

**Kuulohavaintokynnyksen yhteys  
ääntämismuunnokseen muunnetun kuulopalauteen  
koeasetelmassa**

Sanni Pulkkinen ja Ilona Tuokko

Pro gradu -tutkielma

Ohjaaja: Henry Railo

Yhteiskuntatieteellinen tiedekunta

Psykologian ja logopedian laitos

Logopedia

26.11.2024

PULKKINEN, SANNI JA TUOKKO, ILONA: Kuulohavaintokynnyksen yhteys ääntämävasteisiin muunnetun kuulopalautteen koeasetelmassa

Pro gradu -tutkielma, 33 s.

Logopedia

Marraskuu 2024

---

Pro gradu -tutkielmassamme tarkastelimme, miten henkilökohtainen kyky havaita muutos omassa äänenkorkeudessaan on yhteydessä siihen, miten ääntä muokataan muutoksen jälkeen. DIVA-mallin (*Directions into Velocities of Articulators*) mukaisesti toimiva palautejärjestelmä säätelee puheentuohtoa ja havaitsee automaattisesti muutokset kuulopalautteessa. Tarkkuus havaita kuulopalautteen muutoksia on yksilöllinen. Tutkimuksessamme kuulopalautejärjestelmän toimintaa tutkittiin tuottamalla kuulopalautteeseen keinotekoinen äänenkorkeuden muutos eli perturbaatio. DIVA-mallin oletusten mukaisesti koehenkilöt muuttavat perturbaation seurauksena äänentaajuuttaan. Tätä muutosta kutsutaan ääntämävasteeksi, ja siinä on useimmiten havaittavissa kaksi eri vastetta, jotka ajoittuvat erillisiin ajanhetkiin. Ensimmäinen vaste on pitkälti automaattinen ja toinen tahdonalaisemmin säädeltävissä.

Tässä tutkimuksessa tutkittiin henkilökohtaisen kuulohavaintokynnyksen yhteyttä ensimmäiseen ja toiseen ääntämävasteeseen sekä koehenkilöiden ( $n = 73$ ) ääntämävasteiden muuttumista kokeen edetessä. Henkilökohtaisen havaintokynnyksen yhteyttä ääntämävasteisiin on tutkittu vähän ja tulokset ovat olleet ristiriitaisia. Tämä on tietävästi ensimmäinen tutkimus, jossa tutkittiin havaintokynnyksen vaikutusta myöhempään vasteeseen. Hypoteesina oli, että tarkat havaitsijat tuottaisivat pienempiä ääntämävasteita kuin heikommat havaitsijat, ja että tarkkojen havaitsijoiden vasteet muuttuisivat enemmän kokeen edetessä. Lisäksi oletettiin, että havaintokynnys vaikuttaisi vähemmän ensimmäiseen vasteeseen kuin toiseen vasteeseen.

Ääntämävasteiden analysointiin käytettiin lineaarisia sekamalleja. Perturbaation koolla oli suuri vaikutus ääntämävasteiden kokoon, ja koehenkilöt tuottivat vasteita myös pienimpiin perturbaatioihin. Havaintokynnyksellä ei ollut yksinään vaikutusta ääntämävasteisiin. Sen sijaan tarkemmat havaitsijat tuottivat myöhemmässä ajanhetkessä pienempiä vasteita suuriin perturbaatioihin kuin heikommat havaitsijat. Ensimmäisen ajanhetken vasteissa vastaavaa ilmiötä ei havaittu, mikä voisi selittyä vasteen automaattisuudella. Tarkoilla havaitsijoilla DIVA-mallin mukaisen syötekytkentäjärjestelmän toiminta on voinut olla harjaantuneempaa, kun taas heikommat havaitsijat saattoivat tukeutua enemmän puheen palautejärjestelmään myös suuremmilla perturbaatioilla.

Koehenkilöiden ääntämävasteet eivät muuttuneet kokeen edetessä eikä havaintokynnys ennustanut vasteiden muuttumista. Vasteiden muuttumista ei ehkä ilmennyt, sillä kokeessa käytetyt perturbaatiot olivat epäsäännöllisiä ja ennustamattomia. Havaintokynnyksen yhteyttä eri ääntämävasteisiin ja ääntämävasteiden muuttumista tulisi tutkia lisää erilaisilla koeasetelmilla. Tällaista tutkimustietoa voitaisiin tulevaisuudessa hyödyntää esimerkiksi Parkinson-potilaiden puheen monitoroinnin mahdollisten muutosten ymmärtämisessä. Oman puheen tietoisempaa havaitsemista voitaisiin harjoittaa osana Parkinson-potilaiden puheterapiaa.

Avainsanat: kuulohavaintokynnys, muunnettu kuulopalaute, perturbaatio, puheen aistipalaute, puheen havaitseminen, äänenkorkeus

# Sisällysluettelo

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
1.1	Puheen tuoton DIVA-malli	2
1.2	Muunnetun kuulopalautteen koeasetelma	3
1.3	Perturbaation tuottamat ääntämismvasteet	5
1.4	Henkilökohtainen havaintokynnys	7
<b>2</b>	<b>Tutkimuskysymykset</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Menetelmät</b>	<b>11</b>
3.1	Koehenkilöt	11
3.2	Tutkimusmenetelmät	11
3.2.1	Koeasetelma	11
3.2.2	Laitteet ja ohjelmistot	14
3.3	Tutkimuksen toteuttaminen	15
3.4	Tilastolliset menetelmät	15
3.5	Tutkimuksen eettisyys	18
<b>4</b>	<b>Tulokset</b>	<b>19</b>
4.1	Mallien valinta ja oletusten tarkastelu	19
4.2	Kuvailevat tunnusluvut ja ääntämismvasteet ajan suhteen	19
4.3	VR1-ääntämismvasteet mallissa 1a	21
4.4	VR2-ääntämismvasteet mallissa 1b	23
<b>5</b>	<b>Pohdinta</b>	<b>26</b>
5.1	Tulosten kuvaus ja arviointi	26
5.1.1	Perturbaation koon vaikutus ääntämismvasteisiin	26
5.1.2	Havaintokynnyksen yhteys ääntämismvasteisiin	27
5.1.3	Ääntämismvasteiden muuttuminen kokeen edetessä	29
5.2	Tutkimuksen vahvuudet ja rajoitukset	30
5.2.1	Otoksen ominaisuudet	30
5.2.2	Koeasetelma	31
5.3	Tutkimuksen merkitys ja jatkotutkimusehdotuksia	32
	<b>Lähteet</b>	<b>34</b>

# 1 Johdanto

Ihmiset mukauttavat puhettaan ja ääntään kuhunkin ympäristöön ja tilanteeseen sopivaksi mahdollisimman sujuvan vuorovaikutuksen saavuttamiseksi. Tämä puheen monitorointi tapahtuu ainakin osin automaattisesti, mutta tutkimustietoa oman puheen havaitsemisesta ja siinä olevien virheiden korjaamisesta on vasta vähän. Yksi keskeisistä puheen monitoroinnin osa-alueista on äänenkorkeuden säätely. Äänenkorkeuden monitoroinnin tarkoitus on havaita ja säädellä fonaation ja intonaation muutoksia, joiden avulla puhuja pyrkii selkeyttämään viestiään vastaanottajalle (Alemi ym., 2020). Ihmisten tapa säädellä automaattisesti äänenkorkeuttaan on yksilöllinen ja suhteellisen muuttumaton ajan kuluessa (Kearney ym., 2022). Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on tarkastella, miten henkilökohtainen kyky havaita muutos omassa äänenkorkeudessa on yhteydessä siihen, miten ääntä muokataan muutoksen jälkeen.

Laajasti käytetyn puheen tuottoa havainnollistavan DIVA-mallin (*Directions into Velocities of Articulators*) mukaan syötekytkentä- (eng. *feedforward*) ja palautejärjestelmät (eng. *feedback*) säätelevät yhdessä puheviestiä (Tourville & Guenther, 2011). Palautejärjestelmä ja erityisesti kuulopalaute ovat keskeisiä äänen perustaajuuden säätelyssä (Burnett ym., 1998; H. Liu & Larson, 2007; Perkell ym., 2007). Äänen monitorointia ja kuulopalautejärjestelmän toimintaa on tutkittu muokkaamalla kuulopalautteen ominaisuuksia. Perturbaation eli lyhyen muutoksen kuulopalautteessa on havaittu aikaansaavan muutoksia koehenkilöiden ääntämisessä, kun koehenkilöt pyrkivät mukauttamaan ääntämistään perturbaation mukaan. Ihmisten kyvyssä havaita kuulopalautteeseen tuotettuja muutoksia on havaittu suurta yksilöllistä vaihtelua (Suchý ym., 2023), ja tämän vaihtelun avulla voidaan saada tietoa yksilöiden kyvyistä monitoroida omaa puhettaan (Kearney ym., 2022). Henkilökohtaisen havaintokynnyksen yhteyttä ääntämisen mukauttamiseen on tutkittu kuitenkin vähän ja tulokset ovat olleet ristiriitaisia.

Tässä tutkimuksessa ääntämisen mukauttamista tutkitaan kahdessa erillisessä ajanhetkessä muokkaamalla koehenkilöiden kuulopalautetta. Ensimmäisessä ajanhetkessä havaittava vaste on pitkälti automaattinen, kun taas myöhemmän ajanhetken vasteeseen pystytään enemmän vaikuttamaan tietoisella toiminnalla (Hain ym., 2000; Suchý ym., 2023). Lisäksi tutkimme, miten henkilökohtainen havaintokynnys vaikuttaa näiden kahden ääntämisvasteen muuttumiseen kokeen edetessä. Aiemmin ei ole juuri tutkittu henkilökohtaisen havaintokynnyksen yhteyttä ääntämisvasteisiin tai vasteiden muuttumiseen kokeen edetessä. Neurotyypillisten henkilöiden kyvystä monitoroida omaa puhettaan on kuitenkin tärkeä saada

lisää tietoa, jota voidaan myöhemmin hyödyntää erilaisten potilasryhmien kanssa työskennellessä. Oman puheen tietoinen havainnointi on tärkeää esimerkiksi puheterapiassa. Puheen monitoroinnin ja erityisesti kuulopalautteen käsittelyn on arveltu olevan poikkeavaa muun muassa Parkinsonin taudissa, jossa kyky oman puheäänen voimakkuuden havaitsemiseen on heikentynyt (Clark ym., 2014; Ho ym., 2000). Parkinsonin tautia sairastavilla puhe on monotonisempaa eli siinä on vähemmän puheelle luonnollisia sävelkorkeuden vaihteluita (Ramig ym., 2008). Puheen ja äänen vaikeudet voivat yhdessä kasvojen ilmeettömyyden kanssa vaikeuttaa kommunikaatiota ja heikentää elämänlaatua (Ramig ym., 2008). Poikkeavasta puheen monitoroinnista saatua tietoa voidaan käyttää uusien ja jo käytössä olevien hoito- ja kuntoutusmuotojen kehittämisessä.

### 1.1 Puheen tuoton DIVA-malli

Puheen tuoton DIVA-mallin mukaiset sensorista palautetta hyödyntävä palautejärjestelmä ja sisäisiä malleja käyttävä syötekytkentäjärjestelmä toimivat yhteistyössä puheen tuottamiseksi (Guenther, 2006; Scheerer & Jones, 2014). Palautejärjestelmä muodostuu kuulonvaraisesta ja somatosensorisesta palautteesta (Guenther, 2006; Tourville & Guenther, 2011). Palautejärjestelmä vertaa tuotettua ääntä tavoiteltuun ääntöön, pyrkii havaitsemaan ristiriidat näiden välillä sekä korjaa tarvittaessa motorisia käskyjä, jotka tallentuvat syötekytkentäjärjestelmään (Maas ym., 2015). Syötekytkentäjärjestelmä sisältää opitut motoriset käskyt siitä, miten mikäkin ääni tulisi tuottaa. Palautejärjestelmän toiminnan on havaittu olevan automaattista (Scheerer & Jones, 2018) ja yksilöllistä (Burnett ym., 1998; H. Liu & Larson, 2007).

Uutta kieltä opiskeltaessa ihminen tukeutuu vahvasti palautejärjestelmiin, sillä syötekytkentäkäskyt ovat vielä epätarkkoja (Guenther, 2006). DIVA-mallissa tavoiteltu ääntö ei ole piste-estimaatti vaan kohdealue (eng. *target region*), mikä selittää vaihtelun henkilön tuoksissa (Guenther, 2006). Mikäli tuotos ei ole tavoitellun kohdealueen sisällä, palautejärjestelmä toteaa tuotoksen virheelliseksi ja antaa korjaavia motorisia käskyjä sen muokkaamiseksi. Nämä käskyt tallentuvat syötekytkentäjärjestelmään ja muokkaavat vähitellen motorisia käskyjä tarkemmiksi. Harjoittelun myötä palautejärjestelmän merkitys puheen säätelyssä vähenee ja syötekytkentäjärjestelmän merkitys kasvaa. Lopulta syötekytkentäjärjestelmästä tulee hallitseva, ja se kykenee toteuttamaan motoriset käskyt riittävällä tarkkuudella niin, ettei palautejärjestelmä enää havaitse virheitä (Villacorta ym., 2007). Palautejärjestelmä voi silti osallistua säätelyyn, jos palaute poikkeaa suunnitellusta

toiminnasta (Villacorta ym., 2007). Kuulopalautejärjestelmä saattaa antaa korjaavia motorisia käskyjä, jos esimerkiksi kuulopalautetta perturboidaan tai artikulaattorien mittasuhteet muuttuvat (Guenther, 2006).

## 1.2 Muunnetun kuulopalautteen koeasetelma

Kuulopalautejärjestelmän toimintaa on tutkittu muunnetun kuulopalautteen koeasetelmalla (eng. mm. *pitch altered feedback paradigm*, *frequency altered feedback paradigm*, *auditory feedback perturbation paradigm*). Koeasetelmassa koehenkilöt tuottavat ääntä, joka voi olla muun muassa yksittäisen vokaalin ääntä (Alemi ym., 2020; Behroozmand ym., 2012; Burnett ym., 1998; Franken ym., 2023; H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2018), sanojen tai epäsanon tuottoa (Daliri ym., 2020; Martin ym., 2018), erilaisia sanapainoja (Ning, 2020, 2022), lauseintonaatioita (Patel ym., 2011) tai laulamista (Alemi ym., 2023). Samalla koehenkilöiden kuulopalautetta häiritään tuottamalla siihen lyhytkestoinen keinotekoinen muutos eli perturbaatio. Perturbaatiolla voidaan muuttaa äänen perustaajuutta (F0) tai äänneiden formanttitaajuuksia (F1, F2). Taajuusperturbaatiossa henkilön kuulopalautteen perustaajuutta muutetaan hetkellisesti tai pitkäkestoisemmin ylös- tai alaspäin (mm. Alemi ym., 2020; Behroozmand ym., 2012; Burnett ym., 1998; Franken ym., 2023; H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2018). Formanttiperturbaatiossa muutetaan tietylle äänneelle ominaisia formanttitaajuuksia, jolloin äänne alkaa muistuttamaan akustisilta ominaisuuksiltaan muita äänneitä (Daliri ym., 2020; Martin ym., 2018; Villacorta ym., 2007). DIVA-mallin mukaisesti koehenkilöt muuttavat perturbaation seurauksena äänentaajuuttaan (Guenther, 2006), ja tätä perturbaation aikaansaamaa koehenkilön äänentaajuuden muutosta kutsutaan ääntämismuutokseksi.

Suprasegmentaaliset piirteet, kuten äänen perustaajuus, vaikuttaisivat olevan alttiimpia muuttumaan ajan kuluessa tai perturbaation ja ympäristössä tapahtuvien muutosten seurauksena kuin segmentaaliset piirteet, kuten formantit (Daliri ym., 2020; Miller ym., 2023; Perkell ym., 2007). Perturbaatio vaikuttaa eri puheen tuoton osa-alueisiin, kun se tuotetaan äänen perustaajuuteen tai formantteihin. Formanttiperturbaatioilla vaikutetaan artikulaatioliikkeisiin (Perkell ym., 2007), kun taas äänen perustaajuutta muokkaavilla perturbaatioilla vaikutetaan äänihuulilla ja hengityselimistöllä säädeltyyn äänenkorkeuteen (Hain ym., 2000).

Muunnetun kuulopalautteen koeasetelmat voidaan lisäksi jakaa kahteen tyyppiin sen mukaan, tutkitaanko koeasetelmalla refleksinomaisia vai adaptiivisia ääntämismuutoksia (Miller ym., 2023). Refleksiivisessä koeasetelmassa tuotetaan ennustamaton ja äkillinen taajuusperturbaatio

usein vain joihinkin satunnaisesti valituista osatehtävistä, kun taas suurimmassa osassa osatehtävistä kuulopalaute on normaali (Miller ym., 2023). Sen sijaan adaptaatiokoeasetelmissa perturbaatiot tapahtuvat yleensä säännönmukaisesti ja ennustettavasti jokaisessa osatehtävässä, ja ne kestävät usein koko äännön ajan (Alemi ym., 2023; Martin ym., 2018; Miller ym., 2023). Tutkimuksemme koeasetelma on muunnelma refleksiivistä koeasetelmasta, sillä epäsäännöllisen kokoiset ja ajanhetkiltään vaihtelevat perturbaatiot tuotetaan jokaiseen osatehtävään. DIVA-mallin mukaisesti refleksiivinen koeasetelma tutkii erityisesti palautejärjestelmän toimintaa (Scheerer & Jones, 2014; Tourville & Guenther, 2011).

Perturbaatioiden koon yksikkönä käytetään tavallisesti senttejä. Sata senttiä vastaa yhtä puolisävelaskelta. Esimerkiksi pianon koskettimissa kahden vierekkäisen koskettimen välinen muutos sävelkorkeudessa on puolisävelaskel. Kuulopalautteeseen tuotettujen perturbaatioiden koko vaihtelee refleksiivisen koeasetelman tutkimuksissa viidestä sentistä (Scheerer & Jones, 2018) 500 senttiin (Behroozmand ym., 2012). Refleksiivisissä taajuusperturbaatiotutkimuksissa on käytetty useimmiten  $\pm 100$  sentin kokoisia perturbaatioita (Miller ym., 2023), mutta on myös tutkimuksia, joissa perturbaation koko on ollut 5–50 senttiä (Franken ym., 2023; H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2018). Refleksiivisissä taajuusperturbaatiotutkimuksissa perturbaation kesto on ollut tavallisesti 200 millisekuntia (Behroozmand ym., 2012; Franken ym., 2023; H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2018), mutta yksittäisissä tutkimuksissa kesto on vaihdellut 20 millisekunnista (Burnett ym., 1998) 1000 millisekuntiin (Hain ym., 2000).

Toisin kuin refleksiivisessä koeasetelmassa, jossa tutkitaan välittömiä vasteita uusiin ja yllättäviin muutoksiin, adaptiivisen koeasetelman säännönmukaisesti toistuvilla muutoksilla voidaan tutkia erityisesti sensorimotorista adaptaatiota. Tällä tarkoitetaan sitä, miten koehenkilöt adaptoituvat kokeen edetessä kuulopalautteeseen tuotettuihin muutoksiin ja hienosäätävät motorisia käskyjään niin, että ääntämisvasteet kasvavat asteittain (Alemi ym., 2023; Heller Murray & Stepp, 2020; Martin ym., 2018). DIVA-mallin mukaan (Tourville & Guenther, 2011) tämä tarkoittaa siis syötekytkentäjärjestelmän käskyjen päivittymistä. Lähtötilanteessa (eng. *baseline*) koehenkilön kuulopalautteeseen ei tuoteta perturbaatiota, rampinvaiheessa (eng. *ramp phase*) perturbaation kokoa kasvatetaan asteittain, ylläpitovaiheessa (eng. *hold phase*) perturbaation koko pidetään vakiona suurimmalla mahdollisella tasolla ja jälkivaikutusvaiheessa (eng. *aftereffect phase*) perturbaatio poistetaan jälleen kuulopalautteesta (Miller ym., 2023). Sensorimotorista adaptaatiota tarkastellaan usein ylläpitovaiheen osatehtävien ääntämisvasteista (Alemi ym., 2020; Martin ym., 2018), mutta

ääntämismvasteita voidaan havaita myös sen jälkeen, kun perturbaatio poistetaan tai palaute estetään (nk. jälkivaikutus) (Martin ym., 2018; Ning, 2020; Villacorta ym., 2007). Sensorimotorinen adaptaatio on hyvin automaattista (Ning, 2020), ja sen ilmeneminen vaihtelee suuresti yksilöiden välillä (Martin ym., 2018).

### 1.3 Perturbaation tuottamat ääntämismvasteet

Perturbaation tuottamat ääntämismvasteet ovat hyvin säännönmukaisia, mutta niitä ei havaita aina jokaisessa osatehtävässä (Burnett ym., 1998; H. Liu & Larson, 2007; Ning, 2020). Koehenkilöt tuottavat vasteita sekä perturbaatioihin, joita he havaitsevat tietoisesti (Scheerer & Jones, 2018), että perturbaatioihin, joita he eivät tietoisesti havaitse (Hafke, 2008). Vasteita havaitaan myös silloin, kun koehenkilöille ei ole etukäteen kerrottu kuulopalautteeseen tuotettavista perturbaatioista (Franken ym., 2018, 2023). Ääntämismvasteet ovat hyvin automaattisia, ja esimerkiksi kognitiivinen kuormittuneisuus tai tarkkaavaisuuden jakaminen useaan kohteeseen samanaikaisesti ei vaikuta niihin (Hu ym., 2015; Y. Liu ym., 2015). Koehenkilöt havaitsevat perturbaatiot paremmin tuottaessaan ääntä samanaikaisesti kuin vain kuunnellessaan äänityksiä äännöstään, sillä ääntä tuottaessa myös somatosensorinen palautejärjestelmä on aktiivinen (Scheerer & Jones, 2018).

Perturbaation aikaansaamat ääntämismvasteet ajoittuvat kahteen erilliseen ajanhetkeen, joista käytetään tutkimuskirjallisuudessa myös nimityksiä VR1 (*vocal response 1*) ja VR2 (*vocal response 2*) (Hain ym., 2000; Suchý ym., 2023). Ensimmäinen vaste VR1 havaitaan noin 75–150 millisekuntia (Burnett ym., 1998; Guenther, 2006) perturbaation päättymisen jälkeen. Viive vasteen alkamisessa johtuu viiveestä hermoimpulssien välittymisessä sekä lihaksen aktivoimisessa ja sitä seuraavassa liikkeessä (Guenther, 2006). Toinen, jälkimmäinen vaste VR2 havaitaan noin 300 millisekuntia perturbaation päättymisen jälkeen (Hain ym., 2000). Vaikka molemmat vasteet ovat hyvin automaattisia, ne ovat myös jossain määrin muunneltavissa. Esimerkiksi vasteen nopeuteen tai suuruuteen saattaa hieman vaikuttaa perturbaation ennustettavuus (Scheerer & Jones, 2014) tai koehenkilön saama ohjeistus (Franken ym., 2023; Hain ym., 2000; Ning, 2022). VR1-vaste on suurimmaksi osaksi automaattinen ja niin nopea, että sen ajatellaan olevan tiedostamaton (Franken ym., 2023; Hain ym., 2000; Ning, 2020; Suchý ym., 2023). VR1-vaste perustuu enemmän nopeisiin ja automaattisiin virheen havaitsemis- ja korjaamismekanismeihin, joiden tavoitteena on pitää äänen perustaajuus vakaana (Hain ym., 2000). VR1-vaste ilmentää siten DIVA-mallissa esiteltyä palautejärjestelmän toimintaa. Jälkimmäisen VR2-vasteen ajoitukseen ja suuruuteen

pystytään enemmän vaikuttamaan tahdonalaisesti, ja sen avulla voidaan säätää äänen perustaajuus halutulle tasolle (Hain ym., 2000; Suchý ym., 2023).

Palautejärjestelmä kykenee havaitsemaan ja tuottamaan ääntämävasteita hyvinkin pieniin, jopa kymmenen sentin perturbaatioihin (H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2018). Systemaattisia ääntämävasteita on havaittu myös viiden sentin perturbaatioilla, tosin tulokset eivät olleet tilastollisesti merkitseviä (Scheerer & Jones, 2018). Perturbaation tuottamat ääntämävasteet ovat usein suuruudeltaan vain osa perturbaation koosta (H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2018; Villacorta ym., 2007). DIVA-mallin mukaisesti vasteet kuulopalautteeseen tuotettuun perturbaatioon ovat vain osittaisia, sillä kuulopalaute ja somatosensorinen palaute ovat ristiriidassa keskenään (Villacorta ym., 2007). Somatosensorinen palautejärjestelmä ei havaitse vain kuulopalautteeseen tuotettua virhettä, ja liiallinen ääntämisen mukauttaminen perturbaation mukaan johtaisi siihen, että somatosensorinen palautejärjestelmä havaitsisi tuotoksen virheelliseksi. Toisin sanoen ääntämisen mukauttaminen perturbaation seurauksena on vain osittaista, sillä somatosensorinen palautejärjestelmä vastustaa syötekytkentäkäskeyjen korjaamista. Useissa tutkimuksissa perturbaation koon ja ääntämävasteiden yhteys on ollut lineaarinen eli suurempi perturbaatio on aiheuttanut suurempia ääntämävasteita (Chen ym., 2013; Hafke, 2008; Ning, 2020; Scheerer & Jones, 2018). Toisissa tutkimuksissa on puolestaan havaittu, että pienemmät perturbaatiot saavat aikaan suurempia vasteita perturbaation kokoon suhteutettuna (Alemi ym., 2020; H. Liu & Larson, 2007). Esimerkiksi Alemin ja kumppaneiden (2020) tutkimuksessa havaittiin, että ääntämävasteiden absoluuttinen koko oli lähes sama perturbaation koosta riippumatta.

Koehenkilöiden tuottamat ääntämävasteet voivat olla joko perturbaatiolle vastakkaisia kompensatorisia vasteita tai perturbaation suuntaa seuraavia seuraamisvasteita (mm. Burnett ym., 1998; H. Liu & Larson, 2007; Ning, 2020, 2022). Yleisempi vaste on kompensatorinen vaste, jolla koehenkilöt muuttavat äänenkorkeuttaan perturbaatiota vastakkaiseen suuntaan. Kompensatorisella vasteella halutaan tuoda kuulopalautetta lähemmäs tavoiteltua ääntä (Burnett ym., 1998; H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2014, 2018) ja siten minimoida havaittua virhettä kuulopalautteessa (Ning, 2020, 2022). Pienempi osuus ääntämävasteista on seuraamisvasteita, jolloin koehenkilö muuttaa äänentaajuuttaan perturbaation suuntaan (Miller ym., 2023; Ning, 2022). Seuraamisvasteilla pyritään siten sopeuttamaan oma ääni ulkoiseen äänilähteeseen (Burnett ym., 1998). Frankenin ja kumppaneiden (2018) mukaan vasteen suunta saattaisi määräytyä äänelle tyypillisten hetkittäisten taajuusheilahteluiden mukaan. Osa tutkijoista on käsitellyt seuraamisvasteita ja kompensatorisia vasteita erillisinä ilmiöinä, ja

seuraamisvasteita tuottaneiden koehenkilöiden tai seuraamisvasteita sisältävien osatehtävien poistaminen analyyseistä on ollut yleinen käytäntö erityisesti taajuusperturbaatiokokeissa (Miller ym., 2023). Millerin ja kumppaneiden (2023) monia aineistoja yhdistelevän mega-analyysin perusteella vaikuttaa kuitenkin siltä, että molemmat vasteet ovat osa samaa normaalijakaumaa. Seuraamisvasteet edustavat jakauman toisen ääripään arvoja, joten niiden poistaminen analyyseistä voi heikentää tulosten luotettavuutta.

Vasteiden suuruuteen ja suuntaan on joissakin tutkimuksissa vaikuttanut se, onko koehenkilö tulkinnut perturbaatiot itsestä lähtöisiksi vai jonkin ulkopuolisen lähteen aiheuttamiksi. Tutkimuksissa ääntämismvasteet ovat olleet suurempia, kun koehenkilöt ovat tulkinneet pienet perturbaatiot itsestä lähtöisiksi (Burnett ym., 1998; Franken ym., 2023; Ning, 2022; Scheerer & Jones, 2014). Sen sijaan suuret perturbaatiot (250–300 senttiä) on tulkittu ulkoisen lähteen tuottamiksi akustisiksi muutoksiksi (Korzyukov ym., 2017), joita on lähdetty useimmiten seuraamaan (Burnett ym., 1998; Ning, 2022). Muunnetun kuulopalautteen koeasetelmassa käytetään yleisimmin pieniä perturbaatioita, mikä voisi selittää kompensatoristen vasteiden suuren määrään suhteessa seuraamisvasteiden vähäisempään määrään (Ning, 2022). Seuraamisvasteiden määrä usein lisääntyy perturbaation koon kasvaessa. Tutkimuksissa, joissa käytetyt perturbaatiot ovat olleet suuria (> 100 senttiä), kompensatiota ja seuraamisvasteita on havaittu miltei yhtä paljon (Behroozmand ym., 2012; Ning, 2022). Alemin ja kumppaneiden (2020) tutkimuksessa taas ei havaittu lainkaan yhteyttä perturbaation suuruuden ja vasteiden tyyppin välillä. Myös perturbaatioiden ennustettavuus saattaa vaikuttaa vasteiden suuntaan. Ennustamattomat ja satunnaiset perturbaatiot johtavat useimmin kompensatorisiin vasteisiin, kun taas ennustettavat perturbaatiot tuottavat enemmän seuraamisvasteita (Behroozmand ym., 2012). Tutkimuksissa on saatu viitteitä siitä, että kompensatoriset vasteet ilmentäisivät palautejärjestelmän toimintaa ja seuraamisvasteet syötekytkentäjärjestelmän toimintaa (Ning, 2022).

#### **1.4 Henkilökohtainen havaintokynnys**

Henkilökohtaisella havaintokynnyksellä (eng. mm. *just notable difference*, *auditory acuity*, *auditory discrimination*) tarkoitetaan tarkkuutta, jolla ihmiset havaitsevat muutoksia kuulopalautteessa. Havaintokynnyksen tarkka määritelmä ja mittaustapa vaihtelevat eri perturbaatiotutkimuksissa, joten tulokset eivät ole keskenään täysin verrattavissa. Henkilökohtaisen havaintokynnyksen yhteyttä ääntämismvasteisiin on tutkittu verrattain vähän ja tulokset ovat keskenään osittain ristiriitaisia. Monet tutkimuksista ovat käyttäneet

adaptaatiokoeasetelmia ja tutkineet havaintokynnyksen yhteyttä sensorimotoriseen adaptaatioon (Alemi ym., 2020, 2023; Feng ym., 2011; Heller Murray & Stepp, 2020; Martin ym., 2018; Villacorta ym., 2007). Osassa adaptaatiokoeasetelmaa käyttävissä tutkimuksissa koehenkilöillä, joilla oli matala havaintokynnys, esiintyi enemmän adaptiivisia vasteita formanttiperturnaatioihin kuin koehenkilöillä, joilla havaintokynnys oli korkeampi (Martin ym., 2018; Villacorta ym., 2007). Heller Murray ja Stepp (2020) tutkivat havaintokynnyksen vaikutusta lasten ääntämävasteisiin sekä refleksiivisessä että adaptiivisessä koeasetelmassa. Tutkimukseen osallistui kaksikymmentä iältään 6-11-vuotiasta lasta (ka = 8.6 vuotta), ja vertailuryhmässä oli kaksikymmentä aikuista (ka = 21.0 vuotta). Tutkimuksessa lapset jaettiin kahteen ryhmään sen mukaan, oliko heidän havaitsemistarkkuutensa aikuistasoista vai heikompaa kuin aikuistasoinen havaitseminen. Myös heidän tutkimuksessaan niillä lapsilla, joilla havaitseminen oli aikuistasoista, havaittiin suurempia adaptiivisia vasteita taajuusperturnaatioihin kuin lapsilla, joiden havaitsemistarkkuus oli heikompi. Heller Murray ja Steppin (2020) mukaan tarkkojen havaitisijoiden suuremmat adaptiiviset vasteet ilmensivät motoristen mallien tehokkaampaa päivittämistä. Sen sijaan lapset, joiden havaitseminen oli aikuistasoista heikompaa, tukeutuivat enemmän kuulopalautteeseen ja eivät hyödyntäneet kuulopalautteeseen tuotettuja virheitä motoristen mallien päivittämisessä. Toisissa tutkimuksissa vastaavaa yhteyttä adaptaation ja havaintokynnyksen välillä ei ole havaittu (Alemi ym., 2020, 2023; Feng ym., 2011).

Havaintokynnyksen yhteyttä ääntämävasteisiin on tutkittu vasta muutamassa refleksiivisessä koeasetelmassa käyttävässä tutkimuksessa (Cai ym., 2012; Heller Murray & Stepp, 2020; Smith ym., 2020). Cain ja kumppaneiden (2012) tutkimuksessa havaintokynnys ei selittänyt äänkyttävien ja ei-äänkyttävien henkilöiden erilaisia ääntämävasteita. Myöskään Smithin ja kumppaneiden (2020) tutkimuksessa havaintokynnys ei ollut yhteydessä refleksiivisiin ääntämävasteisiin. Sen sijaan Heller Murray ja Steppin (2020) tutkimuksen refleksiivisessä koeasetelmassa lapset, jotka olivat parempia havaitsemaan perturnaatioita, tuottivat pienempiä kompensatorisia vasteita perturnaatioihin kuin lapset, jotka olivat huonompia havaitsemaan perturnaatioita. Havaintokynnyksen vaikutus oli siis päinvastainen kuin saman tutkimuksen adaptaatiokoeasetelmassa.

## 2 Tutkimuskysymykset

Refleksiiviset ääntämismvasteet ovat yksilöllisiä ja suhteellisen muuttumattomia ajan kuluessa, ja niiden avulla voidaan saada tietoa yksilön kyvystä monitoroida omaa puhettaan (Kearney ym., 2022). Ääntämismvasteiden koot myös vaihtelevat eri tutkimusten (Ning, 2022) ja koehenkilöiden välillä (Kearney ym., 2022; Suchý ym., 2023). Yksi selittävä tekijä ääntämismvasteiden yksilöllisyydelle ja henkilöiden väliselle vaihtelulle voisi olla henkilökohtainen havaintokynnys. Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena onkin selvittää, ennustavatko erot havaintokynnyksissä koehenkilöiden välistä vaihtelua VR1- ja VR2-vasteissa refleksiivisessä koeasetelmassa. Tarkoituksena on myös tutkia VRI- ja VR2-vasteiden muuttumista kokeen edetessä sekä sitä, riippuuko vasteiden muuttuminen koehenkilöiden havaintokynnyksestä. Tutkimusta havaintokynnyksen yhteydestä ääntämismvasteisiin on vähän, ja tämä on tiettävästi ensimmäinen tutkimus, jossa tutkitaan havaintokynnyksen vaikutusta myöhempään VR2-vasteeseen. Aiemmin ei ole myöskään tutkittu vasteiden muuttumista kokeen edetessä.

Tutkimuskysymykset ovat:

- 1. Ennustaako havaintokynnys koehenkilöiden VR1- ja VR2-ääntämismvasteiden kokoa refleksiivisessä muunnetun kuulopalautteen koeasetelmassa?*
- 2. Muuttuvatko koehenkilöiden VRI- ja VR2-vasteiden koot kokeen edetessä refleksiivisessä muunnetun kuulopalautteen koeasetelmassa?*
- 3. Ennustaako havaintokynnys sitä, miten koehenkilöiden VR1- ja VR2-ääntämismvasteiden koot muuttuvat kokeen edetessä refleksiivisessä muunnetun kuulopalautteen koeasetelmassa?*

Sikäli kuin tiedämme, havaintokynnyksen yhteyttä molempiin vasteisiin VR1 ja VR2 ei ole aiemmin tutkittu refleksiivisessä koeasetelmassa. Monissa tutkimuksissa on tutkittu lähinnä ensimmäisiä, automaattisia VR1-vasteita (Miller ym., 2023), ja vain harvoissa tutkimuksissa on tutkittu systemaattisesti myös myöhempiä, osittain tahdonalaisia VR2-vasteita (Hain ym., 2000; Suchý ym., 2023). Eri ajanhetkien vasteet ilmentävät todennäköisesti hieman erilaisia palautejärjestelmän prosesseja, ja tämä tutkimus voisi tuottaa tietoa siitä, vaikuttaako havaintokynnys näihin prosesseihin eri tavoin. Tämän tutkimuksen avulla voidaan selvittää, miten havaintokynnys vaikuttaa adaptaatioon refleksiivisessä koeasetelmassa. Vasteiden muuttumista kokeen edetessä on tutkittu vain adaptaatiokoeasetelmissa, mutta ei

refleksiivisissä koeasetelmissä. Aikaisemmin ei ole myöskään tutkittu, miten havaintokynnys vaikuttaa vasteiden muuttumiseen kokeen edetessä, ja adaptaatiotutkimuksissa saadut tutkimustulokset havaintokynnyksen ja adaptaation yhteydestä ovat olleet ristiriitaisia. Tässä tutkimuksessa terveiltä aikuisilta saatua tietoa puheen palautejärjestelmistä ja puheen monitoroinnista voidaan myöhemmin hyödyntää myös erilaisten logopedisten potilasryhmien arvioinnissa ja hoidossa.

Hypoteesinamme on, että erot havaintokynnyksissä eivät vaikuta yhtä voimakkaasti automaattisiin VR1-vasteisiin kuin tahdonalaisempiin VR2-vasteisiin. Lisäksi oletuksena on, että tarkat havaitsijat tuottavat pienempiä vasteita perturbaatioihin kuin heikommat havaitsijat. Havaintokynnys saattaa myös vaikuttaa koehenkilöiden vasteisiin eri tavalla eri perturbaatiokoilla. Tässä tapauksessa tarkat havaitsijat tuottaisivat pienempiä vasteita erityisesti pienimpiin perturbaatioihin, koska he saattavat havaita ne tietoisesti tai tiedostamattaan paremmin ja tulkita siten perturbaatiot ympäristöstä lähtöisiksi. Sen sijaan heikommat havaitsijat saattavat tiedostamattaan tulkita erityisesti pienimmät perturbaatiot itseaiheutetuiksi, jolloin heidän vasteensa ovat suurempia.

Tarkkojen hypoteesien muodostaminen vasteiden muuttumisesta kokeen edetessä on haastavaa, koska aiheesta ei ole aiempaa tutkimusta. Adaptaatiota on kuitenkin havaittu jo yksittäisten perturbaatioiden jälkeen (Hantzsch ym., 2022), joten voisi olettaa, että monia toistoja sisältävän kokeen aikana koehenkilöiden vasteet kasvaisivat vähitellen, ja että äänenataajuus madaltuisi vähitellen kokeen edetessä. Käyttämässämme refleksiivisessä koeasetelmassa perturbaatiot ovat kuitenkin ennustamattomia ja kooltaan epäsäännöllisiä, joten kokeen aikana tapahtuva adaptaatio ei luultavasti ole yhtä voimakasta kuin adaptaatiokoeasetelmissä (Hantzsch ym., 2022). Heller Murrayn ja Steppin (2020) tutkimuksen mukaisesti tarkat havaitsijat päivittäisivät tehokkaammin motorisia mallejaan, jolloin heillä adaptaatiota tapahtuisi enemmän kuin heikommilla havaitsijoilla. Voi myös olla, että kokeen aikana tapahtuukin habituaatiota. Habituaatiossa ärsykkeen synnyttämä vaste vaimenee vähitellen, kun sama ärsyke toistuu jatkuvasti pitkän aikaa (Phelps, 2011). Habituaation seurauksena koehenkilöiden vasteet heikentyisivät vähitellen kokeen edetessä.

## 3 Menetelmät

### 3.1 Koehenkilöt

Lopullisiin analyyseihin sisällytettiin 73 koehenkilöä. Mittauksiin osallistui yhteensä 83 koehenkilöä, joista viiden tulokset poistettiin mittauslaitteiston virheellisestä toiminnasta johtuvista syistä. Lisäksi poistettiin viisi koehenkilöä, joiden kuulohavaintokynnykset poikkesivat keskiarvosta kolmen keskihajonnan verran. Koehenkilöistä naisia oli 85 % (n = 62) ja miehiä 15 % (n = 11). Koehenkilöt olivat iältään 19-66-vuotiaita (ka = 26.5, kh = 7.8, md = 25.0). Oikeakätisiä oli 90 % (n = 66) ja vasenkätisiä 10 % (n = 7).

Sisäänottokriteereitä olivat täysi-ikäisyys, normaali kuulo, normaali tai normaaliksi korjattu näkö sekä natiivin tasoinen suomen kielen taito. Poissulkukriteereitä olivat puheeseen tai ääneen vaikuttavat häiriöt ja sairaudet, kurkunpään ja nielun sairaudet sekä neurologiset sairaudet ja häiriöt. Koehenkilöiden kuulo mitattiin seulonta-audiometrillä normaalin kuulon varmistamiseksi. Maailman terveysjärjestö (World Health Organization) määrittää kuulon normaaliksi, kun henkilön kuulokynnys on keskimäärin alle 20 desibeliä 500, 1 000, 2 000 ja 4 000 hertsin (Hz) taajuuksilla (WHO, 2021). Kaikkien koehenkilöiden kuulo todettiin normaaliksi tällä määritelmällä. Perturbaatiot tuotettiin äänen perustaajuuteen, joka on matala. Siksi tarkastelimme koehenkilöiden kuulokynnyksiä myös kaikkien mitattujen taajuuksien keskiarvona (125, 250, 500, 750, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000 ja 8000 Hz). Kaikkien koehenkilöiden keskimääräinen kuulokynnys oli myös tässä tapauksessa alle 20 desibeliä.

### 3.2 Tutkimusmenetelmät

#### 3.2.1 Koeasetelma

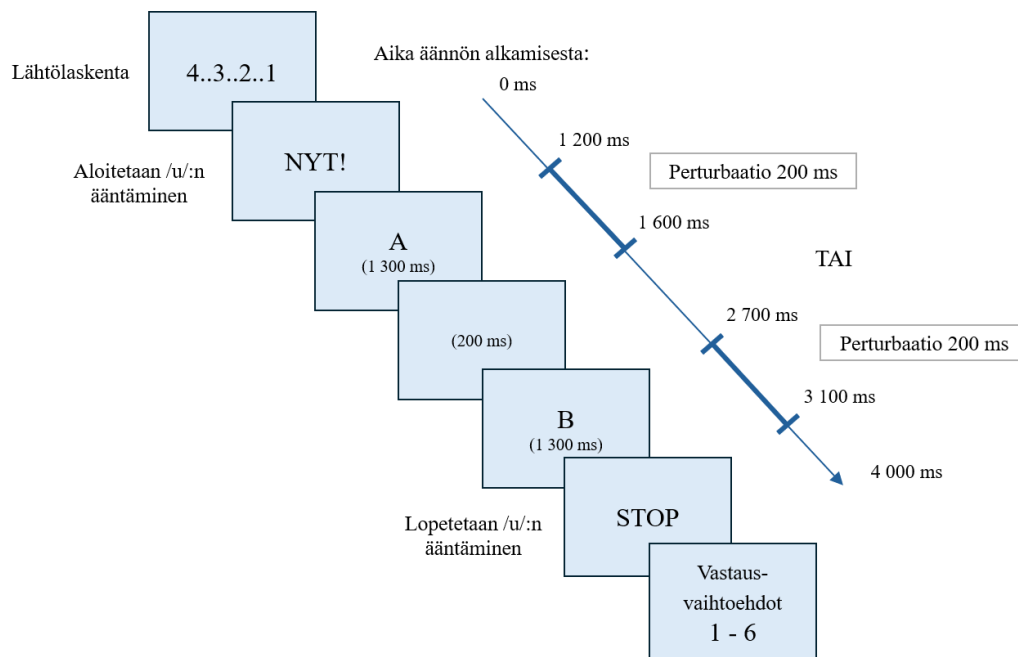
Tutkimuksessa käytettiin kokeellista muunnetun kuulopalautteen koemanipulaatiota. Kokeessa koehenkilön tehtävänä oli havaita kuulopalautteeseen tuotettu taajuusperturbaatio. Tutkimuskirjallisuuden mukaan taajuusperturbaatioilla ääntämismvasteet ovat suurempia kuin formanttiperurbatioilla (Miller ym., 2023). Perturbaation suunnan vaikutuksesta vasteen suuruuteen on saatu ristiriitaisia tuloksia. Osassa tutkimuksista ylöspäin tuotettujen (Chen ym., 2013; H. Liu ym., 2012; P. Liu ym., 2011) ja toisissa alaspäin tuotettujen (H. Liu & Larson, 2007; Ning, 2020, 2022) perturbaatioiden on havaittu saavan aikaan suurempia ääntämismvasteita. Näiden tutkimusten perusteella perturbaation suunnalla ei näyttäisi olevan yksiselitteistä vaikutusta ääntämismvasteisiin. Tämän tutkimusprojektin pilottitutkimuksissa

ylöspäin tuotettujen perturbaatioiden todettiin tuottavan suurempia vasteita, joten tutkimuksessamme perturbaatio oli aina äänen perustaajuutta kasvattava. Lisäksi vain yhteen suuntaan tuotetut perturbaatiot lisäsivät havaintojen määrää ja siten niiden tilastollista voimaa.

Tässä tutkimuksessa käytetyssä kokeessa oli kolme osiota: harjoitusosio, portaikko-osio ja viisi koesarjaa. Koesarjan yhden toiston eteneminen on esitetty kuvassa 1. Koehenkilön tehtävänä oli tuottaa jatkuvaa /u/-ääntöä mikrofoniiin noin neljän sekunnin ajan samalla, kun hän kuuli oman äänensä reaaliajassa kuulokkeista. Lähtölaskennan jälkeen näytölle ilmestyi ”NYT!”, jolloin ääntö tuli aloittaa. Äännön aloittamisen jälkeen tietokoneen näytölle ilmestyivät vuoron perään kirjaimet ”A” ja ”B”, jotka jakoivat äännön ajallisesti kahteen eri osaan eli intervalliin. Kumpikin kirjain oli näkyvillä 1300 millisekunnin ajan, ja niiden välissä oli 200 millisekunnin tauko selvyuden vuoksi. Jokaisen äännön aikana tietokone tuotti kuulokkeista kuuluvaan kuulopalautteeseen äänen perustaajuutta kasvattavan 200 millisekunnin kestoisen perturbaation. Perturbaatio oli satunnaistettu alkamaan joko 1200–1600 tai 2700–3100 millisekuntia äännön aloittamisesta, ja tapahtui siten joko A- tai B-intervallin aikana. Koehenkilö sai lopettaa äännön, kun näytölle ilmestyi ”STOP”. Äännön jälkeen koehenkilön tuli arvioida, kummassa intervallissa perturbaatio tapahtui ja kuinka varma hän oli vastauksestaan. Koehenkilö vastasi molempiin kysymyksiin samanaikaisesti erillisellä näppäimistöllä, jossa oli vastausvaihtoehdot 1, 2, 3, 4, 5 ja 6. Kolme ensimmäistä vaihtoehtoa edusti intervallia A ja kolme viimeistä intervallia B. Kyseessä oli siten kahden intervallin pakkovalintatehtävä. Vastausvarmuutta arvioitiin vaihtoehdoilla ”varma”, ”melko varma” ja ”epävarma”. Koehenkilön tuli valita seuraavista vastausvaihtoehdoista: 1 = varma A, 2 = melko varma A, 3 = epävarma A, 4 = epävarma B, 5 = melko varma B ja 6 = varma B. Vastausvaihtoehdot olivat näkyvillä aina vastattaessa, ja vastaamiseen ei ollut aikarajaa.

## Kuva 1

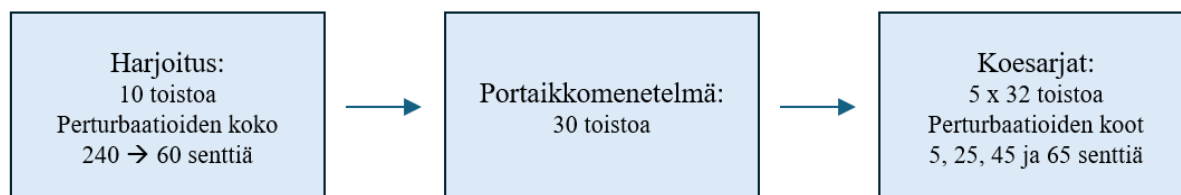
### Koesarjan yhden toiston eteneminen



Tutkimuskäynnin eteneminen on esitetty kuvassa 2. Kokeessa oli kolme osiota: harjoitusosio, portaikko-osio sekä viisi koesarjaa. Perturbaation koko vaihteli kokeen eri osioissa. Ääntämisvasteen ja perturbaation koon yksikkö on sentti. Harjoitusosiossa (10 toistoa) perturbaatiot pienenevät aina 20 senttiä kerrallaan alkaen 240 sentistä ja päättyen 60 senttiin. Harjoitusosion tavoitteena oli tutustuttaa tutkittava kokeeseen ja varmistaa, että koe ymmärrettiin oikein. Harjoitusosion aikana koehenkilö sai välittömän palautteen vastauksen oikeellisuudesta kunkin toiston jälkeen. Harjoitusosion jälkeen koehenkilö ei enää saanut palautetta vastausten oikeellisuudesta. Seuraavaksi määritettiin kunkin koehenkilön henkilökohtainen kuulohavaintokynnys bayesilaisella adaptiivisella QUEST-portaikkomenetelmällä (Watson & Pelli, 1983), jossa oli 30 toistoa. Perturbaation kokoa pienennettiin ja suurennettiin sen mukaan, havaitsiko koehenkilö perturbaation oikein. Henkilökohtainen havaintokynnys määritettiin sellaiseksi perturbaation kooksi, jonka koehenkilö havaitsi oikein keskimäärin 75 % tapauksista. Harjoitusosio ja portaikko-osio toistettiin tarvittaessa, mikäli koehenkilö ei ymmärtänyt ohjeistusta tai laitteisto ei toiminut odotetulla tavalla. Harjoitus- ja portaikko-osioiden jälkeen koehenkilö teki viisi koesarjaa, joissa jokaisessa oli 32 toistoa. Perturbaatioiden suuruudet olivat näissä kaikilla koehenkilöillä samat: 5, 25, 45 sekä 65 senttiä. Jokainen perturbaation koko toistui kussakin koesarjassa kahdeksan kertaa satunnaisessa järjestyksessä.

## Kuva 2

### Tutkimuskäynnin eteneminen



### 3.2.2 Laitteet ja ohjelmistot

Koe suoritettiin Turun yliopiston tiloissa erillisessä tutkimuhuoneessa, jossa käytettäviä laitteita ja materiaaleja myös säilytettiin. Tutkija vastasi laitteiden käytöstä ja toimivuudesta ja oli läsnä koko koetilanteen ajan.

Koehenkilöiden tuottamat äännöt nauhoitettiin kardiodikondensaattorimikrofonilla (Audio-Technica AT2035; etäisyys suusta mikrofoniin noin 2–3 cm), joka oli yhdistettynä MOTU:n ulkoiseen äänikorttiliitäntään (Microbook IIc). Kuulopalaute soitettiin koko korvan peittäville over-ear-kuulokkeilla (Beyerdynamic DT 770 M 80 ohm) noin 75–80 desibelin voimakkuudella. Kuulopalauteeseen lisättiin noin 68 desibelin vaaleanpunainen kohina, jossa kohinateho on jakautunut tasaisesti eri taajuuksille. Näin voitiin minimoida luujohtoisen kuulopalautteen sekä kuulokkeiden epätäydellisestä istuvuudesta johtuvan ilmajohtoisen kuulopalautteen vaikutus. Voimakkuudet valittiin siten, että koehenkilön kuulokkeista kuuleman äänen voimakkuus vastaisi hänen ilman kuulokkeita kuulemansa äänen voimakkuutta.

Koe suoritettiin Psychtoolbox-3-sovelluksella (Brainard, 1997; Kleiner ym., 2007) osana MATLAB R2022a -ohjelmistoa (The MathWorks Inc.). Perturbaatiot tuotettiin Audapter-ohjelmistolla (Cai ym., 2008). Kuulopalaute välitettiin Audapter-ohjelmiston kautta koko äännön ajan, vaikka taajuusperturbaatio tuotettiin vain perturbaatiointervallin aikana. Näin varmistettiin, että perturbaatiointervalli erosi muusta äännöstä vain taajuuden muutoksen osalta. Visuaaliset ärsykkeet esitettiin harmaalla taustalla keskellä 27 tuumaista näyttöä (Dell LED P2717H). Näyttö oli noin 70–75 sentin päässä koehenkilöstä. Vastaukset kerättiin erillisellä näppäimistöllä (Cedrus response pad RB-740). Koehenkilöiden kuulo arvioitiin Interacoustics AS608/e -seulonta-audiometrillä, joka käyttää Hughson Westlake -menettelyä.

Analyysit tehtiin käyttämällä RStudio-tilasto-ohjelmiston lme4 pakettia (Bates ym., 2015). Kuvaajien ja taulukoiden laatimiseen käytettiin sjPlot- (Lüdecke, 2023) ja ggplot-paketteja (Wickham, 2016).

### 3.3 Tutkimuksen toteuttaminen

Koe toteutettiin Turun yliopiston tiloissa vuoden 2023 aikana. Koehenkilöt rekrytoitiin pääasiassa Turun yliopiston psykologian ja logopedian laitoksen koehenkilörekrytointisivuston (psykoehlot.utu.fi) kautta. Koehenkilöille tarjottiin 20 euron palkkio tutkimukseen osallistumisesta. Vaihtoehtoisesti Turun yliopiston opiskelijoilla oli mahdollisuus saada tutkimukseen osallistumisesta psykologian sivu- ja pääaineopintoihin sisältyvää koehenkilösuoritusta.

Neljä logopedian maisterivaiheen opiskelijaa keräsi aineiston. Kokeen suorittaminen kesti koehenkilöltä noin yhden tunnin. Koehenkilöä ohjeistettiin tuottamaan /u/-äänne hänelle luontevalla äänenkorkeudella ja voimakkuudella. Koehenkilöitä ohjattiin pitämään pieniä taukoja kokeen aikana, jotta vältettäisiin koehenkilön väsyminen ja äänen liiallinen rasittuminen. Tutkimuskäynnin aluksi koehenkilö tutustui tutkimustiedotteeseen ja allekirjoitti suostumuksen tutkimukseen osallistumisesta. Ennen kokeen aloittamista koehenkilö sai kirjalliset ja suulliset ohjeet kokeen suorittamisesta. Koehenkilölle kerrottiin, että hänen kuulemaansa ääntä muokataan aina joko A- tai B-intervallin aikana. Äännön jälkeen koehenkilöä pyydettiin arvioimaan, kummassa intervallissa perturbaatio tapahtui ja kuinka varma koehenkilö oli vastauksestaan. Koehenkilö täytti myös kyselyn musikaalisuudesta. Vastausten varmuutta, vastausten oikeellisuutta tai musikaalisuutta ei kuitenkaan tarkastella tässä pro gradu -työssä. Lisäksi koehenkilöt suorittivat toisena päivänä toisen kokeen, jossa tarkoituksena oli havaita perturbaatio oman äänen äänitteestä. Tutkimuskäynnillä täytettiin myös suomennettu metakognitiivisia taitoja arvioiva MSAS-kyselylomake (Metacognition Self-Assessment Scale) (Pedone ym., 2017). Toisella tutkimuskäynnillä kerättyä aineistoa ei käsitellä tässä pro gradu -tutkielmassa.

### 3.4 Tilastolliset menetelmät

Tutkimme havaintokynnyksen yhteyttä VR1- ja VR2-vasteisiin. Tätä tutkittiin tuottamalla jokaiseen osatehtävään yksi perturbaatio. Tuotettu perturbaatio sai useimmiten aikaan kaksi ääntämistä VR1 ja VR2, jotka ajoittuivat kahteen eri ajanhetkeen välittömästi perturbaation alkamisesta. Näistä VR1- ja VR2-vasteiden oletetuista esiintymisajoista

perturbaation alkamisesta käytetään tutkimuksemme tilastollisissa analyyseissä nimitystä aikaikkuna. Tutkittujen vasteiden ilmenemiseen ei vaikuttanut se, tuotettiinko perturbaatio A- vai B-intervalliin. Nämä intervallit jakavat tässä koeasetelmassa osatehtävän kahteen osaan pakkovalintatilanteen luomiseksi, ja perturbaatio luotiin aina vain toiseen intervalleista.

VR1-vastetta tutkittiin ensimmäisessä aikaikkunassa 300–400 ms ja VR2-vastetta toisessa aikaikkunassa 500–700 ms perturbaation alkamisesta, sillä näissä ajanhetkissä ääntämismasteiden keskimääräinen koko oli suurin. VR1- ja VR2-vasteet ajoittuivat siten samoihin ajanhetkiin kuin tutkimuskirjallisuuden perusteella oli odotettavissa (Burnett ym., 1998; Hain ym., 2000; Miller ym., 2023). Alkuperäisessä aineistossa oli 11 680 ääntämismasteen arvoa kussakin aikaikkunassa. Aineistosta rajattiin pois sellaiset ääntämismasteet, jotka olivat itseisarvoltaan 100 senttiä suurempia. Arvot välillä [-100;100] noudattivat normaalijakaumaa, ja välin ulkopuolisia arvoja oli suhteellisen vähän. Ensimmäisestä aikaikkunasta rajattiin pois 232 havaintoa ja toisesta aikaikkunasta 420 havaintoa. Näin ollen lopullisissa analyyseissä oli mukana 11 448 ensimmäisen aikaikkunan ääntämismasteen arvoa ja 11 260 toisen aikaikkunan ääntämismasteen arvoa. Aineistossamme koehenkilöillä oli sekä positiivisia että negatiivisia ääntämismasteita. Vasteiden jakaumat olivat normaalisti jakautuneita, kuten tutkimuskirjallisuuden perusteella voitiin olettaa (Miller ym., 2023). Kompensatoriset ja seuraamismasteet eivät ole kategorisesti erilaisia, vaan molemmat ilmentävät samaa luonnollista vaihtelua, joka noudattaa yksihuippuista normaalijakaumaa (Miller ym., 2023). Tarkastelimme jokaisen koehenkilön ääntämismasteita osatehtävittäin, eikä koehenkilöille laskettu keskimääräisiä ääntämismasteen arvoja.

Ääntämismasteet vaihtelivat sekä koehenkilöiden välillä että yksittäisellä koehenkilöllä toistosta toiseen. Valitsimme analyysimenetelmäksi lineaarisen sekamallin, koska sen avulla molemmat edellä mainitut voidaan ottaa huomioon. Aineistomme oli hierarkkinen eli yksittäisiltä koehenkilöiltä saadut havainnot eivät olleet toisistaan riippumattomia. Lineaarisen sekamallin kiinteät efektit selittävät systemaattista vaihtelua selitettävässä muuttujassa, kun taas satunnaisefektit mahdollistavat yksilölliset vakio- ja kulmakertoimet kullekin koehenkilölle. Voidaan olettaa, että koehenkilöiden välillä on lähtökohtaisesti eroja ääntämismasteissa. Satunnaisefektin sisällyttäminen malliin mahdollistaa näiden erojen huomioon ottamisen. Lineaariseen sekamalliin tulisi valita monimutkaisin satunnaisefektirakenne, jolla malli konvergoituu (Barr ym., 2013).

Analyyseissä käytetyissä lineaarisissa sekamalleissa selitettävänä muuttujina oli ensimmäisen aikaikkunan VR1-vasteet ja toisen aikaikkunan VR2-vasteet. Selittäviä muuttujia olivat perturbaation koko, henkilökohtainen havaintokynnys ja koesarja. Henkilökohtainen havaintokynnys määritettiin sellaiseksi taajuusmuutokseksi, jonka koehenkilö havaitsi 75 % tarkkuudella. 75 % kynnsarvoon päädyttiin, jotta tehtävä olisi koehenkilöille riittävän haastava. Koehenkilöiden havaintokynnysten arvot keskiarvokeskitettiin niin, että jokaisen koehenkilön havaintokynnyksen arvoista vähennettiin keskimääräinen havaintokynnyksen arvo. Perturbaation koot olivat tutkimuksessa 5, 25, 45 ja 65 senttiä, ja niitä käsiteltiin analyyseissä jatkuvana muuttujana, sillä alustavien analyysien perusteella sen todettiin sopivan malleihin parhaiten. Lisäksi perturbaation koot skaalattiin analyysejä varten niin, että viiden sentin perturbaatio asetettiin nollopisteeseen tulosten tulkinnan helpottamiseksi. Koesarja-muuttuja jakoi aineiston viiteen osioon, mutta sitä käsiteltiin analyyseissä jatkuvana muuttujana, jotta mallien rakenne pysyi yksinkertaisempaan. Koesarja-muuttuja sisällytettiin malleihin, jotta voitaisiin tutkia koehenkilöiden ääntämävasteiden muuttumista kokeen edetessä. Mallien vakiotermit kuvaavat tilannetta, jossa on keskimääräinen havaintokynnys, viiden sentin perturbaatio ja ensimmäinen koesarja.

Muodostimme kaksi lineaarista sekamallia, yksinkertaisemman (malli 1) ja monimutkaisemman (malli 2). Nämä mallit luotiin erikseen VR1-vasteille (a) ja VR2-vasteille (b). Selittäjät valittiin malleihin tutkimuskysymysten perusteella. Lopullisiksi malleiksi valittiin mallit, joissa oli tutkimuskysymyksen kannalta olennaisimmat selittäjät ja pienin AIC-arvo (*Akaike Information Criterion*). Mallin pienempi AIC-arvo kertoo paremmasta mallin sovittamisesta. AIC-arvo ottaa huomioon mallin selitysasteen ja rankaisee liiallisesta mallin monimutkaisuudesta ja ylisovittamisesta.

Yksinkertaisimmissa malleissa 1a ja 1b selitettävänä muuttujina olivat VR1- ja VR2-vasteet. Molemmissa malleissa kiinteinä efekteinä eli selittävinä muuttujina olivat havaintokynnys, perturbaation koko, niiden välinen yhdysvaikutus sekä koesarja. Satunnaisefektinä oli koehenkilö eli vakiotermit saivat vaihdella mallissa koehenkilöiden mukaan. Mallit, joissa oli monimutkaisemmat satunnaisefektirakenteet, eivät konvergoituneet.

*malli 1 = ääntämävaste ~ havaintokynnys \* perturbaation koko + koesarja + (1 | koehenkilö)*

Monimutkaisemmissa malleissa 2a ja 2b kiinteinä efekteinä eli selittävinä muuttujina olivat havaintokynnys, perturbaation koko, koesarja sekä kaikkien kolmen muuttujan välinen kolmisuuntainen yhdysvaikutus. Kolmisuuntaisella yhdysvaikutuksella halusimme tarkastella,

vaihtelee havaintokynnyksen ja perturbaation koon välinen yhteys kokeen vaiheen mukaan. Satunnaisefektinä oli koehenkilö eli vakiotermit saivat vaihdella mallissa koehenkilöiden mukaan. Mallit, joissa oli monimutkaisemmat satunnaisefektirakenteet, eivät konvergoituneet.

*malli 2 = ääntämisvaste ~ havaintokynnys \* perturbaation koko \* koesarja + (1 | koehenkilö)*

### 3.5 Tutkimuksen eettisyys

Tutkimus toteutettiin osana Suomen Akatemian rahoittamaa tutkimusprojektia, jonka nimi on ”Oman puheen metakognitiivinen arviointi Parkinsonin tautia sairastavilla ja neurologisesti terveillä ihmisillä: Interventiotutkimus”. Varsinais-Suomen hyvinvointialueen eettinen toimikunta on antanut tutkimuksesta puoltavan lausunnon. Tutkimukseen osallistuminen oli täysin vapaaehtoista. Jokaiselle koehenkilölle kerrottiin tutkimuksen kulusta kirjallisesti ja suullisesti, ja heitä pyydettiin allekirjoittamaan kirjallinen suostumus tutkimukseen osallistumisesta. Koehenkilöt olivat tietoisia oikeudestaan keskeyttää tutkimukseen osallistuminen syytä ilmoittamatta. Koehenkilöt olivat tietoisia myös siitä, että keskeyttämiseen mennessä kerättyjä tietoja käytettäisiin osana tutkimusaineistoa. Yksikään koehenkilö ei kuitenkaan keskeyttänyt tutkimukseen osallistumista.

Koehenkilöille kerrottiin tutkijoiden salassapitovelvollisuudesta. Koehenkilöiltä kerätyt, tunnisteita sisältävät tiedot olivat ainoastaan tutkimuksesta vastaavien tutkijoiden tiedossa. Koehenkilöiden tunnistetietoja sisältävät lomakkeet sekä paperilla oleva aineisto säilytetään Turun yliopiston lukollisissa kaapeissa ja tuhoaan vuonna 2027. Pseudonymisoitu aineisto säilytetään ulkoisilla kovalevyillä ja Turun yliopiston Seafire-palvelimella vähintään 15 vuotta tutkimuksen päättymisen jälkeen. Koehenkilöitä ei ole mahdollista tunnistaa tuloksista tai julkaisuista. Turun yliopisto on tutkimuksen toimeksiantaja ja tutkimusrekisterin rekisterinpitäjä. Koehenkilöt olivat tietoisia rekisterin sisällöstä ja mahdollisuudestaan tilata rekisteriseloste.

## 4 Tulokset

### 4.1 Mallien valinta ja oletusten tarkastelu

Mallien valinta tehtiin AIC-arvoja vertailemalla. VR1-vasteiden mallin 1a AIC-arvo (97 126) oli pienempi kuin mallin 2a AIC-arvo (97 150). Teimme vastaavanlaisen mallivertailun VR2-vasteiden malleille 1b ja 2b. Mallin 1b AIC-arvo (95 035) oli pienempi kuin mallin 2b AIC-arvo (95 061). Kolmisuuntaiset yhdysvaikutustermit eivät parantaneet mallia, joten nämä tekijät eivät selittäneet ääntämismallien vaihtelua merkittävästi.

Selitettävät muuttujat eli VR1- ja VR2-ääntämismallit olivat normaalisti jakautuneita. Mallien jäännöstermit jakautuivat tasaisesti nollan molemmiin puoliin, eli selitettävien muuttujien ja jäännöstermien välillä ei ollut havaittavissa systemaattista yhteyttä. Jäännöstermien varianssit olivat siis yhtä suuret eli homoskedastisuusoletus toteutui. Kaikkien mallien jäännöstermit olivat myös normaalisti jakautuneita. Satunnaisfektin sisällyttäminen malliin 1a paransi sen selitystasetta, mutta selitystaso oli heikko ( $R^2m = .031$ ,  $R^2c = 0.097$ ). Samoin satunnaisfektin sisällyttäminen malliin 1b paransi sen selitystasetta, mutta selitystaso oli heikko ( $R^2m = .020$ ,  $R^2c = 0.089$ ).

Selittäjien väliset korrelaatiot olivat hyvin heikkoja, mikä oli odotettavissa muuttujien erilaisuuden vuoksi. Havaintokynnyksen ja perturbaation koon välinen korrelaatio oli hyvin heikko,  $r < .001$ . Samoin koesarjan ja havaintokynnyksen välinen korrelaatio oli hyvin heikko,  $r = -.003$ . Myös koesarjan ja perturbaation koon välinen korrelaatio oli merkityksetön,  $r < .001$ .

### 4.2 Kuvailevat tunnusluvut ja ääntämismallit ajan suhteen

Ääntämismallien kuvailevat tunnusluvut on esitetty taulukossa 1. Ääntämismallien keskiarvot olivat negatiivisia eli koehenkilöiden ääntämismallit olivat keskimäärin kompensatorisia. Havaintokynnys oli keskimäärin 25.4 senttiä. Ääntämismallit on esitetty eri perturbaatiokoilla aikasarjakuvina kuvassa 3. VR1-vaste on nähtävissä selvemmin kuin VR2-vaste. VR1-vaste näkyy kuvassa ääntämismallien keskiarvokäyrän negatiivisena huippuna kolmella suurimmalla perturbaatiokoolla noin 300–400 millisekuntia perturbaation alkamisesta. VR2-vaste näkyy ääntämismallien keskiarvokäyrän laskuna suurimmilla perturbaatiokoilla noin 500–700 millisekuntia perturbaation alkamisesta. Koehenkilöiden ääntämismallissa oli paljon yksilöllistä vaihtelua.

## Taulukko 1

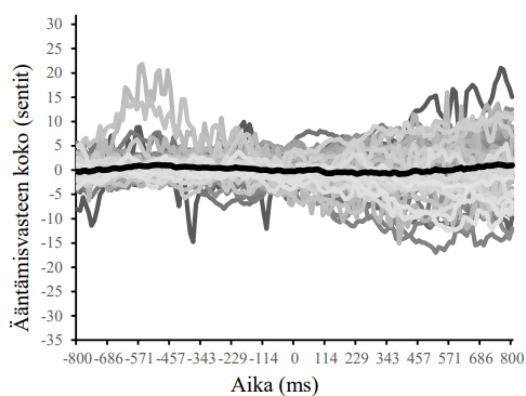
Kuvailevat tunnusluvut senteissä

Muuttuja	N	Ka	Kh	Md	Min.	Maks.
Ääntämisvaste VR1	11 448	-5.2	17.5	-5.1	-96.0	85.5
Ääntämisvaste VR2	11 260	-3.9	17.1	-3.6	-92.5	86.0
Havaintokynnys	73	25.4	11.7	23.9	7.2	50.5

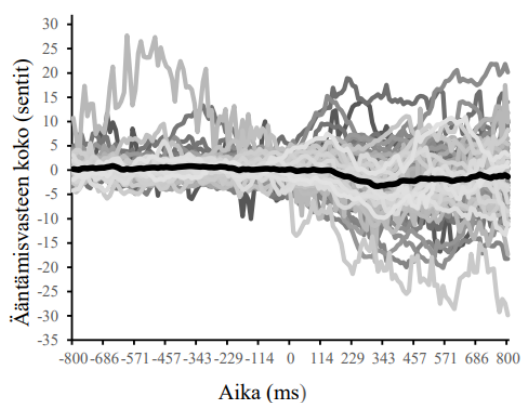
## Kuva 3

VR1- ja VR2-ääntämisvasteet aikasarjakuvina eri perturbaatiokoilla

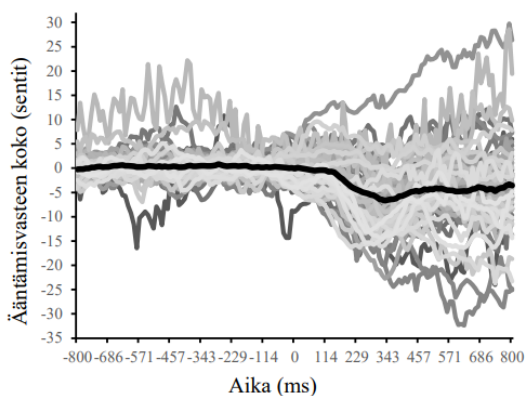
A) Perturbaation koko 5 senttiä



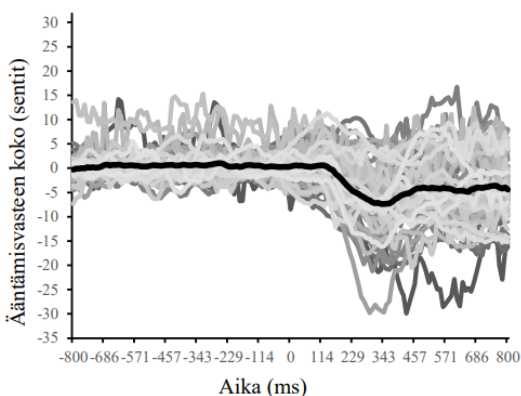
B) Perturbaation koko 25 senttiä



C) Perturbaation koko 45 senttiä



D) Perturbaation koko 65 senttiä



*Huom.* Tummennettu, paksumpi käyrä kuvaa otoskeskiarvoa ja vaaleammat käyrät ovat yksittäisten koehenkilöiden ääntämisvasteita.

### 4.3 VR1-ääntämisvasteet mallissa 1a

Mallin 1a tulokset on raportoitu taulukossa 2. Havaintokynnys ei ennustanut VR1-vasteen kokoa tilastollisesti merkitsevästi ( $t = -0.20, p = .841$ ). Perturbaation koko ennusti VR1-vasteen kokoa tilastollisesti merkitsevästi,  $B = -0.14, SE = 0.007, 95\%CI = [-0.15, -0.12], t = -19.45, p < .001$ . Kun perturbaation koko kasvoi yhden sentin, koehenkilöt laskivat äänenkorkeuttaan keskimäärin 0.14 senttiä. Perturbaation koon päävaikutukset on esitetty kuvassa 4. Koesarja ei ennustanut VR1-vasteen kokoa tilastollisesti merkitsevästi ( $t = -1.50, p = .135$ ).

Havaintokynnyksen ja perturbaation koon välinen yhdysvaikutus on esitetty kuvassa 5. Tarkat havaitsijat tuottivat pienempiä VR1-vasteita perturbaation ollessa suuri, mutta yhdysvaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevä ( $t = -1.61, p = .108$ ).

#### Taulukko 2

##### Lineaarinen sekamalli 1a

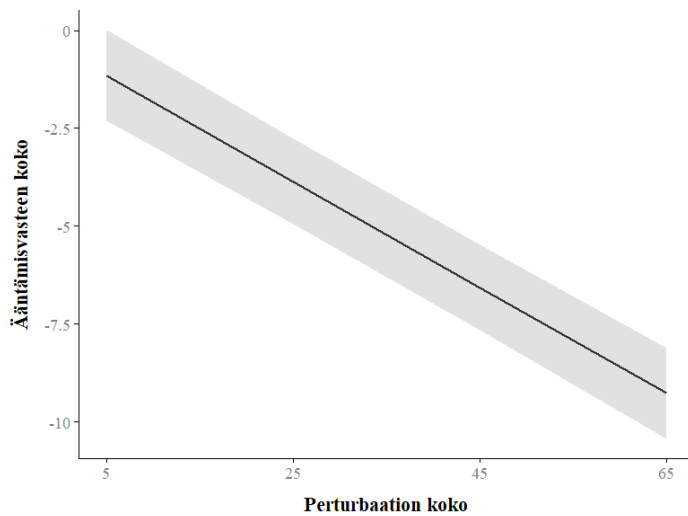
Efektit	<i>B</i>	<i>SE</i>	<i>95% CI</i>		<i>p</i>
Kiinteät efektit					
Vakiotermi	-0.66	0.67	-1.98	0.66	.330
Havaintokynnys	-0.01	0.05	-0.11	0.09	.841
Perturbaation koko	-0.14	0.007	-0.15	-0.12	<b>&lt; .001</b>
Koesarja	-0.16	0.11	-0.38	0.05	.135
Havaintokynnys * Perturbaation koko	-0.001	0.0006	-0.00	0.00	.108
Satunnaisefekti (koehenkilö)					
$\sigma^2$ <sup>a</sup>	277.82				
$T_{00 ID}$ <sup>b</sup>	20.30				
ICC <sup>c</sup>	0.07				
Marginaalinen $R^2$ / Ehdollinen $R^2$	0.031 / 0.097				

N = 73, havaintoja 11 448

a = satunnaisefektin varianssi (eng. *random effects variance*), b = koehenkilöiden välinen varianssi (eng. *between-subject variance*), c = luokkien sisäinen korrelaatiokerroin (eng. *intraclass correlation coefficient*)

#### Kuva 4

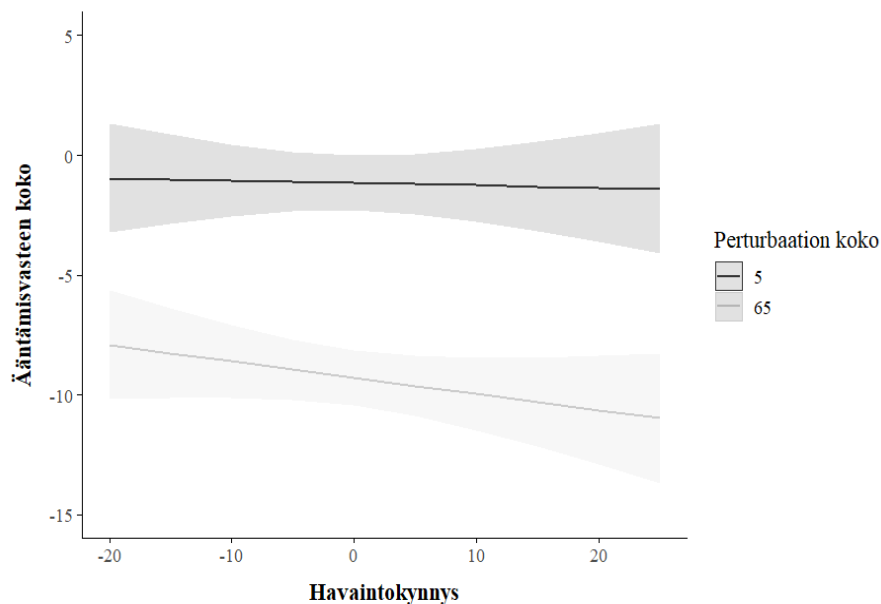
Malli 1a: Perturbaation koon päävaikutukset, VR1-vasteen ennustetut arvot



*Huom.* Kuvan muuttujien yksikkönä on sentti. Ääntämismvasteen arvot ovat mallin perusteella luotuja ennustettuja arvoja. Harmaa alue kuvaa 95 % luottamusvälejä.

#### Kuva 5

Malli 1a: Perturbaation koon ja havaintokynnyksen yhdysvaikutus, VR1-vasteen ennustetut arvot



*Huom.* Kuvan muuttujien yksikkönä on sentti. Havaintokynnyksen arvot on keskitetty niin, että nolla kuvaa keskiarvoista havaintokynnystä. Kuvaan on visualisoitu vain äärimmäiset perturbaation koot. Harmaa alue kuvaa 95 % luottamusvälejä.

#### 4.4 VR2-ääntämisvasteet mallissa 1b

Mallin 1b tulokset on raportoitu taulukossa 3. Havaintokynnys ei ennustanut VR2-vasteen kokoa tilastollisesti merkitsevästi ( $t = -0.05, p = .841$ ). Perturbaation koko ennusti VR2-vasteen kokoa tilastollisesti merkitsevästi,  $B = -0.10, SE = 0.007, 95\%CI = [-0.12, -0.09], t = -15.27, p < .001$ . Kun perturbaation koko kasvoi yhden sentin, koehenkilöt laskivat äänenkorkeuttaan keskimäärin 0.10 senttiä. Perturbaation koon päävaikutukset on esitetty kuvassa 6. Koesarja ei ennustanut VR2-vasteen kokoa tilastollisesti merkitsevästi ( $t = -1.18, p = .239$ ).

#### Taulukko 3

##### Lineaarinen sekamalli 1b

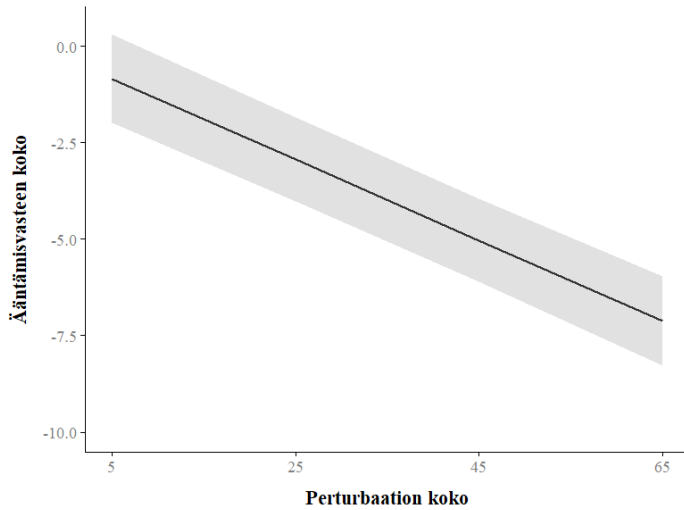
Efektit	<i>B</i>	<i>SE</i>	<i>95% CI</i>		<i>p</i>
Kiinteät efektit					
Vakiotermi	-0.46	0.67	-1.77	0.85	.330
Havaintokynnys	0.002	0.05	-0.10	0.10	.841
Perturbaation koko	-0.10	0.007	-0.12	-0.09	<b>&lt; .001</b>
Koesarja	-0.13	0.11	-0.34	0.08	.239
Havaintokynnys * Perturbaation koko	-0.001	0.0006	-0.00	0.00	<b>.018</b>
Satunnaisefekti (koehenkilö)					
$\sigma^2$ <sup>a</sup>	265.74				
$\tau_{00 ID}$ <sup>b</sup>	20.21				
ICC <sup>c</sup>	0.07				
Marginaalinen $R^2$ / Ehdollinen $R^2$	0.020/ 0.089				

N = 73, havaintoja 11 260

a = satunnaisefektin varianssi (eng. *random effects variance*), b = koehenkilöiden välinen varianssi (eng. *between-subject variance*), c = luokkien sisäinen korrelaatiokerroin (eng. *intraclass correlation coefficient*)

## Kuva 6

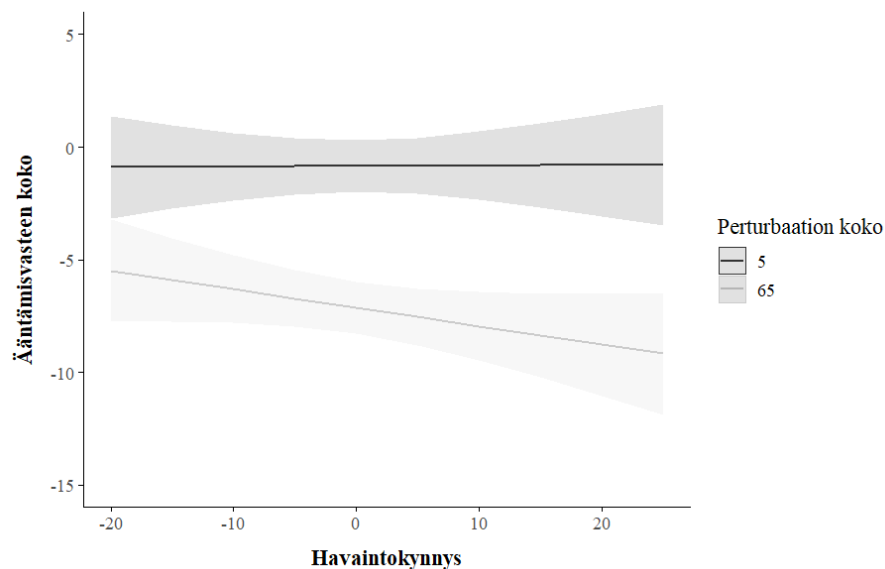
Malli 1b: Perturbaation koon päävaikutukset, VR2-vasteen ennustetut arvot



*Huom.* Kuvan muuttujien yksikkönä on sentti. Ääntämismvasteen arvot ovat mallin perusteella luotuja ennustettuja arvoja. Harmaa alue kuvaa 95 % luottamusvälejä.

## Kuva 7

Malli 1b: Perturbaation koon ja havaintokynnyksen yhdysvaikutus, VR2-vasteen ennustetut arvot



*Huom.* Kuvan muuttujien yksikkönä on sentti. Havaintokynnyksen arvot on keskitetty niin, että nolla kuvaa keskiarvoista havaintokynnystä. Kuvaan on visualisoitu vain äärimmäiset perturbaation koot. Harmaa alue kuvaa 95 % luottamusvälejä.

Havaintokynnyksen ja perturbaation koon välinen yhdysvaikutus on esitetty kuvassa 7. Havaintokynnyksen ja perturbaation koon välillä havaittiin tilastollisesti merkitsevä yhdysvaikutus,  $B = -0.001$ ,  $SE = 0.0006$ ,  $95\%CI = [-0.00,0.00]$ ,  $t = -2.37$ ,  $p = .018$ . Tarkat havaintajat tuottivat pienempiä VR2-vasteita, kun perturbaation koko oli suuri. Havaintokynnyksellä ei ollut vaikutusta VR2-vasteen suuruuteen, kun perturbaation koko oli pieni.

## 5 Pohdinta

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, ennustaako henkilökohtainen havaintokynnys ääntämismvasteita refleksiivisessä muunnetun kuulopalautteen koeasetelmassa. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin, miten havaintokynnys vaikuttaa ääntämismvasteiden muuttumiseen kokeen edetessä. Hypoteesina oli, että ne koehenkilöt, jotka havaitsevat helpommin kuulopalautteeseen tuotettuja perturbaatioita, muuttavat ääntämistään vähemmän kuin koehenkilöt, jotka eivät havaitse perturbaatioita yhtä tarkasti. Hypoteesina oli myös, että havaintokynnys vaikuttaa enemmän VR2-vasteisiin kuin VR1-vasteisiin.

Tulokset tukivat hypoteeseja vain osittain. Havaintokynnys ei yksinään vaikuttanut VR1- tai VR2-vasteisiin. Sen sijaan havaittiin, että ne koehenkilöt, jotka olivat huonompia havaitsemaan perturbaatiota, tuottivat suurempia VR2-vasteita suuriin perturbaatioihin. VR1-vasteissa oli havaittavissa samansuuntainen trendi, mutta tulos ei ollut tilastollisesti merkitsevä. Oletusten mukaisesti havaintokynnyksen vaikutus oli siis suurempi tahdonalaisempiin VR2-vasteisiin. Sen sijaan ääntämismvasteet eivät muuttuneet kokeen edetessä. Kuten aiempien tutkimusten perusteella oli odotettavissa, perturbaation koko vaikutti merkittävästi ääntämismvasteiden kokoon. Pienien perturbaatioiden tuottamat ääntämismvasteet olivat yleisesti ottaen pieniä, kun taas suurilla perturbaatiokoilla ääntämismvasteet olivat selvästi suurempia.

### 5.1 Tulosten kuvaus ja arviointi

#### 5.1.1 Perturbaation koon vaikutus ääntämismvasteisiin

Perturbaation koolla oli suuri vaikutus ääntämismvasteisiin, ja vasteiden koko kasvoi perturbaation koon kasvaessa. Tulos tukee aiempia tutkimuksia, joissa perturbaation koon ja vasteen yhteys on ollut lineaarinen (Chen ym., 2013; Hafke, 2008; Ning, 2020; Scheerer & Jones, 2018). DIVA-mallin mukaisesti ääntämismvasteen koko on useimmiten vain osa perturbaation koosta (H. Liu & Larson, 2007; Scheerer & Jones, 2018; Villacorta ym., 2007), mikä osaltaan selittää vasteiden lineaarisen kasvun perturbaation koon kasvaessa. Tämänkin tutkimuksen tulokset tukevat ajatusta siitä, että kyseessä on vahva ja säännöllisesti eri koeasetelmilla toistuva ilmiö. Koeasetelma vaikuttaisi toimivan myös pienillä perturbaatiokoilla, sillä koehenkilöt tuottivat systemaattisia ääntämismvasteita pieniinkin perturbaatioihin. Tulokset antavat viitteitä myös siitä, että äänen perustaajuutta monitoroidaan hyvin tarkasti. Pienienkin sävy- ja tunne-erojen havaitseminen ja tuottaminen on tärkeää

toimivan vuorovaikutuksen saavuttamiseksi, mikä voi olla syy perustaaajuuden tarkkaan monitorointiin.

### 5.1.2 Havaintokynnyksen yhteys ääntämistävasteisiin

Toisin kuin oletettiin, havaintokynnys ei yksinään vaikuttanut VR1- tai VR2-vasteisiin. Näitä tuloksia voidaan pitää jossain määrin yllättävinä ja erityisesti VR1-vasteen osalta Heller Murrayn ja Steppin (2020) tutkimustulosten vastaisina. Heidän tutkimuksessaan ryhmäkoot olivat kuitenkin pieniä eikä havaintokynnys selittänyt eroja vasteissa silloin, kun mukana oli sekä kompensatorisia että seuraamistävasteita. Myöskään Smithin ja kumppaneiden (2020) tutkimuksessa ei havaittu yhteyttä havaintokynnyksen ja ääntämistävasteiden välillä.

Oletusten mukaisesti havaintokynnys vaikutti voimakkaammin VR2-vasteeseen kuin VR1-vasteeseen, sillä havaintokynnyksellä oli vaikutusta VR2-vasteisiin suurilla perturbaatioilla. Syynä voi olla VR1-vasteen refleksiivisyys, jolloin havaintokynnys vaikuttaisi siihen vähemmän. Sen sijaan VR2-vasteeseen pystytään paremmin vaikuttamaan, joten tarkat havaintosijat kykenevät ehkä paremmin ylläpitämään äänen perustaaajuutensa vakaana huolimatta kuulopalautteeseen tuotetusta häiriöstä. Toisaalta voi olla, että tarkoilla havaintosijoilla ei välttämättä ollut pienempiä vasteita suurilla perturbaatioilla, vaan heillä oli enemmän seuraamistävasteita. Näin ollen heidän vasteensa olisivat olleet vähemmän negatiivisia. Havaintokynnyksen vaikutus olisi saattanut näyttäytyä suurempana, jos seuraamistävasteet olisi poistettu, mutta se olisi voinut samalla vääristää tuloksia.

Voidaan pohtia, miksi havaintokynnyksen vaikutus ilmeni VR2-vasteessa suurilla perturbaatioilla, mutta ei pienemmällä perturbaatioilla. Heller Murrayn ja Steppin (2020) tutkimuksessa, jossa havaittiin yhteys havaitsemistarkkuuden ja ääntämistävasteiden välillä, käytettiin myös suuria sadan sentin perturbaatioita. Tutkimuksessamme suurin käytetty perturbaatio ylitti heikoimmankin havaintokynnyksen (50.5 senttiä) eli kaikki koehenkilöt ovat kyenneet tietoisesti havaitsemaan suurimmat perturbaatiot. Toisaalta pienimmät perturbaatiot jäivät tarkimmankin havaintokynnyksen (7.2 senttiä) alapuolelle eli tarkimmatkaan havaintosijat eivät ole ainakaan kokeen alussa tietoisesti havainneet pienimpiä perturbaatioita. He ovat tosin voineet kokeen aikana harjaantua kuulemaan myös kaikkein pienimmät perturbaatiot. Tarkat havaintosijat ovat saattaneet todennäköisemmin tulkita pienempiäkin perturbaatioita ympäristöstä lähtöisiksi ja osata helpommin erottaa ne oman äänensä vaihtelusta. Sen sijaan heikommat havaintosijat ovat voineet tiedostamattaan tulkita suurempiäkin perturbaatioita itsestä lähtöisiksi ja tuottaa niihin suurempia vasteita. Voi olla, että tarkatkaan havaintosijat eivät enää erota

pienimpiä perturbaatioita puheelle luonnollisesta taajuuden vaihtelusta, minkä takia havaintokynnys ei vaikuta vasteisiin pienillä perturbaatioilla. Toisaalta pienemmillä perturbaatioilla ääntämismasteet ovat ylipäättään pienempiä, joten havaintokynnyksen vaikutus ääntämismasteisiin ei välttämättä ilmene.

On myös mahdollista, että havaintokynnyksen ja ääntämismasteiden yhteys selittyisikin harjaantumisella, jota tapahtuu erityisesti adaptaatiotutkimuksissa. Adaptaatiotutkimuksissa ääntämismasteiden ja havaintokynnyksen yhteys on ollut päinvastainen kuin tutkimuksessamme havaittu yhdysvaikutus sekä Heller Murrayn ja Steppin (2020) tutkimuksessa havaittu yhteys VR1-vasteiden ja havaintokynnyksen välillä. Heller Murrayn ja Steppin (2020) tutkimuksessa ennustettaviin perturbaatioihin tuotetut adaptiiviset ääntämismasteet korreloivat negatiivisesti ennustamattomiin perturbaatioihin tuotettuihin kompensatorisiin ääntämismasteisiin. Ne lapset, jotka tuottivat suurempia vasteita refleksiivisessä koeasetelmassa, tuottivat pienempiä vasteita adaptiivisessa koeasetelmassa. Tulokset antoivat viitteitä siitä, että lapset tuottivat suurempia ääntämismasteita, jos puheen tuoton ja havaitsemisen järjestelmät olivat kypsymättömiä (Heller Murray & Stepp, 2020). DIVA-mallin mukaisesti lapset vasta oppivat kieltä ja tukeutuvan sen takia aikuisia enemmän palautejärjestelmiin kuin syötekytkentäjärjestelmään (Guenther, 2006; Heller Murray & Stepp, 2020). Ei voida suoraan sanoa, että heikompien havaitsijoiden puheen monitorointi olisi samalla tavalla kypsymättömpiä kuin lasten, mutta aikuistenkin välillä voi olla eroja palaute- ja syötekytkentäjärjestelmien harjaantuneisuudessa. Tutkimuksessamme tarkoilla havaitsijoilla syötekytkentäjärjestelmän tai somatosensorisen järjestelmän toiminta on voinut olla harjaantuneempaa, jolloin erityisesti suurilla perturbaatioilla VR2-vaste on voinut olla pienempi. Heikommat havaitsijat ovat puolestaan saattaneet tukeutua pidempään kuulopalautejärjestelmään suurillakin perturbaatiokoilla, joten heidän vasteensa ovat siksi saattaneet olla suurempia.

Voidaan pohtia, missä määrin tarkka havaintokynnys ja musikaalisuus kuvastavat samaa ilmiötä. Vaikka kyseessä ei olekaan täysin sama asia, voidaan silti olettaa, että tarkat havaitsijat hakeutuvat herkemmin harrastamaan musiikkia ja toisaalta musiikkiharrastus kehittää kykyä erottaa eri taajuuksia ja säveliä toisistaan. On havaittu, että muusikot tuottavat pienempiä ääntämismasteita ja siirtyivät nopeammin takaisin perturbaatiota edeltäneeseen taajuuteen (Ning, 2020). Saattaa siis olla, että muusikoilla ja sävelkieliä osaavilla on vakiintuneemmat motoriset mallit äänentaajuudesta, ja siksi kuulopalautteeseen tukeuduttaisiin vähemmän (Ning, 2022). Sävelkieliä puhuvat henkilöt saattavat olla muita taitavampia siirtymään puheen syötekytkentä- ja palautejärjestelmän välillä (Ning, 2022). He pystyvät kenties halutessaan

jättämään perturbaatiot huomiotta ja toisaalta käyttämään niitä taajuutensa pidempikestoiseen muokkaamiseen. Tämä selitys tukee havaintoa siitä, että havaintokynnyksen yhteys ääntämismuutoksiin vaikuttaisi ilmenevän eri tavalla refleksiivisissä ja adaptiivisissa koeasetelmissa. Voi olla, että tutkimuksessamme tarkat havaitsijat ovat jättäneet perturbaatiot paremmin huomiotta ja pyrkineet nopeammin palauttamaan äänen perustaajuuden takaisin itselleen luontaiselle tasolle, jolloin VR2-vaste on jäänyt pienemmäksi kuin heikommilla havaitsijoilla.

Tutkimuksessamme käytetyt pienimmät perturbaatiot olivat pienempiä kuin useimpien koehenkilöiden havaintokynnykset. Tämä saattaa kertoa ääntämismuutosten automaattisuudesta ja siitä, että äänen perustaajuutta monitoroidaan ilman tietoista havaitsemista. On esitetty, että yksilöiden kyvyt havaita muutoksia kuulopalautteessa eivät välttämättä heijastele heidän kykyjään korjata virheitä omassa tuotossaan (Alemi ym., 2020; Smith ym., 2020). Virheen havaitseminen ja korjaaminen ovatkin erillisiä, vaikkakin toisiinsa kytkeytyneitä prosesseja (Alemi ym., 2020). Useat eri järjestelmät osallistuvat äänen perustaajuuden virheiden korjaamiseen, joten havaintokynnys ei luultavasti yksinään määritä ääntämismuutosten suuruutta. Vasteisiin voi vaikuttaa havaintokynnyksen lisäksi jokin sekoittava muuttuja, esimerkiksi äänen sisältämän vaihtelun määrä (Scheerer & Jones, 2012), jonka on huomattu vaikuttavan vasteiden suuruuteen. Tarkoilla havaitsijoilla voisi siis esiintyä myös vähemmän oman äänen perustaajuuden vaihteluita.

### 5.1.3 Ääntämismuutosten muuttuminen kokeen edetessä

Tämä tutkimus on tietävästi ensimmäinen, jossa ääntämismuutosten muuttumista kokeen edetessä tarkasteltiin refleksiivisessä koeasetelmassa. Mallin valinnassa havaittiin, että AIC-arvojen mukaan kolmisuuntaiset yhdysvaikutustermit eivät parantaneet mallia. Havaintokynnys ei siis vaikuttanut siihen, miten vasteet muuttuivat kokeen edetessä. Valituissa malleissa ei myöskään havaittu koesarjan päävaikutusta, eli koehenkilöt eivät adaptoituneet tai habituoituneet kokeen edetessä. Tulos on yllättävä, sillä ääntämismuutokset kasvavat usein kokeen edetessä adaptiivista koeasetelmaa käyttävissä tutkimuksissa, joissa on vastaava määrä osatehtäviä.

Käyttämämme koeasetelma on saattanut vaikuttaa tuloksiin. Koeasetelma muistutti sekä adaptiivista että refleksiivistä asetelmaa, sillä epäsäännöllisen kokoiset ja ajanhetkiltään vaihtelevat perturbaatiot tuotettiin jokaiseen osatehtävään. DIVA-mallin mukaisesti syötekytkentäjärjestelmä on aktiivinen perturbaatioiden ollessa ennustettavia, ja

palautejärjestelmään tukeudutaan niiden ollessa ennustamattomia (Scheerer & Jones, 2014). Ennustamattomat perturbaatioiden koot tuottavat suurempia ääntämismasteita, ja niissä havaitaan enemmän vaihtelua osatehtävästä toiseen (Scheerer & Jones, 2014). Tutkimuksessamme koehenkilöt saattoivat tukeutua enemmän palautejärjestelmään, jolloin syötekytkentäjärjestelmän käskyt eivät ehtineet päivittyä. Näin ollen adaptaatiota ei ilmennyt ja koehenkilöiden suoriutuminen ei juuri muuttunut kokeen edetessä. Myös se, että koehenkilöt eivät habituoituneet, voisi selittyä perturbaatioiden epäsäännöllisyydellä ja ennustamattomuudella. Habituaatioprosessi häiriintyy, jos ärsykkeeseen tulee odottamattomia muutoksia (Phelps, 2011). Lisäksi habituoituminen kestää pidempään, jos ärsyke esitetään ennakoimattomalla tavalla.

## 5.2 Tutkimuksen vahvuudet ja rajoitukset

### 5.2.1 Otoksen ominaisuudet

Sikäli kuin tiedämme, tämän tutkimuksen otoskoko oli yksi refleksiivisten taajuusperturbaatiotutkimusten suurimmista. Jos havaintokynnys olisi yhteydessä ääntämismasteisiin, erojen voisi olettaa ilmenevän näin suurella otoskoolla. Otos oli kuitenkin hyvin homogeeninen, sillä koehenkilöt olivat enimmäkseen nuoria aikuisia, joista suurin osa (85 %) oli naisia. Otos ei siis vastannut populaation ikä- ja sukupuolijakaumaa, joten tulosten yleistettävyyttä saattaa olla heikentynyt. Ääntämismasteiden on havaittu kasvavan iän myötä, ja suurimmillaan vasteet ovat keski-ikäisillä henkilöillä (P. Liu ym., 2011). Lähes kaikki koehenkilöt edustivat samaa ikäryhmää, joten iällä ei todennäköisesti ollut mediaattorivaikutusta ääntämismasteisiin.

Sukupuoli saattaa välillisesti vaikuttaa ääntämismasteisiin, koska biologinen sukupuoli määrittää äänen perustaajuutta. Naisilla äänen perustaajuus on usein korkeampi kuin miehillä, ja on havaittu, että äännön korkea perustaajuus on saanut aikaan suurempia vasteita kuin matalampi perustaajuus (H. Liu & Larson, 2007). Selityksenä voi olla se, että korkean perustaajuuden ylläpito vaatii enemmän kuulopalautteeseen tukeutumista, jolloin myös perturbaatiot huomataan herkemmin. Lisäksi on havaittu, että äänen huojuntaa tapahtuu enemmän matalan taajuuden äännössä, mikä voi vaikuttaa vasteiden kokoon (H. Liu & Larson, 2007).

Tuloksiin on saattanut vaikuttaa myös koehenkilöiden väsyminen. Osatehtävät olivat samanlaisia ja toistoja oli paljon, joten koehenkilöiden tarkkaavuus on voinut heikentyä kokeen

edetessä. Toisaalta tarkkaavaisuudella ei ole vaikutusta ääntämismuutoksiin silloin, kun perturbaatiot ovat vaihtelevia ja ennakoimattomia (Hu ym., 2015; Y. Liu ym., 2015), kuten tutkimuksessamme käytetyt perturbaatiot olivat. Myös koehenkilöiden ääni on saattanut väsyä kokeen edetessä, mikä on voinut lisätä äänen huojuntaa ja siten vaikeuttaa perturbaatioiden tietoista havaitsemista. Toisaalta perturbaation tietoisesta havaitsemisesta vaikutus ääntämismuutoksiin on rajallinen eikä useinkaan välttämätön (Hafke, 2008).

Voidaan olettaa, että epätasaisella sukupuolijakaumalla, tarkkaavaisuuden heikentymisellä tai äänen väsymisellä ei ollut merkittävää systemaattista vaikutusta tämän tutkimuksen tuloksiin, sillä ääntämismuutokset ovat pitkälti refleksiivisiä. Tutkimuksessa käytettiin toistomittausasetelmaa, mikä pienentää systemaattisen virheen mahdollisuutta. Lisäksi havaintokynnysten ja ääntämismuutosten arvot noudattivat normaalijakaumaa, otoskoko oli suuri ja osatehtäviä paljon. Edellä mainituista syistä tulosten voisi olettaa olevan kattava kuvaus ilmiöstä.

### 5.2.2 Koeasetelma

Aineiston keräsi neljä logopedian maisterivaiheen opiskelijaa. Ohjeistuksissa pyrittiin yhtenäisyyteen, mutta tutkijakohtaiset sanalliset ohjeistukset ovat saattaneet vaihdella. Myös koehenkilöiden tuottamien vokaaliääntöjen laatu on voinut vaihdella, ja esimerkiksi äänenvoimakkuutta ei aktiivisesti kontrolloitu. Äänenvoimakkuus vaikuttaa niin tuotettuun äänentaajuuteen kuin kuulopalautteen intensiteettiin, mikä on saattanut lisätä vaihtelua koehenkilöiden suoriutumisessa. Kuulopalautteen äänenvoimakkuus on aina suhteessa tuotetun äännon voimakkuuteen. Koehenkilö, joka tuottaa ääntä voimakkaalla äänellä, kuulee siis myös kuulopalautteen voimakkaampana. Toisaalta äänen monitorointi ei suuresti häiriinny, vaikka kuulopalautteen intensiteetti (dB) muuttuisi (Burnett ym., 1998). Myös koehenkilöiden etäisyys mikrofonista saattoi vaihdella, koska mikrofoni ja kuulokkeet olivat toisistaan erillisiä. Pääpantamikrofonia käyttämällä mikrofonin ja suun etäisyys pystyttäisiin jatkossa paremmin vakiomaan. Mittauksesta johtuvaa koehenkilöiden välistä vaihtelua pystyttäisiin siten vähentämään.

Henkilökohtaisen havaintokynnyksen määrittely ja mittaaminen vaihtelee tutkimuksesta toiseen. Pitkään ja laajasti käytetyn QUEST-portaikkomenetelmän (Watson & Pelli, 1983) käyttäminen havaintokynnyksen määrittelyssä mahdollistaa tutkimusten vertailun ja mahdollisen replikoinnin. Tutkimuksessamme QUEST-portaikkomenetelmällä saatiin määritettyä tarkka havaintokynnys oman äänen perustaajuuteen tehtäviin muutoksiin. Sen

sijaan monissa muissa tutkimuksissa (Cai ym., 2012; Martin ym., 2018; Villacorta ym., 2007) on käytetty menetelmiä, joissa havaintokynnys on määritetty pienimmäksi mahdolliseksi eroiksi, jonka koehenkilö havaitsee kahden yksikön välillä (eng. *just notable difference*). QUEST-menetelmällä voidaan näitä menetelmiä luotettavammin määrittää pienin mahdollinen absoluuttinen perturbaation koko, jonka koehenkilö kykenee havaitsemaan oman äänensä perustaajuudesta.

Tutkimuksemme portaikkomenetelmän heikkous oli kuitenkin toistojen suhteellisen vähäinen määrä. Kokeen kymmenen toiston harjoitteluosuus oli lyhyt, eikä välttämättä antanut koehenkilölle riittävästi aikaa totutella tehtävään. Koehenkilön suoriutuminen ei ollut välttämättä vielä vakiintunut portaikko-osioon siirryttäessä, ja tehtävän harjoittelu saattoi jatkua vielä portaikon ensimmäisten toistojen aikana. Portaikko-osuuden kolmekymmentä toistoa ei välttämättä ole ollut riittävä tarkan havaintokynnyksen mittaamiseksi. Harjoittelun jatkuminen, poikkeavat arvot ja inhimilliset virheet ovat saattaneet määrittää havaintokynnyksen arvon todellista korkeammaksi. Suurempi toistojen määrä portaikko-osuudessa olisi saattanut laskea havaintokynnyksen arvoa yksilö- ja ryhmätasolla.

### **5.3 Tutkimuksen merkitys ja jatkotutkimusehdotuksia**

Tutkimuksessamme havaittiin, että havaintokynnyksellä oli vaikutusta VR2-vasteisiin suurilla perturbaatioilla. Tulosta voidaan pitää merkittävänä, sillä tämä on tietävästi ensimmäinen tutkimus, jossa tutkittiin havaintokynnyksen yhteyttä VR2-vasteisiin. Havaintokynnyksen vaikutus voi ilmetä nimenomaan VR2-vasteissa, joihin pystytään tietoisella havaitsemisella mahdollisesti vaikuttamaan enemmän kuin VR1-vasteisiin. Tutkimuksemme tulos vahvisti tutkimuskirjallisuudessa esitettyä ajatusta siitä, että havaitsemistarkkuus olisi yhteydessä tarkempaan puheen monitorointiin. VR2-vasteita tulisi jatkossa tutkia enemmän, sillä vasteen avulla voitaisiin paremmin ymmärtää puheen monitoroinnin prosesseja ja palautejärjestelmien toimintaa.

Tämä tutkimus ei havainnut selvää yhteyttä havaintokynnyksen ja VR1-vasteiden välillä. Tulos vahvistaa käsitystä vasteen automaattisuudesta. Systemaattisia vasteita havaittiin jo hyvin pienilläkin perturbaatioilla, joten saattaa olla, ettei perustaajuuden muutoksille ole lainkaan havaintokynnystä. Tällöin kaikki muutokset havaittaisiin hermoston tasolla ja syntyvään vasteeseen ei merkittävästi vaikuttaisi henkilön kyky havaita taajuusmuutoksia. Voidaan myös pohtia, vaikuttaako VR1-vasteen ja havaintokynnyksen yhteyteen jokin sekoittava muuttuja, jolla on mediaattori- tai moderaattorivaikutuksia. Mahdollisia sekoittavia muuttujia, kuten

äänen vaihtelua (Scheerer & Jones, 2012), tulisi tarkastella tulevissa tutkimuksissa myös havaintokynnyksen näkökulmasta.

Ääntämismuutokset eivät muuttuneet kokeen edetessä, vaikka koe oli suhteellisen pitkä ja sisälsi paljon toistoja. Voi kuitenkin olla, että koska kokeemme sisälsi piirteitä sekä refleksiivisistä että adaptiivisesta koeasetelmasta, myös tulokset saattavat olla yhdistelmä näistä eri koeasetelmista saaduista tuloksista. Jatkossa havaintokynnyksen yhteyttä ääntämismuutosten muuttamiseen kokeen edetessä voisi tarkastella tutkimuksessa, jossa käytettäisiin erikseen refleksiivistä ja adaptiivista koeasetelmaa samoilla koehenkilöillä. Tämä mahdollistaisi eri asetelmien tuottamien tulosten vertailun. Erillisten asetelmien avulla voitaisiin tutkia, miten havaintokynnys vaikuttaa syötekytkentä- ja palautejärjestelmien välillä siirtymiseen.

Tutkimuksemme toteutettiin osana tutkimusprojektia, jossa yhtenä tutkimusaiheena on Parkinsonin tautia sairastavien henkilöiden kuulopalautejärjestelmän toiminta. Parkinsonin tautia sairastavien henkilöiden ääntämismuutosten on havaittu olevan poikkeavia (Abur ym., 2018; Chen ym., 2013; Li ym., 2021; H. Liu ym., 2012; Mollaei ym., 2013), ja niiden on myös havaittu muuttuvan puheterapian myötä (Li ym., 2021). Saattaa olla, että Parkinsonin tautia sairastavien henkilöiden syötekytkentäjärjestelmän toiminta on heikentynyt ja palautejärjestelmän toiminta korostunut (Chen ym., 2013). Tutkimuksemme tuloksia havaintokynnyksen ja VR2-vasteen yhteydestä voidaan hyödyntää Parkinsonin tautia sairastavien henkilöiden puheen monitoroinnin mahdollisten muutosten ymmärtämisessä. VR2-vasteet ovat osin tietoisesti säädeltävissä, joten esimerkiksi puheterapialla voisi olla vaikutusta puheen tietoisempaan monitorointiin. Oman puheen tietoisesta havaitsemisesta harjoittaminen osana puheterapiaa saattaisi vakauttaa Parkinson-potilaiden käsitystä oman äänensä muutoksista ja siten vahvistaa syötekytkentäjärjestelmän toimintaa. Kuntoutus voisi auttaa kohentamaan ja ylläpitämään arjen puheilmaisuutta ja siten sillä saattaisi olla merkittäviä vaikutuksia yksilöiden elämänlaatuun.

## Lähteet

- Abur, D., Lester-Smith, R. A., Daliri, A., Lupiani, A. A., Guenther, F. H., & Stepp, C. E. (2018). Sensorimotor adaptation of voice fundamental frequency in Parkinson's disease. *PLoS ONE*, *13*(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191839>
- Alemi, R., Lehmann, A., & Deroche, M. L. D. (2020). Adaptation to pitch-altered feedback is independent of one's own voice pitch sensitivity. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73932-1>
- Alemi, R., Lehmann, A., & Deroche, M. L. D. (2023). Changes in spoken and sung productions following adaptation to pitch-shifted auditory feedback. *Journal of Voice*, *37*(3). <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2021.02.016>
- Barr, D. J., Levy, R., Scheepers, C., & Tily, H. J. (2013). Random effects structure for confirmatory hypothesis testing: Keep it maximal. *Journal of Memory and Language*, *68*(3), 255–278. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2012.11.001>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, *67*(1), 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Behroozmand, R., Korzyukov, O., Sattler, L., & Larson, C. R. (2012). Opposing and following vocal responses to pitch-shifted auditory feedback: Evidence for different mechanisms of voice pitch control. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *132*(4), 2468–2477. <https://doi.org/10.1121/1.4746984>
- Brainard, D. H. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, *10*(4), 433–436. <https://doi.org/10.1163/156856897X00357>
- Burnett, T. A., Freedland, M. B., Larson, C. R., & Hain, T. C. (1998). Voice F0 responses to manipulations in pitch feedback. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *3153-3161*. <https://doi.org/10.1121/1.423073>

- Cai, S., Beal, D. S., Ghosh, S. S., Tiede, M. K., Guenther, F. H., & Perkell, J. S. (2012). Weak responses to auditory feedback perturbation during articulation in persons who stutter: Evidence for abnormal auditory-motor transformation. *PLoS ONE*, 7(7).  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041830>
- Cai, S., Boucek, M., Ghosh, S. S., Guenther, F. H., & Perkell, J. S. (2008). A System for Online Dynamic Perturbation of Formant Trajectories and Results from Perturbations of the Mandarin Triphthong /iau/. *Proceedings of the 8th International Seminar on Speech Production*, 65–68.
- Chen, X., Zhu, X., Wang, E. Q., Chen, L., Li, W., Chen, Z., & Liu, H. (2013). Sensorimotor control of vocal pitch production in Parkinson's disease. *Brain Research*, 1527, 99–107 <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.06.030>
- Clark, J. P., Adams, S. G., Dykstra, A. D., Moodie, S., & Jog, M. (2014). Loudness perception and speech intensity control in Parkinson's disease. *Journal of Communication Disorders*, 51, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2014.08.001>
- Daliri, A., Chao, S.-C., & Fitzgerald, L. C. (2020). Compensatory responses to formant perturbations proportionally decrease as perturbations increase. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 63(10), 3392–3407.  
[https://doi.org/10.1044/2020\\_JSLHR-19-00422](https://doi.org/10.1044/2020_JSLHR-19-00422)
- Feng, Y., Gracco, V. L., & Max, L. (2011). Integration of auditory and somatosensory error signals in the neural control of speech movements. *Journal of Neurophysiology*, 106(2), 667–679. <https://doi.org/10.1152/jn.00638.2010>
- Franken, M. K., Acheson, D. J., McQueen, J. M., Hagoort, P., & Eisner, F. (2018). Opposing and following responses in sensorimotor speech control: Why responses go both ways. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(4), 1458–1467. <https://doi.org/10.3758/s13423-018-1494-x>

- Franken, M. K., Hartsuiker, R. J., Johansson, P., Hall, L., & Lind, A. (2023). Don't blame yourself: Conscious source monitoring modulates feedback control during speech production. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 76(1), 15–27.  
<https://doi.org/10.1177/174702182210756>
- Guenther, F. H. (2006). Cortical interactions underlying the production of speech sounds. *Journal of Communication Disorders*, 39(5), 350–365.  
<https://doi.org/10.1016/j.jcomdis.2006.06.013>
- Hafke, H. Z. (2008). Nonconscious control of fundamental voice frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(1), 273–278.  
<https://doi.org/10.1121/1.2817357>
- Hain, T. C., Burnett, T. A., Kiran, S., Larson, C. R., Singh, S., & Kenney, M. K. (2000). Instructing subjects to make a voluntary response reveals the presence of two components to the audio-vocal reflex. *Experimental Brain Research*, 130(2), 133–141.  
<https://doi.org/10.1007/s002219900237>
- Hantzsch, L., Parrell, B., & Niziolek, C. A. (2022). A single exposure to altered auditory feedback causes observable sensorimotor adaptation in speech. *eLife*, 11.  
<https://doi.org/10.7554/eLife.73694>
- Heller Murray, E. S., & Stepp, C. E. (2020). Relationships between vocal pitch perception and production: A developmental perspective. *Scientific Reports*, 10(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-60756-2>
- Ho, A. K., Bradshaw, J. L., & Ianssek, R. (2000). Volume perception in Parkinsonian speech. *Movement Disorders*, 15(6), 1125–1131. [https://doi.org/10.1002/1531-8257\(200011\)15:6<1125::AID-MDS1010>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1531-8257(200011)15:6<1125::AID-MDS1010>3.0.CO;2-R)

- Hu, H., Liu, Y., Guo, Z., Li, W., Liu, P., Chen, S., & Liu, H. (2015). Attention modulates cortical processing of pitch feedback errors in voice control. *Scientific Reports*, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep07812>
- Kearney, E., Nieto-Castañón, A., Falsini, R., Daliri, A., Heller Murray, E. S., Smith, D. J., & Guenther, F. H. (2022). Quantitatively characterizing reflexive responses to pitch perturbations. *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.929687>
- Kleiner, M., Brainard, D., & Pelli, D. (2007). What's new in Psychtoolbox-3? *Perception*, 36(14), 1–16.
- Korzyukov, O., Bronder, A., Lee, Y., Patel, S., & Larson, C. R. (2017). Bioelectrical brain effects of one's own voice identification in pitch of voice auditory feedback. *Neuropsychologia*, 101, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.04.035>
- Li, Y., Tan, M., Fan, H., Wang, E. Q., Chen, L., Li, J., Chen, X., & Liu, H. (2021). Neurobehavioral effects of LSVT® LOUD on auditory-vocal integration in Parkinson's disease: A preliminary study. *Frontiers in Neuroscience*, 15. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.624801>
- Liu, H., & Larson, C. R. (2007). Effects of perturbation magnitude and voice F0 level on the pitch-shift reflex. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(6), 3671–3677. <https://doi.org/10.1121/1.2800254>
- Liu, H., Wang, E. Q., Metman, L. V., & Larson, C. R. (2012). Vocal responses to perturbations in voice auditory feedback in individuals with Parkinson's disease. *PLoS ONE*, 7(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033629>

- Liu, P., Chen, Z., Jones, J. A., Huang, D., & Liu, H. (2011). Auditory feedback control of vocal pitch during sustained vocalization: A cross-sectional study of adult aging. *PLoS ONE*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0022791>
- Liu, Y., Hu, H., Jones, J. A., Guo, Z., Li, W., Chen, X., Liu, P., & Liu, H. (2015). Selective and divided attention modulates auditory–vocal integration in the processing of pitch feedback errors. *European Journal of Neuroscience*, 42(3), 1895–1904. <https://doi.org/10.1111/ejn.12949>
- Lüdecke, D. (2024). sjPlot: Data visualization for statistics in social science. R package version 2.8.16. <https://CRAN.R-project.org/package=sjPlot>
- Martin, C. D., Niziolek, C. A., Duñabeitia, J. A., Perez, A., Hernandez, D., Carreiras, M., & Houde, J. F. (2018). Online adaptation to altered auditory feedback is predicted by auditory acuity and not by domain-general executive control resources. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00091>
- Maas, E., Mailend, M. L., & Guenther, F. H. (2015). Feedforward and feedback control in apraxia of speech: Effects of noise masking on vowel production. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 58(2), 185–200. [https://doi.org/10.1044/2014\\_JSLHR-S-13-0300](https://doi.org/10.1044/2014_JSLHR-S-13-0300)
- Miller, H. E., Kearney, E., Nieto-Castañón, A., Falsini, R., Abur, D., Acosta, A., Chao, S.-C., Dahl, K. L., Franken, M., Heller Murray, E. S., Mollaei, F., Niziolek, C. A., Parrell, B., Perrachione, T., Smith, D. J., Stepp, C. E., Tomassi, N., & Guenther, F. H. (2023). Do not cut off your tail: A mega-analysis of responses to auditory perturbation experiments. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 66(11), 4315–4331. [https://doi.org/10.1044/2023\\_JSLHR-23-00315](https://doi.org/10.1044/2023_JSLHR-23-00315)

- Mollaei, F., Shiller, D. M., & Gracco, V. L. (2013). Sensorimotor adaptation of speech in Parkinson's disease. *Movement Disorders*, *28*(12), 1668–1674.  
<https://doi.org/10.1002/mds.25588>
- Ning, L.-H. (2020). Sensorimotor adaptation and aftereffect to frequency-altered feedback in Mandarin-speaking vocalists and non-vocalists. *Concentric. Studies in Linguistics*, *46*(2), 125–147. <https://doi.org/10.1075/cons1.00015.nin>
- Ning, L.-H. (2022). Comparison of involuntary and volitional responses to pitch-shifted auditory feedback: Evidence for tone speakers' flexibility to switch between opposing and following responses. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *65*(6), 2160–2186. [https://doi.org/10.1044/2022\\_JSLHR-21-00597](https://doi.org/10.1044/2022_JSLHR-21-00597)
- Patel, R., Niziolek, C., Reilly, K., & Guenther, F. H. (2011). Prosodic adaptations to pitch perturbation in running speech. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *54*(4), 1051–1059. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2010/10-0162\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2010/10-0162))
- Pedone, R., Semerari, A., Riccardi, I., Procacci, M., Nicolò, G., & Carcione, A. (2017). Development of a self-report measure of metacognition: The Metacognition Self-Assessment Scale (MSAS). Instrument description and factor structure. *Clinical Neuropsychiatry*, *14*(3), 185–194. <https://doi.org/10.1037/t82174-000>
- Perkell, J. S., Lane, H., Denny, M., Matthies, M. L., Tiede, M., Zandipour, M., Vick, J., & Burton, E. (2007). Time course of speech changes in response to unanticipated short-term changes in hearing state. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *121*(4), 2296–2311. <https://doi.org/10.1121/1.2642349>
- Phelps, B.I. (2011). Habituation. Teoksessa Goldstein, S., Naglieri, J.A. (toim.) *Encyclopedia of Child Behavior and Development*. Springer, Boston, MA.  
[https://doi.org/10.1007/978-0-387-79061-9\\_1302](https://doi.org/10.1007/978-0-387-79061-9_1302)

- Ramig, L. O., Fox, C., & Sapir, S. (2008). Speech treatment for Parkinson's disease. *Expert Review of Neurotherapeutics*, 8(2), 297–309.  
<https://doi.org/10.1586/14737175.8.2.297>
- Scheerer, N. E., & Jones, J. A. (2012). The relationship between vocal accuracy and variability to the level of compensation to altered auditory feedback. *Neuroscience Letters*, 529(2), 128–132. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.09.012>
- Scheerer, N. E., & Jones, J. A. (2014). The predictability of frequency-altered auditory feedback changes the weighting of feedback and feedforward input for speech motor control. *European Journal of Neuroscience*, 40(12), 3793–3806.  
<https://doi.org/10.1111/ejn.12734>
- Scheerer, N. E., & Jones, J. A. (2018). Detecting our own vocal errors: An event-related study of the thresholds for perceiving and compensating for vocal pitch errors. *Neuropsychologia*, 114, 158–167.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.12.007>
- Smith, D. J., Stepp, C., Guenther, F. H., & Kearney, E. (2020). Contributions of auditory and somatosensory feedback to vocal motor control. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 63(7), 2039–2053. [https://doi.org/10.1044/2020\\_JSLHR-19-00296](https://doi.org/10.1044/2020_JSLHR-19-00296)
- Suchý, D., Behroozmand, R., & Railo, H. (2023). Conscious and unconscious contributions to auditory feedback control of speech—Neural correlates and behavioral consequences [Ennakkojulkaisu]. *Neuroscience*. <https://doi.org/10.1101/2023.10.13.562262>
- Tourville, J. A., & Guenther, F. H. (2011). The DIVA model: A neural theory of speech acquisition and production. *Language and Cognitive Processes*, 26(7), 952–981.  
<https://doi.org/10.1080/01690960903498424>
- Villacorta, V. M., Perkell, J. S., & Guenther, F. H. (2007). Sensorimotor adaptation to feedback perturbations of vowel acoustics and its relation to perception. *The Journal*

*of the Acoustical Society of America*, 122(4), 2306–2319.

<https://doi.org/10.1121/1.2773966>

Watson, A. B., & Pelli, D. G. (1983). QUEST: A Bayesian adaptive psychometric method.

*Perception & Psychophysics*, 33(2), 113–120. <https://doi.org/10.3758/BF03202828>

Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New

York. ISBN 978-3-319-24277-4. <https://ggplot2.tidyverse.org>

World Health Organization. (2021). *World report on hearing*.

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240020481>