna tyypillisesti puhuviin. Siksi onkin mielekästä tutkia, voisiko puheen tyypillisillä sujumattomuuksilla olla yhteys valkean aineen integriteetin poikkeavuuksiin.

## 1.2 Aivojen mikrostruktuuristen rakenteiden ja yhteyksien osallistuminen puheen prosessointiin

Ihmisen keskushermosto, eli aivot ja selkäydin, koostuu kahdesta kudostyyppistä: valkeasta aineesta (engl. *white matter*) ja harmaasta aineesta (engl. *grey matter*), jotka ovat erotettavissa magneettikuvauksella (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 30). Tutkimuksessamme tarkastelun kohteena oleva aivojen valkea aine on gliasoluista koostuvaa rasvapitoista myeliinia, joka on muodostunut aksonien ympärille. Valkea aine sijaitsee aivokuoren alapuolisilla alueilla, eli subkortikaalisilla alueilla, muodostaen pitkiä myelinisoituneita aksonikimppuja, joita kutsutaan valkean aineen radastoiksi. Myeliinikerroksen avulla informaatio kulkeutuu aivoissa tehokkaammin pidempiä etäisyyksiä eri aivoalueille ja aivokurkiaisien kautta hemisfääriltä toiselle. Aivojen valkean aineen mahdollistama tehokkaampi tiedonsiirto onkin todennäköisesti keskeinen myös kielellisessä prosessoinnissa.

Klassisten teorioiden mukaan puheen prosessointi tapahtuu aivoissa vasempaan hemisfääriin painottuen tietyillä aivoalueilla. Pitkään valloillaan olleet käsitykset puheen tuoton ja ymmärtämisen toimintojen sijoittumisesta aivoihin esittivät jo 1800-luvun loppupuolella Broca (1861) ja Wernicke (1874). Brocan (1861) mukaan myöhemmin nimetty aivoalue vasemmalla hemisfäärillä havaittiin osallistuvan puheen tuottoon, kun taas Wernicken (1874) mukaan nimetty aivoalue havaittiin osallistuvan puheen ymmärtämiseen. Nykyisin näitä klassikkoteorioita on kuitenkin haastettu, koska ne ovat yksinkertaistettuja ja osittain riittämättömiä malleja puheen prosessoinnista (esim. Tremblay & Dick, 2016). Myöhemmin on havaittu, että puheen prosessointiin osallistuu aivoalueita sekä radastoja molemmista hemisfääreistä (esim. Hickok & Poeppel, 2007).

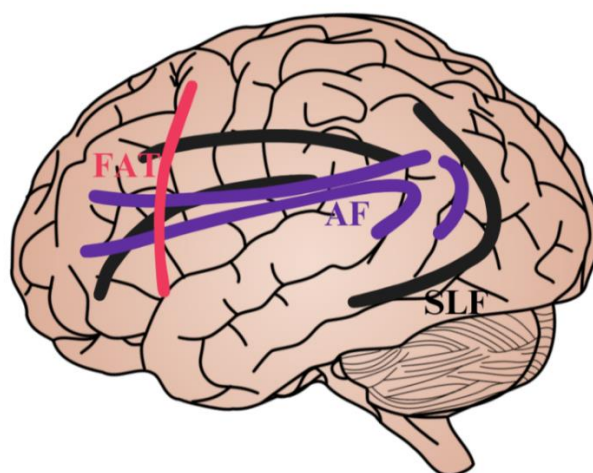
Hickok ja Poeppel (2007) ehdottavatkin, että puheen prosessointia voidaan kuvata kahden reitin mallilla, jossa valkean aineen radastot muodostavat kaksi radastokokonaisuutta eli reittiä: dorsaalisen ja ventraalisen reitin. Malli eroaa aiemmista teorioista siten, että äänen prosessointia tarkastellaan vasemman hemisfäärin sijaan rinnakkain molemmissa hemisfääreissä. Reiteistä dorsaalisen reitin oletetaan osallistuvan pääasiallisesti puheen tuoton prosessiin ja ventraalisen reitin puolestaan puheen ymmärtämiseen. Vaikka puheen prosessointiin osallistuvat neurobiologiset taustamekanismit ovat vielä epäselvät, tässä tutkielmassa prosessointia tarkastellaan nykykäsityksen mukaisesti radastojen dorsaali- ja ventraali-jaottelun näkökulmasta.

### 1.2.1 Dorsaalinen radastokokonaisuus

Dorsaalinen reitti, joka kulkee dorso-posteriorisesti, sijaitsee vahvasti vasemmalle hemisfäärille painottuen otsalohkon takaosassa, ohimolohkon taemmassa dorsaaliosassa ja parietaalisessa aivokannessa (engl. *Operculum*) (Hickok & Poeppel, 2004; Hickok & Poeppel, 2007). Dorsaalinen reitti osallistuu erityisesti puheen tuottoon yhdistäen auditorisen (foneemisen) ja motorisen tiedon edustumat (Dick ym., 2014; Saur ym., 2008). Tämän radastokokonaisuuden pääradastoja ovat *Superior Longitudinal Fasciculus* (SLF) ja *Arcuate Fasciculus* (AF), jotka yhdistävät ohimo- ja alemman päälakilohkon otsalohkoon (Dick ym., 2014; Saur ym., 2008). Näiden pääradastojen lisäksi *Frontal Aslant Tract* (FAT), on puheen prosessointiin osallistuva, dorsaaliseen radastokokonaisuuteen kuuluva, valkean aineen radasto, joka yhdistää ylemmän ja alemman otsalohkon aivopaimut (engl. *Inferior Frontal Gyrus*, IFG; *Superior Frontal Gyrus*, SFG) (Kargar & Jalilian, 2024). Dorsaalisen radastokokonaisuuden pääradastoja on havainnollistettu kuvassa 1.

#### Kuva 1

*Dorsaalisen radastokokonaisuuden pääradastot. Radastot piirretty kuvaan Kargar & Jalilian (2024) kuvaa mukailten. ([Human-brain-vector.svg]. (ei pvm.). Wikimedia Commons. Haettu 27.11.2024, [<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human-brain-vector.svg#file>])*



AF = Arcuate Fasciculus, FAT = Frontal Aslant Tract, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus

SLF:stä, joka yhdistää superiorista ja inferiorista parietaalista aivokuorta otsalohkoon, voidaan erotella neljä osaa: SLF I, SLF II, SLF III ja temporaali-parietaalinen päätepiste (Kargar & Jalilian, 2024). Erityisesti SLF:n alueet II ja III on yhdistetty kielen prosessointiin. Kargarin ja Jalilian (2024) systemaattisen kirjallisuuskatsauksen mukaan SLF osallistuu laajasti eri puheen prosessoinnin osa-alueisiin kuten motoristen toimintojen säätelyyn, leksikaalisten edustumien yhdistämiseen foneemeiksi, fonologisten koodien yhdistämiseen motoriseen suunnitteluun, fonologisen tiedon säilyttämiseen työmuistissa ja kuulonvaraiseen toistamiseen. Lisäksi se on yhdistetty sanaston kehittymiseen, fonologiseen tietoisuuteen, sanan tuottoon, lukemiseen sekä syntaktiseen prosessointiin. SLF:n eheyden fraktionaalista anisotropiaa tarkasteltaessa on sen havaittu ennustavan sekä tuottavaa että ymmärtävää kieltä 5–17-vuotiailla lapsilla ja nuorilla (Urger ym., 2015).

Toinen dorsaalisen radastokokonaisuuden pääradastoista, AF, yhdistää taemman ylemmän temporaalisen aivokuoren alempaan IFG:een ja ventraaliseen premotoriseen aivokuoreen (Kargar & Jalilian, 2024). Tätä valkean aineen radastoa pidetään tunnetuimpana puheen prosessointiin osallistuvana radastona (Smits ym., 2014). AF osallistuu kielen ymmärtämiseen ja tuottamiseen sekä lukemiseen, sensomotoriseen kartoittamiseen, fonologiseen prosessointiin ja hierarkkiseen prosessointiin syntaktissa (Kargar & Jalilian, 2024). Lisäksi se on yhdistetty foneemien tai äänteiden, semantiikan ja puheen sujuvuuteen. Dorsaaliseen radastokokonaisuuteen on myös myöhemmin yhdistetty FAT, jonka on tutkittu muiden radastojen lisäksi osallistuvan kielelliseen prosessointiin.

Dorsaalisen radastokokonaisuuden radastot osallistuvat siis moninaisesti kielelliseen prosessointiin. Koko dorsaalista radastokokonaisuutta aktivoiva tehtävä on esimerkiksi puheen toistaminen, joka aktivoi ylempiä temporaalisia ja premotorisia alueita, jotka pitävät sisällään AF- ja SLF-radastot (Saur ym., 2008). Aiemman tutkimustiedon perusteella dorsaalisten radastojen integriteetin voidaan olettaa olevan yhteydessä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin.

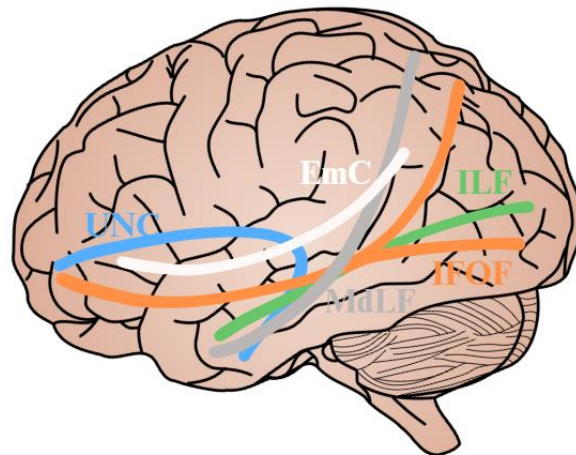
### **1.2.2 Ventraalinen radastokokonaisuus**

Ventraalinen reitti, joka kulkeutuu ventro-lateraalaisesti, sijoittuu molemmille hemisfääreille ohimolohkon ylä- ja keskiosiin (Hickok & Poeppel, 2004; Hickok & Poeppel, 2007). Reitti sisältää kortikaalisia alueita ylemmästä temporaaliluurteesta (engl. *Superior Temporal Sulcus*, STS) sekä posteriorisella ohimolohkolla sijaitsevista keskimmaisista temporaalipoimuista (engl. *Middle Temporal Gyrus*, MTG) ja alemmista temporaalipoimuista (engl. *Inferior*

*Temporal Gyrus*, ITG) (Hickok & Poeppel, 2004). Ventraalisen reitin ajatellaan osallistuvan kultujen äänteiden yhdistämiseen merkityksiin tai yksinkertaisempien syntaktisten rakenteiden prosessointiin (Dick ym., 2014). Ventraalisen reitin pääradastoja ovat *Uncinate Fasciculus* (UNC), *Inferior Longitudinal Fasciculus* (ILF), *Inferior Fronto-Occipital Fasciculus* (IFOF), *Extreme Capsule* (EmC) ja *Middle Longitudinal Fasciculus* (MdLF). Ventraalisen radastokokonaisuuden pääradastojen sijaintia on havainnollistettu kuvassa 2.

## Kuva 2

*Ventraalisen radastokokonaisuuden pääradastot. Radastot piirretty kuvaan Kargar & Jalilian (2024) kuvaa mukaillen. ([Human-brain-vector.svg]. (ei pvm.). Wikimedia Commons. Haettu 27.11.2024, [<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human-brain-vector.svg#file>])*



EmC = Extreme Capsule, IFOF = Inferior Fronto-Occipital Fasciculus, ILF = Inferior Longitudinal Fasciculus, MdLF = Middle Longitudinal Fasciculus, UNC = Uncinate Fasciculus

UNC yhdistää aivojen ohimolohkojen etuosat orbitofrontaaliseen korteksiin (Kargar & Jalilian, 2024). Se on liitetty erityisesti semanttiseen prosessointiin (Von Der Heide ym., 2013), mutta sen merkitys kielellisessä prosessoinnissa on vielä epäselvä (Dick ym., 2014). Lisäksi se on yhdistetty tunnettujen henkilöiden kasvojen ja objektien nimeämiseen, muistiin ja oppimiseen, kielihäiriöihin ja kategoriasujuvuuteen (engl. *category fluency performance*), lukutaitoon ja fonologiseen dekodeeraukseen sekä semanttisleksikaaliseen hakuun ja kontrolliin (Kargar & Jalilian, 2024).

ILF yhdistää takaraivokorteksin ohimolohkon etuosiin, kun taas IFOF yhdistää otsalohkon takaraivolohkoon ja ohimolohkoon. Näiden radastojen on tutkittu osallistuvan muun muassa

kuullun ymmärtämiseen, lukemiseen ja kirjoittamiseen sekä tunnettujen ihmisten nimeämiseen. Näiden lisäksi ILF:n ja IFOF:n on havaittu osallistuvan kuvien nimeämiseen, semanttisleksikaaliseen kartoittamiseen ja semanttiseen kontrolliin. Shekari ja Nozari (2023) katsauksessaan kertovat myös, että tutkimustulokset viittaavat siihen, että IFOF:lla on mahdollisesti merkittävä rooli tuottavassa kielessä ja ILF:lla ymmärtävässä kielessä.

Lisäksi ventraaliseen radastokokonaisuuteen kuuluvat EmC ja MdLF, joiden on myös havaittu osallistuvan moninaisesti kielellisiin toimintoihin (Kargar & Jalilian, 2024). EmC on muun muassa yhdistetty puheen sujuvuuteen ja verbaaliseen työmuistin toimintaan ja MdLF kielen tuoton aikaiseen semanttisleksikaaliseen mieleen palauttamiseen. Ventraalisen radastokokonaisuuden radastojen on havaittu olevan yhteydessä monin tavoin kielelliseen prosessointiin, kuten puheen sujuvuuteen, joten niiden integriteetti voisi mahdollisesti olla yhteydessä myös puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin.

### **1.2.3 Aivojen valkean aineen integriteetti**

Aivojen valkean aineen radastoista voidaan tutkia eri rakenteellisia ominaisuuksia, kuten niiden volyymia eli kokonaismäärää, pituutta ja integriteettiä (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 36). Valkean aineen integriteetillä tarkoitetaan radaston eheyttä eli anisotropiaa (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 36). On havaittu, että integriteetti ei ole vakaa läpi elämän, sillä se kehittyy keski-ikään saakka, 30–50-vuotiaaksi, minkä jälkeen se vähenee (Yetman ym., 2014). Radastojen myelinisaation on arvioitu olevan aktiivisimmillaan ensimmäisen kahden elin vuoden aikana, jonka jälkeen myelinisaatio hidastuu (Lebel & Deoni, 2018). Valkean aineen integriteetin muutokset eivät kuitenkaan ole identtisiä eri radastoissa, vaan joidenkin radastojen eheys on toisia vakaampaa (Yang ym., 2016; Yeatman ym., 2014).

Tieteellisessä sekä kiirettömässä kliinisessä tutkimuksessa radastojen integriteettiä tarkastellaan magneettikuvantamiseen perustuvalla diffuusiotensorikuvantamisella (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 36). Magneettikuvantaminen on struktuurallinen eli rakenteellinen aivokuvantamismenetelmä, joka kykenee erottelemaan aivojen rakenteiden sekä radastojen anatomisia piirteitä noninvasiivisesti sekä ilman säderasitusta (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 36). Sen erotuskyky perustuu vety-ytimien tarkkaan sijaintiin aivokudoksessa, joka saadaan aikaan tutkittavan päätä ympäröivästä voimakkaasta magneettikentästä.

Magneettikenttä vaikuttaa ihmiskehon vetyatomeihin niiden perusominaisuuden, spinin, kautta. MRI-laitteiston magneettikenttä saa vety-ytimet pyörimään joko magneettikentän kanssa yhdensuuntaisesti tai sitä vastaan. MRI-laitteissa käytetään kolmea erityyppistä magneettia, joita ovat kestopagneetti, resistiivinen magneetti ja suprajohtava magneetti (Carr ym., 2022). Magneettisen kentän voimakkuutta eli magneettivuon tiheyttä (engl. *magnetic flux density*) mitataan tesloina (T) tai gauseina (G). Tyypillisesti magneettikentän voimakkuus on käytetyissä MRI-laitteistoissa 1.5 tai 3 teslaa (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 36).

Päämagneetin lisäksi MRI-laitteessa on kolme heikompaa gradienttimagneettia, joiden avulla voidaan tehdä spatiaalista paikantamista ja ne mahdollistavat myös kuvien visualisoinnin viipalekuvilla jokaisessa kehon tasossa. Kolmantena pääkomponenttina MRI-laitteistossa on laite, jota käytetään radiotaajuisten pulssien lähettämiseen ja vastaanottamiseen. Laitteen lähettämä värähtely saa vety-ytimien protonit imemään energiaa ja kääntymään magneettikenttään nähden, ja kun värähtely sammutetaan, vapauttavat protonit energiaa ja palaavat takaisin linjaan magneettikentän kanssa. Vastaanotinkela (engl. *receiver coil*) mittaa vapautunutta energiaa ja aikaa, joka kuluu vety-ytimien takaisin palaamiseen ja nämä tiedot käsitellään tietokoneohjelmistolla ja muunnetaan kuviksi. Tällä menetelmällä muodostuu kaksi- tai kolmiulotteinen leikekuvasarja tutkituista anatomisista alueista tai radastoista. Leikekuvasarjan tarkkuus erotuskyvyltään on 0,14–1 mm.

Magneettikuvantamiseen perustuvalla diffuusiotensorikuvauksella voidaan tarkastella entistä tarkemmin valkean aineen radastojen eri ominaisuuksia. Tämä hienorakenteita erotteleva tekniikka on varsin uusi, sillä sitä on käytetty radastojen yhteyden tutkimiseen ensimmäisen kerran vuonna 1999 (Conturo ym., 1999). Diffuusiotensorikuvaus perustuu diffuusion eli veden lämpöliikkeen mittaamiseen eri suunnista (Särkämö & Sihvonen, 2019, s. 36). Yhteen suuntaan kohdistetun voimakkaan gradientin mittausta toistetaan kuudesta tai useammasta suunnasta (Stejskal & Tanner, 1965 Hiltunen artikkelissa, 2007). Lopuksi mittausta suoritetaan kerran ilman magneettikenttägradientteja, jotta diffuusion suuruus on mahdollista laskea.

DTI-datasta voidaan muodostaa kolmiulotteisia kuvia, joilla valkean aineen radastot pystytään paikantamaan ja visualisoimaan hermoratakartoituksella eli traktografialla (engl. *tractography*) (Hiltunen ym., 2007). Traktografia mahdollistaa aivoalueiden välisten yhteyksien ja mahdollisten poikkeavuuksien tarkastelun laajemmissa kokonaisuuksissa (Hiltunen ym., 2007; Valanne & Brander, 2013). Toisaalta traktografia ei välttämättä havaitse kaikista pienimpiä poikkeavuuksia, jolloin suositellaan käyttämään *Region Of Interest* -mittausta (ROI) (Valanne

& Brander, 2013). ROI-mittauksessa tutkittava alue rajataan halutun muotoiseksi ja kokoiseksi, mikä mahdollistaa poikkeavuuksien tarkemman tarkastelun.

Integriteettiä ja sen ominaisuuksia tarkastellaan tyypillisesti sen parametrien avulla, joita ovat FA, aksiaalinen diffuusio (engl. *Axial Diffusivity*, AD), keskimääräinen diffuusio (engl. *Mean Diffusion*, MD) ja radiaalinen diffuusio (engl. *Radial Diffusivity*, RD) (Op de Beeck & Nakatani, 2019, s. 65). Tutkimuksessamme tarkastelemme integriteetin ominaisuuksia FA:n, parametrilla, joka on eniten käytetty (O'Donnell & Westin, 2011) anisotrooppinen veden diffuusion suunnan osoittava mitta (Dobos ym., 2023). FA-arvo asettuu nollan ja yhden välille sen mukaan, onko diffuusio samansuuruista kaikissa suunnissa eli isotrooppista vai onko se eri suunnista mitattuna eri suuruista eli anisotrooppista (Op de Beeck & Nakatani, 2019, s. 65). FA:n laskukaava on kuvattu kuvassa 3.

### Kuva 3

FA:n laskukaava. Haettu 30.10.2024 <https://mriquestions.com/dti-tensor-imaging.html>

$$FA = \sqrt{\frac{(\lambda_1 - \lambda_2)^2 + (\lambda_2 - \lambda_3)^2 + (\lambda_1 - \lambda_3)^2}{2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2)}}$$

Diffuusion poikkeavuudet integriteetissä voivat vaikuttaa aivojen tiedon siirron tehokkuuteen joko sitä heikentäen tai tehostaen (Bennet & Rypma 2013; Penke ym., 2012). Korkeamman integriteetin ajatellaan kertovan tehokkaammasta tiedonsiirrosta, kun taas vähäisempi integriteetti vaikuttaa tiedonsiirtoon sitä heikentäen. Valkean aineen eheyden taustalla on moninaisia geneettisiä (Luo ym., 2021), kehityksellisiä ja ympäristöllisiä tekijöitä (Roos ym., 2022). Korkeampi integriteetti FA-arvoa tarkasteltaessa on yhdistetty lapsilla muun muassa non-verbaaliseen älykkyyteen ja visuospatiaalisiin kykyihin (Muetzel ym., 2015) ja parempaan aerobiseen kuntoon (Chaddock-Heyman ym., 2014). Koska aiempi tutkimus on havainnut integriteetin poikkeavuuksien vaikuttavan aivojen tiedon siirron tehokkuuteen, on radastojen integriteetin ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteyden tarkempi tarkastelu keskeistä, ja yhteyden voidaan olettaa olevan mahdollinen.

Lasten valkean aineen radastojen eheyteen on tutkitusti havaittu vaikuttavan negatiivisesti raskauden aikainen altistuminen alkoholille sekä äidin raskauden aikainen masennus (Roos

ym., 2021; Roos ym., 2022). Roos ja kumppanit (2021) havaitsivat, että äidin raskauden aikainen masennus on yhteydessä 2–3-vuotiaiden lasten suurempaan FA-arvoon, pääasiassa oikean hemisfäärin alueella, verrattuna kontrolleihin. FA:n on siis havaittu olevan yhteydessä erinäisiin tekijöihin, jotka vaikuttavat lapsen kehitykseen.

### 1.3 Aivojen valkean aineen integriteetin ja kielellisen prosessoinnin yhteys

Radastojen kypsyminen on yhdistetty laajalti eri taitojen kehittymiseen sekä puheen prosessointiin (Girault ym., 2018). Aivojen valkean aineen radastojen integriteetin yhteyttä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin ei ole kuitenkaan vielä tutkittu. Sen sijaan puheen sujuvuuden häiriön, änkytyksen, yhteydestä valkean aineen integriteettiin on laajemmin tutkimusta (Etchell ym., 2018). Etchellin ja kumppaneiden (2018) systemaattisessa kirjallisuuskatsauksessa ilmenee, että aivokuvantamistutkimuksissa on havaittu valkean aineen integriteetin poikkeavuuksia henkilöillä, jotka änkyttävät. Useimmiten ryhmäeroja änkyttävien ja ei-änkyttävien aikuisten välillä osoittaa vähäisempi FA vasemmassa hemisfäärissä. Lisäksi esimerkiksi lapsilla, jotka änkyttävät, on havaittu FA-arvojen olevan alhaisempia vasemmassa SLF:ssa. Onkin siis mielekästä tarkastella sitä, havaitaanko samansuuntaisia tuloksia puheen sujuvuuden ja valkean aineen eheyden yhteyttä tarkasteltaessa.

Radastojen integriteetin on havaittu olevan yhteydessä myös tyypillisesti kehittyvien lasten muihin kielellisiin taitoihin kuten fonologisiin prosesseihin, lukutaitoon sekä tuottavaan ja ymmärtävän kieleen (Dubner ym., 2020; Girault ym., 2018; Sket ym., 2019; Walton ym., 2018; Yeatman ym., 2012). Jo vastasyntyneillä on pystytty havaitsemaan, että korkeampi FA-arvo aivokurkiaisessa (engl. *corpus callosum*) ja vasemman hemisfäärin fronto-parietaalisessa AF:ssa olisivat yhteydessä positiivisesti myöhempään ymmärtävään (engl. *receptive*) kieleen vuoden ikäisenä (Sket ym., 2019). Saman suuntaisia viitteitä on havaittu myös pitkittäistutkimuksessa lapsen ensimmäisen elinvuoden aikana tutkittujen radastojen integriteettien yhteydestä kognitiivisten taitojen kehittymiseen yhden vuoden ja kahden vuoden ikäisenä (Girault ym., 2018).

Kielellisten taitojen yhteyttä kaksivuotiaiden valkean aineen integriteettiin tutkineet Dubner ja kumppanit (2020) puolestaan saivat viitteitä siitä, että FA-arvo vasemmassa ILF:ssa on positiivisesti yhteydessä kielellisiin taitoihin. FA-arvo aivokurkiaisessa okkipitaalisessa osassa (engl. *occipital segment of the corpus callosum*, CC-Occ) on havaittu taas olevan negatiivisesti yhteydessä kielellisiin taitoihin. Walton ja kumppanit (2018) tutkivat valkean aineen rakenteellista yhteyttä esikouluikäisten (3–5,6 v) kielellisiin taitoihin. Tutkimuksessa kävi ilmi,

että fonologiset prosessit korreloivat molempien hemisfäärien ventraalisen reitin radastoissa ja aivokurkiaisessa positiivisesti FA-arvoon verrattaessa, ja negatiivisesti MD-arvoon verrattaessa. Fonologisten prosessien vaikutuksesta kehittyvä lukutaito on myös yhdistetty radastojen eheyteen siten, että FA-arvo on yhteydessä lukutaidon tasoon (Yeatman ym., 2012).

Tämän tutkimuksen tarkastelun kohteena olevista dorsaalisen ja ventraalisen radastokokonaisuuksien radastojen integriteetin onkin siis havaittu olevan yhteydessä moninaisesti kielellisiin taitoihin. Dorsaalisen radastokokonaisuuden radastojen integriteetti on yhdistetty muun muassa änkytykseen (Etchell ym., 2018) ja ymmärtävään kieleen (Sket ym., 2019). Ventraalisen radastokokonaisuuden radastojen integriteetti on puolestaan yhdistetty yleisesti kielellisiin taitoihin (Dubner ym., 2020) ja fonologisiin prosesseihin (Walton ym., 2018). Täten voidaan ajatella, että radastojen integriteetti voisi olla yhteydessä myös puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin, minkä vuoksi tutkimus näiden yhteydestä voisi laajentaa tietämystä tyypillisesti kehittyvien lasten kielellisestä prosessoinnista ja radastojen integriteetin yhteydestä.

## 2 TUTKIMUSKYSYMYKSET

Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on selvittää aivojen valkean aineen integriteetin ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteyttä. Lisäksi tutkielmamme tarkastelee Dual-stream mallin (Hickok & Poeppel, 2007) luokitteleman kahden reitin, dorsaalisen ja ventraalisen, integriteettien yhteyttä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Integriteettiä tarkastellaan FA:n parametrilla huomioiden molemmat aivojen hemisfäärit. Puheen tyypillistä sujumattomuutta tarkastellaan puolestaan jatkuvana muuttujana. Tutkielman aineisto on osa FinnBrain-kohorttitutkimusta (Karlsson ym., 2018). Tutkielmamme pyrkii vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

1. Ennustaako ventraalisen radastokokonaisuuden integriteetti, FA-arvoa tarkasteltaessa molemmissa hemisfääreissä, 5-vuotiaiden lasten puheen tyypillisiä sujumattomuuksia?
2. Ennustaako dorsaalisen radastokokonaisuuden integriteetti, FA-arvoa tarkasteltaessa molemmissa hemisfääreissä, 5-vuotiaiden lasten puheen tyypillisiä sujumattomuuksia?

Hypoteesina oletamme, että 5-vuotiaiden aivojen valkean aineen integriteetti puheen prosessointiin osallistuvissa radastoissa on yhteydessä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Hypoteesit perustuvat aiempaan tutkimustietoon puheen sujumattomuuden häiriön, änkytyksen (Etchell ym., 2018) sekä kielellisten taitojen yhteydestä aivojen valkean aineen integriteettiin (Dubner ym., 2020; Girault ym., 2018; Sket ym., 2019; Walton ym., 2018; Yeatman ym., 2012).

## 3 MENETELMÄT

### 3.1 Aineisto

Tutkimuksen aineisto on osa FinnBrain-kohorttitutkimuksessa (Karlsson ym., 2018) kerättyä dataa 5-vuotiaiden MRI-kuvauksista sekä puheen ja kielen osatutkimuksen käynneiltä. Turun yliopiston vuonna 2010 käynnistämässä monitieteisessä FinnBrain-tutkimuksessa on tarkoituksena selvittää useiden vuosikymmenien ajan lasten ympäristön ja perimän vaikutusta myöhempään kehitykseen ja terveyteen. Tutkittavat perheet on rekrytoitu tutkimukseen Turusta ja sen lähialueilta sekä Ahvenanmaalta vuosina 2011–2015.

FinnBrain-tutkimus sisältää useita osatutkimuksia, joissa tutkimuskohteina ovat muun muassa lapsen ja vanhemman välinen vuorovaikutus, molekyyli-genetiikka, suolistomikrobisto, aivojen rakenne ja toiminta, stressinsäätely ja yleiset lastentaudit. Tutkimukseen on sisällytetty myös niin sanottu fokuskohortti (N = 1227), jonka tapausryhmään (engl. *case-group*) kuuluvat äidit, jotka ovat raskausaikanaan kokeneet voimakasta stressiä (masennus- ja ahdistuneisuusoireita). Voimakasta stressiä kokeneiden äitien verrokkiryhmänä ovat äidit, jotka puolestaan raportoivat matalia stressitasoja.

### 3.2 Tutkittavat

Tutkittavat (N = 82) ovat osallistuneet 5-vuotiaana puheen ja kielen osatutkimukseen (59–67 kk, ka 61,26 kk) sekä MRI-tutkimukseen (63–69 kk, ka 64,72 kk). Tutkittavilta tuli olla kerätty onnistuneesti data sekä MRI- että puheen ja kielen osatutkimuksista, koska tässä tutkimuksessa tutkittiin lapsen puheen sujuvuuden ja MRI-kuvauksella saadun datan yhteyttä.

Puheen ja kielen osatutkimuksen sisäänottokriteerinä oli, että lapsen kotikieli on suomi. Tämä tarkoittaa sitä, että lapsen on tullut käyttää ja kuulla kotona vähintään 80 % ajasta suomen kieltä. Lisäksi käynnillä tutkittiin lapsen kuulo Terveystieteiden ja Hyvinvoinnin Laitoksen (THL) kuuloseulan mukaisesti. Mikäli lapsi ei läpäisnyt kuuloseulaa, hän sai osallistua osatutkimukseen vain, jos vanhempi vahvisti lapsen kuulleen normaalisti neuvolassa toteutetussa kuuloseulassa. Tässä tutkimuksessa poissuljettiin ne tutkittavat, jotka eivät läpäisseet kuuloseulaa.

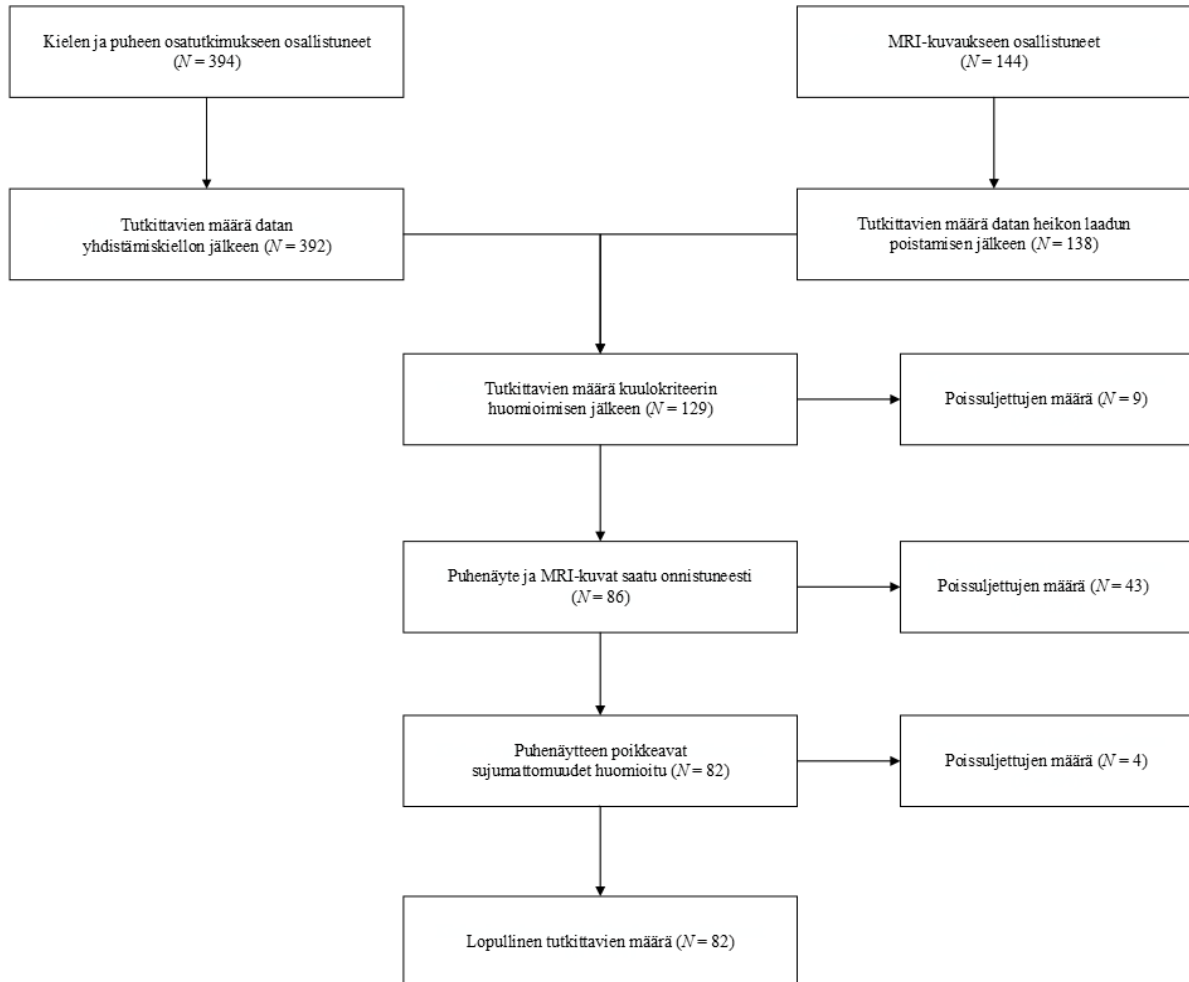
MRI-kuvauksesta saadusta datasta tuli olla saatavilla DTI-menetelmällä saatu aivojen valkean aineen integriteettiä mittaava data. MRI-kuvaukseen osallistumisen poissulkukriteereinä olivat ennen aikainen syntymä (ennen 35:tä raskausviikkoa) ja muut tavanomaiset syyt, miksi

kuvantamista ei voitu toteuttaa (Pulli ym., 2022). Muita tavanomaisia syitä on esimerkiksi metalli kehossa. Tutkittavien MRI-kuvauksen dataa tarkasteltiin myös niin, että se on riittävän laadukasta analysoitavaksi. Datan laatuun voi vaikuttaa muun muassa lapsen liikkuminen kuvantamisen aikana.

Tämän jälkeen tutkittavia tarkasteltiin tämän tutkimuksen määrittämällä poissulkukriteereillä. Nämä poissulkukriteerit ovat neurologiset sairaudet, vakavat pään vammat, puheen sujuvuuteen vaikuttava häiriö eli änkytys ja aivojen rakenteeseen tai toimintaan vaikuttavien lääkkeiden käyttäminen. Kyseiset poissulkukriteerit voivat vaikuttaa lapsen puheen sujuvuuteen tai aivojen rakenteeseen ja toimintaan, erityisesti tutkittavaan radastojen valkean aineen integriteettiin. Tiedot neurologisista sairauksista, vakavista pään vammoista ja aivojen rakenteeseen tai toimintaan vaikuttavien lääkkeiden käyttämisestä on saatu MRI-kuvantamisen yhteydessä, kun taas tieto änkytyksestä on saatu puheen ja kielen osatutkimuksen käynniltä vanhemman raportoimana. Tutkittavista poissuljettiin myös he, joilla puhenäytteessä havaittiin änkytyksen kaltaisia sujumattomuuksia enemmän kuin kolme sadassa tavussa, tyypillisiä sujumattomuuksia enemmän kuin seitsemän sadassa tavussa tai molempia sujumattomuuksia enemmän kuin kahdeksan sadassa tavussa. Lopulliseen tutkimukseen valikoitui 82 tutkittavaa, joista 37 oli poikia ja 45 tyttöjä. Tutkittavien valikoitumista tutkimukseen on kuvattu kuvaajassa 1.

## Kuvaaja 1

*Vuokaavio tutkittavien valikoitumisesta tutkimukseen.*



Tutkittavien joukossa havaittiin vaihtelua käteisyyksissä sekä jakomuuttujan jakaumassa. Vaihtelua havaittiin myös äidin sosioekonomista statusta (SES) kuvaavassa koulutustasossa. Taulukossa 2 on kuvattu aineiston muuttujien jakaumaa.

## Taulukko 2

*Luokiteltavien muuttujien jakauma.*

		N	%
Sukupuoli	tyttö	45	54,9
	poika	37	45,2
Kätisyys	oikea	74	90,2
	vasen	6	7,3
	molempikätinen	2	2,4
Jakomuuttuja	tapausryhmä	18	22
	kontrolli	35	52,7
	puuttuva tieto	29	35,4
Äidin sosioekonominen status (SES)	1.	17	20,7
	2.	21	25,6
	3.	40	48,8
	puuttuva tieto	4	4,9

1 = peruskoulu tai toinen aste, 2 = alempi korkeakoulututkinto, 3 = ylempi korkeakoulututkinto, tapausryhmä = masennusoireita raskausaikana raportoineet

### 3.3 Tutkimuksen eettisyys

Kaikilta FinnBrain-kohorttitutkimukseen osallistuvilta lapsilta sekä heidän vanhemmiltaan on kysytty kirjallinen suostumus jokaisessa osatutkimuksessa. Tutkittavilla on ollut mahdollisuus keskeyttää tai perua osallistumisensa missä tahansa vaiheessa, ja heitä sekä vanhempia on tiedotettu osallistumisen vapaaehtoisuudesta. Tutkittavista kerätty aineisto ei sisällä tunnistettavia tietoja, joten osallistujat pysyvät anonyymeinä. FinnBrain-tutkimuksessa työskentelevä henkilökunta on sitoutunut salassapitovelvollisuuteen ja tutkimusaineiston tietoturvalliseen säilyttämiseen. Aineistoa säilytetään Turun yliopistolla suojatulla verkkolevyllä ja lukollisten huoneiden takana sijaitsevilla lukollisissa kaapeissa. Lisäksi FinnBrain-tutkimuksella ja sen osatutkimuksilla on Varsinais-Suomen sairaanhoitopiiriin

eettisen lautakunnan (nykyinen Varsinais-Suomen hyvinvointialueen eettinen lautakunta) sekä Turun yliopiston eettisen toimikunnan hyväksyntä.

### 3.4 Puheen sujuvuuden mittaaminen

Puheen ja kielen osatutkimuksen käynti sisälsi puheen tuottamista ja ymmärtämistä mittaavia tehtäviä. Tutkittavilta lapsilta tuli olla onnistuneesti kerätty puhenäyte. Tässä tutkimuksessa käytetty puhenäyte on kerätty käynnillä toteutetusta leikkitilanteesta, jossa lapsi leikki tutkijan kanssa valituilla leluilla noin 20 minuutin ajan. Leikkihetken lopussa lapsen tuli kertoa nopeasti jostain jännittävästä tapahtumasta. Tämän avulla pyrittiin lisäämään tilanteeseen ulkoista painetta, jolla mahdolliset puheen sujumattomuudet tulisivat esiin. Puhenäyte nauhoitettiin Marantz-nauhurilla digitoiden näytteet 44,1 kHz taajuudella 16-bittisellä resoluutiolla. Litterointi suoritettiin ammattitason kuulokkeilla, ja näytteet analysoitiin *Systematic Analysis of Language Transcripts* (SALT) -ohjelmalla (Miller & Iglesias, 2020).

Näytteistä litteroitiin viimeiset 150 ilmaisua, joista viimeiset 300–373 sanaa koodattiin puheen sujuvuutta ilmaisevaa dataa varten. Puhenäytteisiin ei sisällytetty yksittäisiä myöntäviä tai kieltäviä sanoja, kuten kyllä tai ei, eikä epäselviä sanoja. Näytteiden jokaisesta ilmaisusta määriteltiin sanat sujuviksi tai sujumattomiksi. Sujumattomuudet luokiteltiin Ambrose ja Yairin (1999) sekä Jansson-Verkasalon ja kumppaneiden (2021) luokituksia mukaillen tyypillisiin ja änkytyksen kaltaisiin sujumattomuuksiin. Tyypillisiin sujumattomuuksiin luokiteltiin fraasien toistot, täytesanat, monitavuisten sanojen toistot, itsekorjaukset ja peruutetut ilmaukset. Änkytyksen kaltaisiin sujumattomuuksiin luokiteltiin äänneiden, tavujen ja yksitavuisten sanojen toistot, venytykset ja lukot.

Sujumattomuuksien kokonaismäärä ja tyypit laskettiin 100 tavua kohti. Näytteiden litteroinnin ja koodauksen suoritti sujuvuuden häiriöihin erikoistunut puheterapeutti kahden tehtävään koulutetun maisteritason logopedian opiskelijan kanssa. Litterointien luotettavuuden lisäämiseksi toinen puheen sujuvuuden häiriöihin erikoistunut puheterapeutti koodasi itsenäisesti vähintään 10 % muiden litteroijien näytteistä. Näytteiden sujumattomuuksien tunnistamisen reliabiliteetti oli 0,94–0,95 ja sujumattomuuksien luokittelun reliabiliteetti oli 0,88–0,93.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan puhenäytteistä koodattuja puheen tyypillisiä sujumattomuuksia sadan tavun näytteistä. Puheen tyypillisiä sujumattomuuksia on aineistossamme koodattu myös sanatasolla, mutta päädyimme tarkastelemaan tavutasoa.

Jansson-Verkasalon ja kumppaneiden (2021) mukaan tavutason tarkastelu soveltuu suomenkielisten puhenäytteiden analysointiin paremmin kuin sanatason, koska sanatason tarkastelu voi johtaa änkytyksen liialliseen diagnosointiin.

### 3.5 Fraktionaalinen anisotropia integriteetin mittarina

MRI-kuvaus pyrittiin tekemään mahdollisimman miellyttäväksi sekä lapselle että perheelle, ja heitä tiedotettiin kuvantamisesta jo etukäteen puhelimitse sekä erillisellä kotikäynnillä (Pulli ym., 2022). Tutkimuskäyntiin, jossa varsinainen kuvantaminen tapahtui, osallistui tutkimusryhmän työntekijä, vanhempi tai vanhemmat ja tutkittava lapsi. Vanhempi oli tutkijan kanssa mukana kuvantamishuoneessa koko ajan. Kaikilla tilassa olevilla oli käytössään korvatulpat tai kuulosuojaimet, kun taas tutkittavalla oli käytössään korvatulpat ja kuulokkeet. Lapsi sai seurata kuvantamisen aikana valitsemaansa piirrettyä tai elokuvaa, jonka äänet kuuluivat kuulokkeista. Kuvantaminen suoritettiin lapsen ollessa hereillä tai lääkkeettömässä luonnollisessa unessa. MRI-kuvauksen kesto oli 60 minuuttia, jonka aikana lapselle annettiin mahdollisuus keskeyttää tai lopettaa kuvantaminen tarvittaessa. Tutkittava sai keskeyttää osallistumisen missä tahansa vaiheessa kuvantamista.

Kuvantamisessa käytettiin Siemens Magnetom Skyra fit 3T –skanneria, jossa on pään ja niskan 20-kanavainen vastaanotinkela (engl. *receiver coil*) (Pulli ym., 2022). Läpivalaisut sisälsivät T1- ja T2-painotteiset kuvantamiset, lepotilan toiminnallisen magneettikuvantamisen (engl. *resting-state functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI*) sekä DTI-kuvantamisen. Tarkemmat tiedot kuvantamisprotokollasta löytyy Pullin ja kumppaneiden (2022) julkaisusta.

Aivojen valkean aineen integriteettiä kuvaavan diffuusiotensorikuvantamisen kuvat esikäsiteltiin. DTI-kuvien maskaamiseen käytettiin AutoPtx-kanavaa (engl. *pipeline*) (de Groot ym., 2013), jonka avulla laskettiin tutkittavien radastokohtaiset keskiarvot. Käsitelty data tarkistettiin myös visuaalisesti, jotta kaikki radastot ovat sijoittuneet oikein ja erottuvat harmaasta aineesta. Prosessista saatiin valkean aineen integriteetin parametrien arvoista FA-, MD- ja RD-arvoja, joista tutkimuksessamme tutkitaan FA-arvoa valikoiduissa radastoissa. Tutkimuksessamme tarkastelun kohteena on dorsaalista radastokokonaisuudesta molemmissa hemisfääreissä tutkittu valkean aineen radasto, SLF. Ventraalisesta radastokokonaisuudesta puolestaan tarkastelun kohteena ovat molemmissa hemisfääreissä tutkitut IFOF, ILF ja UNC. Kuvat tarkasti neuroradiologi, joka oli tarvittaessa yhteydessä lasten neurologiin.

### 3.6 Aineiston tilastolliset analyysit

Aineistoa tarkasteltiin suorittamalla tilastolliset analyysit IBM:n SPSS Statistics – tietokoneohjelmalla (versio 29). Tilastollisten analyysien tavoitteena on selvittää monimuuttujaisten lineaaristen regressiomallien avulla, ennustaako ventraalisen ja dorsaalisen radastojen integriteetti FA-arvoa tarkasteltaessa puheen tyypillisiä sujumattomuuksia. Päämuuttujat ovat integriteettiä kuvaava FA-arvo ja puheen tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa, joista FA-arvot ovat selittävä muuttuja ja tyypilliset sujumattomuudet on selitettävä muuttuja. Analyyseissä puheen tyypillistä sujumattomuutta käsitellään jatkuvana muuttujana. Taustamuuttujina taas ovat lapsen ikä kuukausina kuvantamishetkellä, sukupuoli, kätisyys, jakomuuttuja äidin raskauden aikaisesta masennus- ja ahdistuneisuusoireista sekä äidin koulutustaso (ks. taulukko 2). Äidin koulutustaso luokiteltiin seuraavasti: 1. peruskoulu tai toinen aste, 2. alempi korkeakoulututkinto, 3. ylempi korkeakoulututkinto.

Aluksi aineistosta selvitettiin tunnusluvut ja tarkasteltiin muuttujien jakaumia. Aineiston muuttujien normaalijakaumatestaus tehtiin suuren otoskoon vuoksi ( $N = 82$ ) Kolmogorov-Smirnov-testillä seuraaville muuttujille: puheen tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa, tutkittujen radastojen FA-arvot molemmissa hemisfääreissä ja ikä kuvantamishetkellä. Sukupuolen, kätisyyden, jakomuuttujan ja äidin koulutustason jakaumia tarkasteltiin histogrammeista. Muuttujista normaalisti jakautuneita olivat puheen tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa,  $p = .200$  ja radastoista ILF vasen,  $p = .200$ , ILF oikea,  $p = .172$ , SLF vasen,  $p = .200$ , SLF oikea,  $p = .200$ , UNC vasen,  $p = .200$  ja UNC oikea,  $p = .054$ . Muuttujista IFOF vasen,  $p = .017$ , IFOF oikea,  $p = .029$  sekä lapsen ikä kuvantamishetkellä,  $p < .001$  eivät olleet normaalisti jakautuneita. Histogrammien muotoa tarkasteltaessa havaittiin, että päämuuttujista vasemman ja oikean hemisfääriin IFOF:t olivat vasemmalle vinoja.

Päämuuttujista IFOF:t molemmissa hemisfääreissä eivät olleet normaalisti jakautuneita, joten niiden muuntamiseksi käytettiin neliömuunnosta. Muunnoksen jälkeen IFOF radastot olivat Kolmogorov-Smirnov-testin mukaan normaalisti jakautuneita: IFOF vasen,  $p = .051$ , vinous =  $-.39$  ja IFOF oikea,  $p = .091$ , vinous =  $-.68$ . Seuraavaksi tarkasteltiin taustamuuttujien yhteyttä päämuuttujiin regressiomallin rakentamista varten. Taulukossa 3 on kuvattu taustamuuttujien yhteys päämuuttujiin. Taustamuuttujista vain sukupuolella havaittiin olevan yhteys päämuuttujiin, minkä vuoksi se sisällytetään regressiomalliin päävaikutuksena. Tyttöjen ja poikien välillä havaittiin merkitsevästi eroavat FA-arvot IFOF ja ILF radastoissa sekä tyypillisissä sujumattomuuksissa. Pojilla esiintyi merkitsevästi enemmän puheen tyypillisiä sujumattomuuksia ja vähäisempiä FA-arvoja IFOF:ssa ja ILF:ssa niiden molemmissa

hemisfääreissä. Regressiomallia rakentaessa sukupuolelle ja molempien hemisfäärien IFOF ja ILF muuttujille luotiin interaktiomuuttujat huomioimaan niiden väliset yhteydet. Interaktiomuuttujat lisättään regressiomalliin selittäviksi tekijöiksi. Muita taustamuuttujia ei sisällytetä regressiomalliin, koska niillä ei havaittu tilastollisesti merkitseviä yhteyksiä päämuuttujiin.

### Taulukko 3

*Taustamuuttujien yhteys päämuuttujiin.*

	Sukupuoli		Ikä kuvantamishetkellä		Kätisyys		Jakomuuttuja		Äidin SES	
	Vertailu t(80)	<i>p</i>	Vertailu r	<i>p</i>	Vertailu U	<i>p</i>	Vertailu F(2,81)	<i>p</i>	Vertailu F(2,77)	<i>p</i>
TS/100 tavua	-2.32	.023*	.07	.532	283	.839	.90	.412	2.13	.126
IFOF vasen <sup>a</sup>	3.03	.003*	.19	.086	188	.091	.02	.981	.60	.555
IFOF oikea <sup>a</sup>	2.25	.027*	.08	.486	291	.938	1.39	.256	.59	.559
ILF vasen	2.10	.039*	.14	.196	214	.200	.06	.940	1.10	.339
ILF oikea	2.09	.040*	.04	.756	249	.463	.80	.456	.91	.409
SLF vasen	1.32	.192	.13	.253	258	.553	.35	.709	.052	.949
SLF oikea	1.00	.319	-.03	.820	266	.639	.17	.845	1.70	.198
UNC vasen	1.33	.187	.13	.231	236	.348	.07	.935	.11	.898
UNC oikea	.94	.351	.13	.245	251	.482	.58	.564	.28	.754

\*= Tilastollisesti merkitsevä  $p < .05$ , <sup>a</sup> = muunnettu muuttuja

TS/100 = Tyypilliset sujumattomuudet sadassa sanassa, IFOF = Inferior Fronto-Occipital Fasciculus, ILF = Inferior Longitudinal Fasciculus, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus, UNC = Uncinate Fasciculus

Taustamuuttujien yhteyden tarkastelun jälkeen selvitettiin aivojen valkean aineen integriteetin ja puheen tyypillisen sujumattomuuden mahdollisia korrelaatioyhteyksiä Pearsonin tulomomenttikertoimella. Korrelaatioyhteyksien tarkastelussa ei kuitenkaan havaittu minkään radaston ja sujumattomuuksien välillä tilastollisesti merkitsevää korrelaatioyhteyttä. Tästä huolimatta, tutkimuksen kohteena olevat radastot lisättiin regressiomalliin. Yhteydet on kuvattu taulukossa 4.

#### Taulukko 4

*Valkean aineen radastojen fraktionaalisen anisotropian yhteys puheen tyypilliseen sujumattomuuteen Pearsonin tulomomenttikorrelaatiokertoimella.*

	Tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa	
	Korrelaatio (r)	p
IFOF vasen <sup>a</sup>	.05	.689
IFOF oikea <sup>a</sup>	-.02	.843
ILF vasen	-.04	.735
ILF oikea	.05	.657
SLF vasen	.004	.971
SLF oikea	.20	.067
UNC vasen	.08	.460
UNC oikea	.08	.457

<sup>a</sup> = muunnettu muuttuja

IFOF = Inferior Frontal Fasciculus, ILF = Inferior Longitudinal Fasciculus, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus, UNC = Uncinate Fasciculus

Seuraavaksi tutkittiin radastojen välisiä korrelaatioyhteyksiä Pearsonin tulomomenttikorrelaatiokertoimia tarkastelemalla. Nämä korrelaatiot löytyvät taulukosta 5. Tarkastelussa havaittiin, että radastojen integriteetit korreloivat tilastollisesti merkitsevästi toistensa kanssa, minkä vuoksi radastoja päätettiin tutkia hemisfäärikohtaisesti rakentamalla kaksi regressiomallia.

## Taulukko 5

Radastojen keskinäinen yhteys FA-arvoa verratessa Pearsonin korrelaatiokertoimella.

	IFOF vasen <sup>a</sup>	IFOF oikea <sup>a</sup>	ILF vasen	ILF oikea	SLF vasen	SLF oikea	UNC vasen	UNC oikea
IFOF vasen <sup>a</sup>	1							
IFOF oikea <sup>a</sup>	.74*	1						
ILF vasen	.82*	.61*	1					
ILF oikea	.62*	.84*	.58*	1				
SLF vasen	.53*	.44*	.57*	.40*	1			
SLF oikea	.51*	.59*	.47*	.56*	.58*	1		
UNC vasen	.53*	.37*	.44*	.19	.44*	.32*	1	
UNC oikea	.69*	.56*	.46*	.48*	.43*	.37*	.63*	1

\*= Korrelaatio tilastollisesti merkitsevä  $p < .05$ , <sup>a</sup> = muunnettu muuttuja

IFOF = Inferior Frontal Fasciculus, ILF = Inferior Longitudinal Fasciculus, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus, UNC = Uncinate Fasciculus

Parhaimman mahdollisen regressioanalyysin saamiseksi muodostettiin kaksi erillistä regressiomallia, joissa hyödynnettiin taaksepäin askeltavaa poistomenetelmää. Menetelmä poistaa muuttujia saavuttaakseen regressiomallin, jolla on paras mahdollinen selitysaste. Radastojen FA-arvot keskitettiin regressiomallien multikollineaarisuuden vähentämiseksi. IFOF:n ja ILF:n keskitetyistä muuttujista luotiin myös sukupuolen interaktiomuuttujat aiemman havaitun yhteyden vuoksi. Molemmissa regressiomalleissa taaksepäin askeltavaan poistomenetelmään valittiin selitettäväksi muuttujaksi puheen tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa. Selittäviksi muuttujiksi puolestaan asetettiin ensimmäiseen malliin vasemman hemisfäärin radastojen FA-arvot sekä sukupuolen interaktiomuuttujat ja toiseen malliin oikean hemisfäärin radastojen FA-arvot sekä sukupuolen interaktiomuuttujat.

Lopullisten regressiomallien valintaa ohjasi *Akaike Information Criterion* –kriteeri (AIC) (Akaike, 1974), jota käytetään laajalti mallin valintaan. Kriteerin tavoitteena on löytää paras mahdollinen malli, joka tasapainottaa sopivuuden ja mallin yksinkertaisuuden (Cavanaugh & Neath, 2019). Mitä pienempi AIC-arvo, sitä paremmin malli tasapainottaa sopivuuden sekä yksinkertaisuuden ja siten pienimmän AIC-arvon saanut malli katsotaan parhaimmaksi. Lisäksi mallin valinnassa kiinnitettiin huomiota *Variance Inflation Factor* arvoon (VIF), jonka suositellaan olevan alle 5, koska sen ollessa suurempi kuin 5 ajatellaan mallissa esiintyvän multikollineaarisuutta (Kim, 2019). Tässä tutkimuksessa hyväksytyyn VIF-arvon rajaksi asetettiin  $< 5$ .

## 4 TULOKSET

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, ennustaako aivojen valkean aineen integriteetti dorsaaliossa ja ventraalisessa radastokokonaisuudessa, FA-arvoa tarkasteltaessa, 5-vuotiaiden lasten puheen tyypillisiä sujumattomuuksia. Yhteyttä tarkasteltiin taaksepäin askeltavan monimuuttujaisen lineaarisen regressioanalyysin avulla.

Regressiomalleissa selitettävänä muuttujana oli puheen tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa, kun taas selittävinä muuttujina olivat valkean aineen radastojen eheysarvot. Taustamuuttujien korrelaatioyhteyksien tarkastelun yhteydessä havaittujen tilastollisesti merkitsevien yhteyksien vuoksi sukupuoli sisällytettiin malliin selittäväksi muuttujaksi. Sukupuolella havaittiin myös yhteys ILF:n ja IFOF:n FA-arvoihin, molemmissa hemisfääreissä, minkä vuoksi näistä muuttujista regressiomalleihin sisällytettiin niiden väliset interaktiomuuttajat.

Ensimmäisiin hemisfäärikohtaisiin regressiomalleihin sisällytettiin selitettäväksi muuttujaksi puheen tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa, ja kaikki selittävät muuttujat: SLF, UNC, ILF, IFOF, ILF:n ja sukupuolen interaktiomuuttuja, IFOF:n ja sukupuolen interaktiomuuttuja sekä sukupuoli. Tämän jälkeen lähdettiin taaksepäin askeltavan menetelmän avulla luomaan parasta mahdollista mallia poistaen mallista yksi muuttuja kerrallaan ne, jotka eivät selittäneet vaikutusta tilastollisesti merkitsevästi. Parhaan mallin saamiseksi tarkasteltiin AIC-kriteeriä. Molempien hemisfäärien regressiomalleista viimeiset mallit olivat parhaimpia AIC-kriteerin perusteella, minkä vuoksi ne ovat tämän tutkimuksen tarkastelun kohteina. Taaksepäin askeltavan menetelmän regressiomallit ovat liitteessä 1.

Vasenta hemisfääriä tarkastelevassa regressioanalyysissä ensimmäinen malli ei ollut parempi kuin tyhjä malli,  $F(7,74) = 1.30$ ,  $p = .261$ , sen selittäessä aineiston vaihtelusta 2,5 % (korjattu  $R^2 = .03$ , AIC = 39.10). Oikeassa hemisfäärissä ensimmäinen malli ei myöskään ollut tyhjää mallia parempi,  $F(7,74) = 2.01$ ,  $p = .065$ , sen selittäessä aineiston vaihtelusta 8,0 % (korjattu  $R^2 = .08$ , AIC = 34.34). Vasemman hemisfäärin parhaaksi mahdolliseksi regressiomalliksi muodostui seitsemäs malli,  $F(1,80) = 5.37$ ,  $p = .02$ , sen selittäessä aineiston vaihtelusta 5,1 % (korjattu  $R^2 = .05$ , AIC = 31.29), joka on parempi kuin tyhjä malli. Samoin oikeaa hemisfääriä tarkastelevan regressiomallin viimeinen eli kuudes malli oli tyhjää parempi,  $F(2,79) = 5.29$ ,  $p = .007$ , sen selittäessä aineiston vaihtelusta 9,6 % (korjattu  $R^2 = .10$ , AIC = 28,33). Molemmat kahdesta lopullisesta regressiomallista sopivat aineistoon ja selittävät tilastollisesti

merkitsevästi aineiston vaihtelua. Lopullisten regressiomallien tulokset on kuvattu taulukossa 6.

## Taulukko 6

*Regressioanalyysin tulokset lopullisissa regressiomalleissa.*

	<i>B</i>	<i>95 % CI</i>	$\beta$	<i>p</i>	VIF	AIC
Vasen						31.29
Vakio	2.48	[2.13, 2.84]		< .001*		
Sukupuoli	.62	[-.09, 1.14]	.25	.023*	1.00	
Oikea						28.33
Vakio	2.50	[2.11, 2.80]		<.001*		
SLF	8.80	[-.27, 17.33]	.22	.043*	1.003	
IFOF * sukupuoli	3.90	[-.94, 6.86]	.28	.010*	1.003	

\*=  $p < .05$

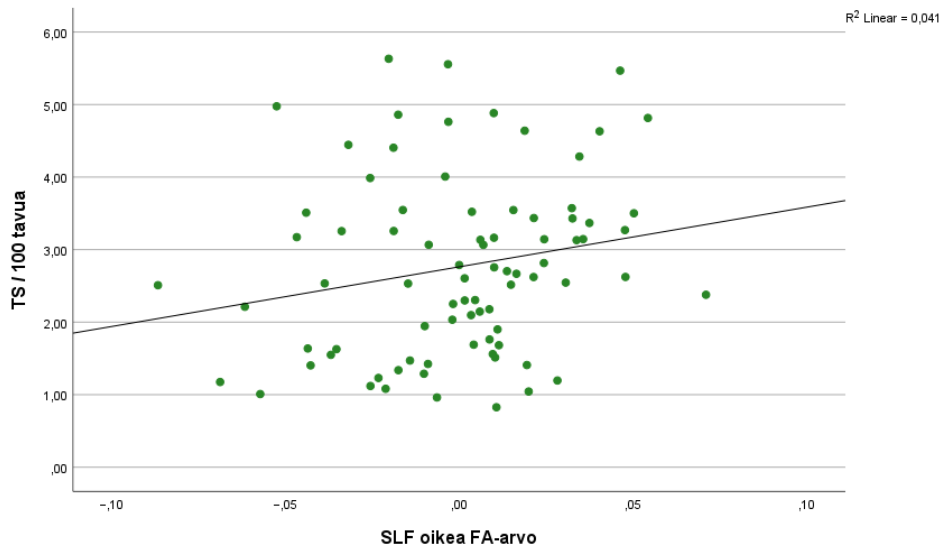
IFOF = Inferior Fronto-Occipital Fasciculus, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus, VIF = Variance Inflation Factor, AIC = Akaike Information Criterion

Vasemman hemisfäärin viimeisen ja parhaan regressiomallin tyypillisiä sujumattomuuksia selittäväksi muuttujaksi jäi sukupuoli. Tämä tarkoittaa, että tulosten mukaan sukupuoli selittää tilastollisesti merkitsevästi sujumattomuuksien määrää eri tavalla riippuen siitä, onko kyseessä tyttö vai poika. Sukupuolen vaikutuksen tarkastelussa havaittiin, että poikien puheessa on keskimääräisesti enemmän sujumattomuuksia,  $M = 3.10$ ,  $SD = 1.22$ , verrattuna tyttöjen sujumattomuuksien määrään,  $M = 2.49$ ,  $SD = 1.17$ .

Oikean hemisfäärin parhaassa regressiomallissa selittäväksi muuttujaksi jäivät SLF:n FA-arvot sekä IFOF:n ja sukupuolen interaktiomuuttuja. Nämä molemmat selittävät tilastollisesti merkitsevästi puheen tyypillisten sujumattomuuksien vaihtelua. SLF:n FA-arvojen ja tyypillisten sujumattomuuksien välillä oli positiivinen tilastollisesti merkitsevä yhteys,  $B = 8.80$ ,  $p = .043$ , eli FA-arvon kasvaessa sujumattomuuksien määrä lisääntyy. Kuvassa 4 on esitetty oikean SLF:n FA-arvojen yhteys puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin.

#### Kuva 4

Oikean hemisfäärin SLF:n FA-arvojen yhteys puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin sadassa tavussa.

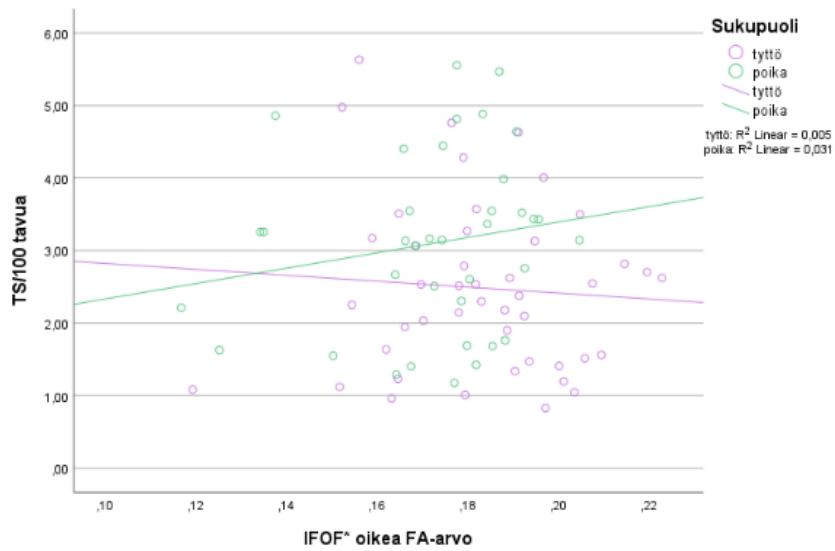


TS/100 tavua = tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus, FA = Fractional Anisotrophy

IFOF:n ja sukupuolen interaktiomuuttujan jatkotarkastelussa Pearsonin korrelaatiokertoimella kävi ilmi, että tytöillä yhteys on negatiivinen eli oikean IFOF:n FA-arvon kasvaessa sujumattomuuksien määrä laskee,  $r(43) = -.07$ ,  $p = .638$ . Pojilla puolestaan yhteys on positiivinen eli FA-arvon kasvaessa sujumattomuuksien määrä kasvaa,  $r(35) = .18$ ,  $p = .295$ . Sukupuolen ja oikean IFOF:n FA-arvon yhdysvaikutus puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin on esitetty kuvassa 5.

## Kuva 5

*Sukupuolen ja oikean IFOF:n FA-arvon yhdysvaikutus puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin.*



\*= Neliömuunnettu muuttuja

TS/100 tavua = tyypilliset sujumattomuudet sadassa tavussa, FA = Fractional Anisotrophy, IFOF = Inferior Frontal Fasciculus

## 5 POHDINTA

Pro gradu -tutkielman tavoitteena oli selvittää, ennustaako aivojen valkean aineen integriteetti dorsaaliossa ja ventraalisessa radastokokonaisuudessa 5-vuotiaiden puheen tyypillisiä sujumattomuuksia sadan tavun puhenäytteessä. Taustamuuttujina tutkimuksessa olivat ikä kuvantamishetkellä, sukupuoli, äidin koulutustaso ja jakomuuttuja eli raskauden aikana äidin raportoimat masennusoireet.

Puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteydestä kielelliseen prosessointiin osallistuvien radastojen integriteettiin ei ole aikaisempaa tutkimusta, minkä takia tutkimuksemme uutuusarvo on merkittävä. Aiemmissä tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että radastojen integriteetti on yhteydessä erinäisiin kielellisiin taitoihin, kuten fonologisiin prosesseihin, lukutaitoon sekä tuottavaan ja ymmärtävään kieleen (Dubner ym., 2020; Girault ym., 2018; Sket ym., 2019; Walton ym., 2018; Yeatman ym., 2012). Lisäksi on havaittu, että kielelliseen prosessointiin osallistuvien radastojen integriteetti on yhteydessä änkytykseen (Etchell ym., 2018). Tämän perusteella odotimme löytävämme tuloksia tässä tutkimuksessa tarkastelun kohteena olevien radastojen, SLF:n, IFOF:n, ILF:n ja UNC:n, yhteydestä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin, sillä näiden radastojen on havaittu osallistuvan puheen prosessointiin (Hickok & Poeppel, 2007).

Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että dorsaaliseen radastokokonaisuuteen kuuluvan oikean hemisfäärin SLF:n FA-arvot selittävät puheen tyypillisiä sujumattomuuksia. Havaittu yhteys on positiivinen, jolloin FA-arvon kasvaessa puheen tyypilliset sujumattomuudet lisääntyvät. Ventraaliseen radastokokonaisuuteen kuuluvan IFOF:n FA-arvojen oikeassa hemisfäärissä havaittiin puolestaan selittävän puheen tyypillisiä sujumattomuuksia, kun otetaan huomioon sukupuolten välinen vaihtelu. Poikien FA-arvojen ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien määrän yhteys oli positiivinen, eli FA-arvojen kasvaessa tyypillisten sujumattomuuksien määrä lisääntyy. Tyttöillä havaittu yhteys oli puolestaan negatiivinen eli FA-arvojen kasvaessa puheen tyypillisten sujumattomuuksien määrä vähenee. Lisäksi regressioanalyysissä havaittiin, että sukupuoli selittää tilastollisesti merkitsevästi puheen tyypillisten sujumattomuuksien määrää. Pojilla havaittiin keskimääräisesti enemmän sujumattomuuksia tyttöihin verrattuna.

Tutkimuksen tulokset vastaavat hypoteesiamme siitä, että radastojen FA-arvot ovat yhteydessä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Hypoteesijamme tukevia tuloksia saatiin sekä dorsaalisen että ventraalisen radastokokonaisuuksien radastoista. Tästä huolimatta on

kiinnostavaa havaita, että tuloksemme ovat erisuuntaiset verrattuna aiempiin änkytyksen ja integriteetin välistä yhteyttä tutkiviin tutkimuksiin, joissa FA-arvojen havaittiin olevan negatiivisesti yhteydessä änkytykseen. Lisäksi mielenkiintoinen tulos oli se, että yhteydet havaittiin vain oikean hemisfäärin radastoissa, vaikka puheen prosessointi usein paikallistetaan klassisten teorioiden mukaan vasempaan hemisfääriin (Broca, 1861; Wernicke, 1874).

### **5.1 Aivojen valkean aineen integriteetin ja puheen tyypillisen sujumattomuuden yhteys 5-vuotiailla**

Tutkimuksessa tarkastelun kohteena olivat dorsaalista radastokokonaisuudesta SLF ja ventraalisesta radastokokonaisuudesta IFOF-, ILF- ja UNC-radastot, joiden integriteetin yhteyttä FA-arvoa tarkasteltaessa selvitettiin puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin sadassa tavussa. Tilastollisten analyysien perusteella voidaan sanoa, että vasemman hemisfäärin regressiomallissa sukupuoli selittää puheen tyypillisiä sujumattomuuksia. Pojilla havaittiin sujumattomuuksia esiintyvän keskimääräisesti enemmän kuin tytöillä. Oikeaa hemisfääriä tarkastelevassa regressiomallissa puolestaan havaittiin, että puheen tyypillisiä sujumattomuuksia ennustaa SLF:n FA-arvo sekä IFOF:n FA-arvo, kun huomioidaan sukupuolten välinen vaihtelu. IFOF:n FA-arvojen suhde puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin oli pojilla positiivinen, kun taas tytöillä suhde oli negatiivinen. Muut tutkitut radastot eivät taaksepäin askeltavan regressioanalyysin mukaan selitä sujumattomuuksia.

Asetettu hypoteesi toteutui siten, että radastojen eheydessä ja puheen sujumattomuuksien määrässä havaittiin yhteys. Hypoteesin asettaminen ei ollut yksiselitteistä, sillä puheen tyypillisten sujumattomuuksien ja valkean aineen radastojen integriteetin yhteydestä ei ole aiempaa tutkimusta. Tiedetään kuitenkin, että aivojen valkean aineen integriteetti on yhteydessä moninaisesti lasten kehittyviin kielellisiin taitoihin ja puheen sujuvuuden häiriöön, änkytykseen (Dubner ym., 2020; Etchell ym., 2018; Girault ym., 2018; Sket ym., 2019; Walton ym., 2018; Yeatman ym., 2012), minkä vuoksi odotimme samansuuntaisia tuloksia. Tuloksemme antavat eri suuntaisia viitteitä aivojen valkean aineen radastojen integriteetin yhteydestä puheen tyypilliseen sujumattomuuteen kuin aiempi tutkimus SLF:n ja puheen sujuvuuden häiriön, änkytyksen, negatiivisesta yhteydestä (Etchell ym., 2018). Tuloksemme osoittavat oikean hemisfäärin SLF:n FA-arvojen kasvavan puheen sujumattomuuksien määrän lisääntyessä.

Dorsaaliseen radastokokonaisuuteen kuuluvan SLF:n on havaittu osallistuvan laaja-alaisesti puheen prosessointiin kuten puheen motoriseen suunnitteluun ja sanan tuottoon (Kargar &

Jalilian, 2024). Puheen tyypillisten sujumattomuuksien ajatellaan myös liittyvän motorisiin toimintoihin (Guitar, 2019, s. 127–134) ja sanan tuottoon (Yaruss ym., 1999), minkä vuoksi SLF:n integriteetin ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien välillä voisi mahdollisesti olla yhteisiä taustamekanismeja. Korkeampi integriteetti FA-arvoa tarkasteltaessa kertoo radaston eheydestä, joka tehostaa neuraalista tiedonsiirtoa (Bennet & Rypma 2013; Penke ym., 2012). Kun tarkastellaan aiempia tutkimuksia, havaittu positiivinen yhteys SLF:n FA-arvon ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien välillä on odottamaton tulos. On tutkittu, että radastojen eheys ei ole vakaa läpi elämän (Yetman ym., 2014), joten voisi siis olla mahdollista, että radaston eheyden kehitysvaihe vaikuttaisi saamaamme tulokseen.

Ventraalisen radastokokonaisuuden radastoista IFOF:n FA-arvojen havaittiin selittävän puheen tyypillisiä sujumattomuuksia, kun sitä tarkasteltiin interaktiossa sukupuolen kanssa. Aiemmassa tutkimuksessa IFOF:sta ei ole yksiselitteisesti yhdistetty puheen sujuvuuteen, mutta se osallistuu laajasti kielelliseen prosessointiin (Kargar & Jalilian, 2024). Mielenkiintoisena tuloksena tässä tutkimuksessa havaittiin, että pojilla FA-arvon kasvaessa puheen tyypilliset sujumattomuudet lisääntyvät, kun taas tytöillä FA-arvon vähentyessä sujumattomuuksien määrä kasvaa. Näin ollen tuloksemme osoittavat IFOF:n FA-arvon interaktiossa sukupuolen kanssa vaikuttavan sujumattomuuksien määrään ja radastojen eheyteen. Tyttöjen ja poikien erisuuntaisten yhteyksien taustalla voisi mahdollisesti olla eroavainen radastojen integriteetin kehitysvaihe, kun tiedetään että integriteetti kehittyy elämän aikana (Yetman ym., 2014). Sukupuolen yhteys puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin havaittiin myös vasemman hemisfäärin regressiomallissa, jonka mukaan pojilla esiintyi tyypillisiä sujumattomuuksia enemmän kuin tytöillä. Havaintomme tukee aiempaa tutkimusta, jonka mukaan pojilla esiintyy alle kouluikäisenä enemmän puheen tyypillisiä sujumattomuuksia verrattuna tyttöihin (Tumanova ym., 2014).

Sukupuolen lisäksi tutkimuksen taustamuuttujina olivat ikä kuvantamishetkellä, käteisyytensä, jakomuuttuja eli äidin raskauden aikainen masennus- ja ahdistuneisuusoireilu sekä äidin koulutustaso. Näistä muuttujista yhdenkään ei havaittu olevan yhteydessä päämuuttujiin eivätkä ne siten valikoituneet mukaan analyysiin. Aiemman tutkimuksen valossa olisi voinut odottaa, että jakomuuttuja olisi yhteydessä valkean aineen radastojen FA-arvoihin (Roos ym., 2021). Roos ja kumppanit (2021) havaitsivat äidin raskauden aikaisen masennuksen olevan yhteydessä 2–3-vuotiaiden lasten korkeampaan FA-arvoon, mutta samankaltaista yhteyttä ei havaittu tässä tutkimuksessa.

## **5.2 Tutkimuksen vahvuudet ja rajoitteet**

Tutkimuksen yksi suurimmista vahvuuksista on se, että sen data on kerätty osana laajaa ja monitieteistä FinnBrain-kohorttitutkimusta, jonka tavoitteena on selvittää lapsen kehitykseen ja terveyteen vaikuttavia tekijöitä (Karlsson ym., 2018). Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu samojen tutkittavien MRI-käynniltä saatuja FA-arvoja radastoista sekä puheen ja kielen osatutkimuksen puhenäytteestä kerättyä puheen tyypillisten sujumattomuuksien määrää sadassa tavussa. Osatutkimuksissa, joista käytetty aineisto on peräisin, on määritelty tarkat sisäänotto- ja poissulkukriteerit. Tässä tutkimuksessa poissuljettiin tutkittavat, joilla on puheen sujuvuuden häiriö, änkytys, jotta saataisiin validia tietoa tyypillisesti kehittyvien lasten puheen tyypillisistä sujumattomuuksista. Tutkimuksen otos oli aivokuvantamistutkimukseksi varsin kattava (N = 82) tarkassa ikäpisteessä ja sen sukupuolijakauma oli jakautunut tasaisesti lisäten tutkimuksen luotettavuutta.

Aivojen valkean aineen integriteetin yhteydestä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin ei ole vielä aikaisempaa tutkimusta, joten tutkimuksella on merkittävä uutuusarvo. Tämä tutkimus tarjoaa merkityksellistä tietoa 5-vuotiaiden suomenkielisten lasten puheen tyypillisten sujumattomuuksien ja aivojen valkean aineen radastojen eheyden yhteydestä. Tyypillisesti kehittyvien lasten kielelliset taidot saavuttavat merkittäviä virstanpylväitä alle kouluikäisenä (esim. Feldman, 2019), minkä vuoksi tutkittavien kielellisten taitojen tasoa voidaan pitää varsin tasaisena tarkassa ikäpisteessä. Lisäksi tutkitun aivojen valkean aineen integriteetin määrän tiedetään vaihtelevan ihmisen elinkaaren aikana (Yetman ym., 2014), joten tarkka ikäpiste mahdollistaa tutkittavien radastojen eheyksien olevan hyvin vertailukelpoisia keskenään.

Yhtenä tutkimuksen vahvuutena voidaan pitää laadukasta ja täsmällistä aineiston keräämistä. Puhenäyte, josta puheen tyypilliset sujumattomuudet on laskettu, on analysoitu datan käsittelyvaiheessa korkealla reliabiliteetilla, kun sujumattomuuksien tunnistamisen reliabiliteetti oli 0,94–0,95 ja sujumattomuuksien luokittelu oli reliabiliteetiltaan 0,88–0,93. Samoin aivokuvantamisprotokolla on suoritettu korkealaatuisesti saavuttaen luotettavan datan lasten valkean aineen radastojen eheydestä (Pulli ym., 2022).

Tämän tutkimuksen tulosten analysointi suoritettiin läpinäkyvästi ja tarkoin valikoiduin menetelmin. Analysoinnissa huomioitiin päämuuttujien lisäksi taustamuuttujat. Taustamuuttujista sukupuolen ollessa tilastollisesti merkitsevästi yhteydessä IFOF:n ja ILF:n integriteettiin, luotiin näistä yhteyksistä interaktiomuuttujat. Parhaiden mahdollisten regressiomallien luomiseksi käytettiin taaksepäin askeltavaa regressioanalyysiä, josta analysoitavaksi valikoidut mallit valittiin AIC-kriteerin perusteella. Toisaalta aivojen valkean

aineen integriteetin yhteydestä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin ei ole vielä tutkimusta, minkä vuoksi huolellisesti suoritetuista analyyseistä huolimatta tuloksia tulee tulkita harkiten.

Tutkimuksen heikkoutena voidaan pitää sitä, että tutkittujen radastojen määrä oli varsin rajallinen. Kuten Hickok ja Poeppel (2007) ovat tutkimuksessaan havainneet, puheen prosessointiin oletetaan osallistuvan useita valkean aineen radastoja sekä dorsaalista että ventraalisesta radastokokonaisuudesta. Kuvattuja radastoja dorsaalista radastokokonaisuudesta oli vain yksi, SLF, joka ei yksinään anna kattavaa kuvaa dorsaalisen radastokokonaisuuden eheyden yhteydestä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin. Puheen prosessointiin ja erityisesti puheen tuottoon oletettavasti osallistuva dorsaaliseen radastokokonaisuuteen kuuluva AF (Dick ym., 2014) ja myöhemmin dorsaaliseen radastokokonaisuuteen liitetty FAT (Kargar & Jalilian, 2024) eivät olleet tämän tutkimuksen tarkastelun kohteina. Ventraalisesta radastokokonaisuudesta puolestaan tutkimuksessa tarkasteltiin useampaa radastoa, mutta kokonaisvaltaisemman tutkimustiedon saavuttamiseksi tulisi tarkasteluun lisätä myös muun muassa puheen sujuvuuteen yhdistetty EmC ja MdLF, jonka on havaittu osallistuvan kielen prosessointiin. Tutkimuksemme valkean aineen integriteetistä tarjoaa varsin suppean kuvan radastojen eheyden ominaisuuksista, kun tarkastelun kohteena on ollut integriteetin parametreista ainoastaan FA-arvo.

### **5.3 Johtopäätökset ja jatkotutkimus**

Tämä pro gradu –tutkielma tarjoaa uutta tutkimustietoa 5-vuotiaiden lasten aivojen valkean aineen integriteetin ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteydestä. Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella, ennustaako valkean aineen radastojen integriteetti dorsaalissa tai ventraalisessa radastokokonaisuudessa puheen tyypillisten sujumattomuuksien määrää. Tulokset osoittavat, että dorsaaliseen radastokokonaisuuteen kuuluva oikean hemisfäärin SLF ja ventraalisen radastokokonaisuuden IFOF-radasto oikeassa hemisfäärissä, interaktiossa sukupuolen kanssa, ennustaa puheen tyypillisiä sujumattomuuksia. Tämä tarkoittaa sitä, että IFOF:n FA-arvot ennustavat tyypillisiä sujumattomuuksia eri tavoin pojilla ja tytöillä. Pojilla suhteen havaittiin olevan positiivinen, eli FA-arvojen kasvaessa sujumattomuuksien määrä lisääntyy, ja tytöillä negatiivinen, eli FA-arvojen kasvaessa sujumattomuuksien määrä vähenee. Taustamuuttujista sukupuolen havaittiin olevan yhteydessä sujumattomuuksien määrään niin, että pojilla esiintyy keskimääräisesti enemmän sujumattomuuksia verrattuna tyttöihin. Tämänkaltaista tutkimusta ei ole aiemmin tehty, joten tutkimuksemme lisää ymmärrystä suomenkielisten lasten puheen sujuvuuteen vaikuttavista mikrostruktuurallisista

rakenteista aivojen valkean aineen radastoissa. Tutkimuksen tulokset osoittavat jatkotutkimuksen tarpeen olevan ilmeinen.

Jatkotutkimuksissa olisi mielekäästä tarkastella puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteyttä useampaan valkean aineen radastoon. Erityisesti dorsaalisen radastokokonaisuuden yhteydestä puheen tyypillisiin sujumattomuuksiin saataisiin kattavampaa tietoa tutkimalla useampaa kielelliseen prosessointiin osallistuvaa radastoa, joita ovat tämän tutkimuksen kohteena olleen SLF:n lisäksi AF ja FAT. Samoin ventraaliseen radastokokonaisuuteen kuuluvien EmC:n ja MdLF:n tutkiminen toisi lisää tietoa radastojen eheyden ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien yhteydestä. Laajemman käsityksen integriteetin ominaisuuksista tutkimukseen toisi myös eheyden tarkasteleminen integriteetin eri parametreilla, joita ovat AD, RD ja MD. Radastojen eheyden yhteyttä puheen tyypilliseen sujumattomuuteen voisi puolestaan olla mielenkiintoista tutkia sekä tyypillisten sujumattomuuksien että tyypillisessä sujumattomuudessa esiintyvien änkytyksen kaltaisten sujumattomuuksien eri esiintymismuodoissa.

Havaittua yhteyttä radastojen FA-arvojen ja puheen tyypillisten sujumattomuuksien välillä olisi syytä tarkastella osana pitkittäistutkimusta, jotta ilmiön syy-seuraussuhteesta saataisiin tietoa. Koska on havaittu, että puheen tyypillisiä sujumattomuuksia esiintyy eniten 2–6-vuotiaana (Guitar, 2019, s. 127) ja että radastojen integriteetin kypsyessä iän myötä (Yetman ym., 2014), olisi mielekäästä tutkia yhteyttä myös myöhemmissä ikäpisteissä. Tämän tutkimuksen ollessa osa FinnBrain-kohorttitutkimusta, voisi olla mielenkiintoista tarkastella samoja tutkittavia nykyhetkessä 9-vuotiaiden ja 5-luokkalaisten osatutkimuksien ollessa käynnissä, ja kun kielen kehitys on edennyt.

## LÄHTEET

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(6), 716–723. <https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705>
- Ambrose, N. G. & Yairi, E. (1999). Normative disfluency data for early childhood stuttering. *Journal of speech, language, and hearing research: JSLHR*, 42(4), 895–909. <https://doi.org/10.1044/jslhr.4204.895>
- American Speech-Language-Hearing Association (ASHA). (1993). Definitions of Communication Disorders and Variations. <https://www.asha.org/policy/rp1993-00208/>
- Bennett, I. J. & Rypma, B. (2013). Advances in functional neuroanatomy: A review of combined DTI and fMRI studies in healthy younger and older adults. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 37(7), 1201–1210. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2013.04.008>
- Broca, P. (1861). Remarks on the seat of the faculty of articulated language, following an observation of aphemia (loss of speech). *Bulletin de la Société Anatomique*, 6(330-357), 27
- Carr, M. W. & Grey, M. L. (2002). Magnetic resonance imaging. *The American journal of nursing*, 102(12), 26–33. <https://doi.org/10.1097/00000446-200212000-00012>
- Cavanaugh, J. E., & Neath, A. A. (2019). The Akaike information criterion: Background, derivation, properties, application, interpretation, and refinements. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Computational Statistics*, 11(3), e1460-n/a. <https://doi.org/10.1002/wics.1460>
- Chaddock-Heyman, L., Erickson, K. I., Holtrop, J. L., Voss, M. W., Pontifex, M. B., Raine, L. B., Hillman, C. H. & Kramer, A. F. (2014). Aerobic fitness is associated with greater white matter integrity in children. *Frontiers in human neuroscience*, 8, 584. <https://doi.org.ezproxy.utu.fi/10.3389/fnhum.2014.00584>
- Conturo, T. E., Lori, N. F., Cull, T. S., Akbudak, E., Snyder, A. Z., Shimony, J. S., McKinstry, R. C., Burton, H. & Raichle, M. E. (1999). Tracking neuronal fiber pathways in the living human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(18), 10422–10427. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.18.10422>
- De Groot, M., Vernooij, M. W., Klein, S., Ikram, M. A., Vos, F. M., Smith, S. M., Niessen, W. J. & Andersson, J. L. (2013). Improving alignment in Tract-based spatial statistics:

- Evaluation and optimization of image registration. *NeuroImage*, 76, 400–411. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.03.015>
- Dick, A. S., Bernal, B. & Tremblay, P. (2014). The Language Connectome: New Pathways, New Concepts. *The Neuroscientist*, 20(5), 453–467. <https://doi.org/10.1177/1073858413513502>
- Dobos, D., Kökönyei, G., Gyebnár, G., Szabó, E., Kocsel, N., Galambos, A., Gecse, K., Baksa, D., Kozák, L. R. & Juhász, G. (2023). Microstructural differences in migraine: A diffusion-tensor imaging study. *Cephalalgia: an international journal of headache*, 43(12), 3331024231216456. <https://doi.org/10.1177/03331024231216456>
- Dubner, S. E., Rose, J., Bruckert, L., Feldman, H. M. & Travis, K. E. (2020). Neonatal white matter tract microstructure and 2-year language outcomes after preterm birth. *NeuroImage. Clinical*, 28, 102446. <https://doi-org.ezproxy.utu.fi/10.1016/j.nicl.2020.102446>
- Etchell, A. C., Civier, O., Ballard, K. J. & Sowman, P. F. (2018). A systematic literature review of neuroimaging research on developmental stuttering between 1995 and 2016. *Journal of Fluency Disorders*, 55, 6–45. <https://doi.org/10.1016/j.jfludis.2017.03.007>
- Feldman, H. M. (2019). How young children learn language and speech: Implications of theory and evidence for clinical pediatric practice. *Pediatrics in Review*, 40(8), 398–411. <https://doi.org/10.1542/pir.2017-0325>
- 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>
- Guitar, B. (2019). Stuttering: an integrated approach to its nature and treatment (Fifth edition.). Wolters Kluwer.
- Hickok, G. & Poeppel, D. (2004). Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language. *Cognition*, 92(1-2), 67–99. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.10.011>
- Hickok, G. & Poeppel, D. (2007). Opinion - The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews. Neuroscience*, 8(5), 393–402. <https://doi.org/10.1038/nrn2113>
- Hiltunen, J., Seppä, M. & Hari, R. (2007). Diffuusiottensorikuvaus hermoratojen tutkimuksessa. *Lääketieteellinen aikakauskirja Duodecim* 123(15), 1851–8. <https://www.duodecimlehti.fi/duo96651>

- Jansson-Verkasalo, E., Silvén, M., Lehtiö, I. & Eggers, K. (2021). Speech disfluencies in typically developing Finnish-speaking children – preliminary results. *Clinical Linguistics & Phonetics*, 35(8), 707–726, <https://doi.org/10.1080/02699206.2020.1818287>
- Kargar, Y. & Jalilian, M. (2024). Anatomic-functional profile of white matter tracts in relevance to language: A systematic review. *Journal of Neurolinguistics*, 69, 101175-. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2023.101175>
- Karlsson, L., Tolvanen, M., Scheinin, N. M., Uusitupa, H-M., Korja, R., Ekholm, E., Tuulari, J. J., Pajulo, M., Huotilainen, M., Paunio, T., Karlsson, H. & FinnBrain Birth Cohort Study Group (2018). Cohort Profile: The FinnBrain Birth Cohort Study. *International Journal of Epidemiology*, 47(1). <https://doi.org/10.1093/ije/dyx173>
- Kaur, R., Raju, B. N. & Govind, J. (2016). Maze Production in Children with Mental Retardation. *Research Journal of Language, Literature and Humanities*, 3(6), 1-7. <https://www.isca.in/LANGUAGE/Archive/v3/i6/1.ISCA-RJLLH-2015-025.php>
- Kim, J. H. (2019). Multicollinearity and misleading statistical results. *Korean Journal of Anesthesiology*, 72(6), 558–569. <https://doi.org/10.4097/kja.19087>
- Lebel, C. & Deoni, S. (2018). The development of brain white matter microstructure. *NeuroImage*, 182, 207–218. <https://doi-org.ezproxy.utu.fi/10.1016/j.neuroimage.2017.12.097>
- Luo, Z., Adluru, N., Dean, D. C., Alexander, A. L. & Goldsmith, H. H. (2022). Genetic and environmental influences of variation in diffusion MRI measures of white matter microstructure. *Brain Structure and Function*, 227(1), 131–144. <https://doi.org/10.1007/s00429-021-02393-7>
- Miller, J. & Iglesias, A. (2020). Systematic Analysis of Language Transcripts (SALT), Version 20 [Computer Software]. Madison, WI: SALT Software, LLC.
- Muetzel, R. L., Mous, S. E., van der Ende, J., Blanken, L. M., van der Lugt, A., Jaddoe, V. W., Verhulst, F. C., Tiemeier, H. & White, T. (2015). White matter integrity and cognitive performance in school-age children: A population-based neuroimaging study. *NeuroImage*, 119, 119–128. <https://doi-org.ezproxy.utu.fi/10.1016/j.neuroimage.2015.06.014>
- O'Donnell, L. J. & Westin, C. F. (2011). An introduction to diffusion tensor image analysis. *Neurosurgery clinics of North America*, 22(2), 185–96. <https://doi.org/10.1016/j.nec.2010.12.004>

- Op de Beeck, H. & Nakatani, C. (2019). *Introduction to human neuroimaging*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316847916>
- Penke, L., Maniega, S. M., Bastin, M. E., Valdés Hernández, M. C., Murray, C., Royle, N. A., Starr, J. M., Wardlaw, J. M. & Deary, I. J. (2012). Brain white matter tract integrity as a neural foundation for general intelligence. *Molecular Psychiatry*, *17*(10), 1026–1030. <https://doi.org/10.1038/mp.2012.66>
- Pulli, E. P., Silver, E., Kumpulainen, V., Copeland, A., Merisaari, H., Saunavaara, J., Parkkola, R., Lähdesmäki, T., Saukko, E., Nolvi, S., Kataja, E. L., Korja, R., Karlsson, L., Karlsson, H. & Tuulari, J. J. (2022). Feasibility of FreeSurfer Processing for T1-Weighted Brain Images of 5-Year-Olds: Semiautomated Protocol of FinnBrain Neuroimaging Lab. *Frontiers in neuroscience*, *16*, 874062. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.874062>
- Roos, A., Wedderburn, C. J., Fouche, J. P., Joshi, S. H., Narr, K. L., Woods, R. P., Zar, H. J., Stein, D. J. & Donald, K. A. (2022). Prenatal depression exposure alters white matter integrity and neurodevelopment in early childhood. *Brain imaging and behavior*, *16*(3), 1324–1336. <https://doi.org/10.1007/s11682-021-00616-3>
- Roos, A., Wedderburn, C. J., Fouche, J. P., Subramoney, S., Joshi, S. H., Woods, R. P., Zar, H. J., Narr, K. L., Stein, D. J. & Donald, K. A. (2021). Central white matter integrity alterations in 2-3-year-old children following prenatal alcohol exposure. *Drug and alcohol dependence*, *225*, 108826. <https://doi.org.ezproxy.utu.fi/10.1016/j.drugalcdep.2021.108826>
- Saur, D., Kreher, B. W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M.-S., ... Weiller, C. (2008). Ventral and dorsal pathways for language. *Proceedings of the National Academy of Sciences - PNAS*, *105*(46), 18035–18040. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805234105>
- Shekari, E. & Nozari, N. (2023). A narrative review of the anatomy and function of the white matter tracts in language production and comprehension. *Frontiers in Human Neuroscience*, *17*, 1139292-. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1139292>
- 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.ezproxy.utu.fi/10.3389/fnhum.2019.00434>

- Smits, M., Jiskoot, L. C. & Papma, J. M. (2014). White Matter Tracts of Speech and Language. *Seminars in Ultrasound, CT, and MRI*, 35(5), 504–516. <https://doi.org/10.1053/j.sult.2014.06.008>
- Särkämö, T. & Sihvonen, A. J. (2019). Aivojen keskeisimmät rakenteet kognitiivisissa ja psyykkisissä toiminnoissa. Teoksessa M. Jehkonen, T. Saunamäki, L. Hokkanen (toim.), *Kliininen neuropsykologia*. Kustannus Oy Duodecim
- 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>
- Tumanova, V., Conture, E. G., Lambert, E. W. & Walden, T. A. (2014). Speech disfluencies of preschool-age children who do and do not stutter. *Journal of Communication Disorders*, 49(C), 25–41. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2014.01.003>
- Urger, S. E., De Bellis, M. D., Hooper, S. R., Woolley, D. P., Chen, S. D. & Provenzale, J. (2015). The Superior Longitudinal Fasciculus in Typically Developing Children and Adolescents: Diffusion Tensor Imaging and Neuropsychological Correlates. *Journal of Child Neurology*, 30(1), 9–20. <https://doi.org/10.1177/0883073813520503>
- Valanne, L. & Brander, A. (2013). Diffuusiotensorikuvaus ja aivovamman jälkitila. *Lääketieteellinen aikakausikirja Duodecim*, 129(14), 1449–1455.
- Von Der Heide, R. J., Skipper, L. M., Klobusicky, E. & Olson, I. R. (2013). Dissecting the uncinate fasciculus: disorders, controversies and a hypothesis. *Brain (London, England: 1878)*, 136(6), 1692–1707. <https://doi.org/10.1093/brain/awt094>
- 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>
- Wernicke, C. (1874). The aphasic symptom complex: a psychological study on a neurological basis. *Boston Stud Philos Sci*, 4.
- Yang, A. C., Tsai, S. J., Liu, M. E., Huang, C. C. & Lin, C. P. (2016). The Association of Aging with White Matter Integrity and Functional Connectivity Hubs. *Frontiers in aging neuroscience*, 8, 143. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00143>

- 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 - PNAS*, 109(44), E3045–E3053. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206792109>
- Yeatman, J. D., Wandell, B. A. & Mezer, A. A. (2014). Lifespan maturation and degeneration of human brain white matter. *Nature Communications*, 5(1), 4932–4932. <https://doi.org/10.1038/ncomms5932>
- Yaruss, J. S., Newman, R. M. & Flora, T. (1999). Language and disfluency in nonstuttering children's conversational speech. *Journal of Fluency Disorders*, 24(3), 185–207. [https://doi.org/10.1016/S0094-730X\(99\)00009-1](https://doi.org/10.1016/S0094-730X(99)00009-1)

## LIITTEET

### Liite 1.

Taaksepäin askeltavan poistomenetelmän regressiomallit vasemmassa hemisfäärissä.

	<i>B</i>	95 % <i>CI</i>	$\beta$	<i>p</i>	VIF	AIC
1						39.10
vakio	2.43	[2.05, 2.81]		< .001*		
SLF	-.38	[-13.08, 12.32]	-.01	.952	1.58	
UNC	3.61	[-10.44, 17.66]	.07	.610	1.51	
ILF <sup>a</sup>	-18.63	[-50.53, 13.26]	-.33	.248	6.67	
IFOF <sup>a</sup>	21.63	[-17.16, 60.43]	.36	.270	8.85	
ILF * sukupuoli	9.21	[-35.72, 54.14]	.10	.684	4.73	
IFOF * sukupuoli	-4.10	[-52.67, 44.48]	-.30	.867	258.41	
sukupuoli	1.51	[-7.40, 10.41]	.62	.737	276.13	
2						37.11
vakio	2.43	[2.05, 2.81]		< .001*		
UNC	3.52	[-10.12, 17.16]	.07	.609	1.45	
ILF <sup>a</sup>	-18.79	[-50.06, 12.49]	-.33	.235	6.50	
IFOF <sup>a</sup>	21.54	[-16.86, 59.94]	.36	.267	8.80	
ILF * sukupuoli	9.15	[-35.43, 53.73]	.10	.684	4.72	
IFOF * sukupuoli	-4.01	[-52.18, 44.15]	-.29	.869	257.62	
sukupuoli	1.49	[-7.34, 10.32]	.61	.737	275.27	
3						35.14
vakio	2.44	[2.07, 2.80]		< .001*		
UNC	3.72	[-9.61, 17.06]	.07	.580	1.40	
ILF <sup>a</sup>	-17.07	[-40.43, 6.29]	-.30	.150	3.67	
IFOF <sup>a</sup>	19.10	[-5.66, 43.87]	.32	.129	3.71	
ILF * sukupuoli	6.15	[-19.93, 3.23]	.07	.640	1.61	
sukupuoli	.76	[.20, 1.32]	.31	.009*	1.13	

4							33.37
	vakio	2.43	[2.06, 2.79]		< .001*		
	UNC	3.68	[-9.58, 16.94]	.07	.582	1.40	
	ILF <sup>a</sup>	-14.89	[-36.23, 6.46]	-.26	.169	3.10	
	IFOF <sup>a</sup>	19.18	[-5.45, 43.81]	.32	.125	3.71	
	sukupuoli	.75	[.19, 1.30]	.31	.009*	1.12	
5							31.70
	vakio	2.42	[2.06, 2.78]		< .001		
	ILF <sup>a</sup>	-174.95	[-36.19, 6.29]	-.26	.165	3.10	
	IFOF <sup>a</sup>	21.52	[-1.53, 44.56]	.36	.067	3.28	
	sukupuoli	.75	[.20, 1.31]	.31	.008*	1.12	
6							31.74
	vakio	2.44	[2.07, 2.80]		< .001		
	IFOF <sup>a</sup>	8.34	[-5.18, 21.87]	.14	.223	1.12	
	sukupuoli	.73	[.17, 1.28]	.30	.011*	1.12	
7							31.29
	vakio	2.48	[2.13, 2.84]		< .001		
	sukupuoli	.62	[.09, 1.14]	.25	.023*	1.00	

\*=  $p < .05$ , <sup>a</sup>= Muunnettu muuttuja

IFOF = Inferior Fronto-Occipital Fasciculus, ILF = Inferior Longitudinal Fasciculus, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus, UNC = Uncinate Fasciculus VIF = Variance Inflation Factor, AIC = Akaike Information Criterion

Taaksepäin askeltavan poistomenetelmän regressiomallit oikeassa hemisfäärissä.

	<i>B</i>	95 % <i>CI</i>	$\beta$	<i>p</i>	VIF	AIC
1						34.34
	vakio	2.51	[2.15, 2.87]		< .001*	
	SLF	11.94	[1.15, 22.74]	.30	.031*	1.58
	UNC	3.81	[-10.88, 18.49]	.07	.607	1.60
	ILF <sup>a</sup>	3.49	[-25.05, 32.02]	.07	.808	7.33
	IFOF <sup>a</sup>	-19.11	[-52.02, 13.80]	-.33	.251	7.09
	ILF *	9.03	[-29.61, 47.68]	.13	.643	6.54
	sukupuoli					

	IFOF *	3.53	[-42.86, 49.92]	.25	.880	241.90	
	sukupuoli						
	sukupuoli	.004	[-8.25, 8.26]	.002	.999	251.31	
2							32.34
	vakio	2.51	[2.16, 2.87]		< .001*		
	SLF	11.94	[1.24, 22.65]	.30	.029*	1.57	
	UNC	3.81	[-10.53, 18.14]	.07	.598	1.55	
	ILF <sup>a</sup>	3.49	[-19.67, 26.66]	.07	.765	4.90	
	IFOF <sup>a</sup>	-19.12	[-43.87, 5.62]	-.33	.128	4.06	
	ILF *	9.02	[-13.23, 31.26]	.13	.422	2.20	
	sukupuoli						
	IFOF *	3.55	[.55, 6.56]	.25	.021*	1.03	
	sukupuoli						
3							30.44
	vakio	2.52	[2.17, 2.87]		< .001*		
	SLF	12.15	[1.61, 22.70]	.30	.024*	1.55	
	UNC	3.58	[-10.59, 17.75]	.07	.616	1.53	
	IFOF <sup>a</sup>	-16.60	[-34.75, 1.54]	-.29	.072	2.21	
	ILF *	10.87	[-7.56, 29.30]	.15	.244	1.53	
	sukupuoli						
	IFOF *	3.53	[.54, 6.51]	.25	.021*	1.03	
	sukupuoli						
4							28.71
	vakio	2.52	[2.17, 2.87]		< .001*		
	SLF	12.28	[1.80, 22.76]	.30	.022*	1.54	
	IFOF <sup>a</sup>	-14.98	[-31.86, 1.91]	-.26	.081	1.94	
	ILF *	11.83	[-6.12, 29.77]	.17	.193	1.46	
	sukupuoli						
	IFOF *	3.58	[.61, 6.54]	.25	.019*	1.02	
	sukupuoli						
5							28.53
	vakio	2.48	[2.14, 2.83]		< .001*		
	SLF	12.87	[2.38, 23.36]	.32	.017*	1.53	
	IFOF <sup>a</sup>	-10.06	[-25.28, 5.15]	-.17	.192	1.56	

IFOF *	3.63	[.66, 6.60]	.26	.017*	1.02	
sukupuoli						
6						28.33
vakio	2.46	[2.11, 2.80]		< .001*		
SLF	8.80	[.27, 17.34]	.22	.043*	1.003	
IFOF *	3.90	[.94, 6.86]	.28	.010*	1.003	
sukupuoli						

\*=  $p < .05$ , <sup>a</sup>= Muunnettu muuttuja

IFOF = Inferior Fronto-Occipital Fasciculus, ILF = Inferior Longitudinal Fasciculus, SLF = Superior Longitudinal Fasciculus, UNC = Uncinate Fasciculus VIF = Variance Inflation Factor, AIC = Akaike Information Criterion