

Kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja
perustaajuuden vaihtelun yhteys
magneettikuva-aineistossa

Laura Altarriba
Fonetiikan kandidaatintutkielma
Helmikuu 2013
Käyttäytymistieteiden laitos
Helsingin yliopisto

Tiedekunta - Fakultet - Faculty Käyttätymistieteellinen tiedekunta		Laitos - Institution - Department Käyttätymistieteiden laitos	
Tekijä - Författare - Author Laura Altarriba			
Työn nimi - Arbetets titel - Title Kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja perustaajuuden vaihtelun yhteys magneettikuva-aineistossa			
Oppiaine - Läroämne - Subject Fonetiikka, yleinen fonetiikka			
Työn laji ja ohjaaja(t) - Arbetets art och handledare - Level and instructor Kandidaatintutkielma, Daniel Aalto (TkT) & Reijo Aulanko (Yliopiston lehtori)		Aika - Datum - Month and year 2/2013	Sivumäärä - Sidoantal - Number of pages 28 + 5
Tiivistelmä - Referat - Abstract Tutkielmassa tarkasteltiin kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja perustaajuuden vaihtelun yhteyttä kolmen sanan lauseissa magneettikuva-aineistossa. Tutkielma perustuu aiempaan tutkimustietoon, jossa edellä mainittujen muuttujien väliltä löytyi korrelaatio ääniliu'issa. Tämän tutkimuksen tavoitteena on löytää sopiva tapa kurkunpään liikkeen mittaamiseen ja perustaajuuden keräämiseen kohinaa sisältävistä ääninäytteistä sekä tutkia näiden välistä lineaarista korrelaatiota. Tutkielmassa käytetyt koehenkilön antamat ääninäytteet sisälsivät kielellistä informaatiota, muun muassa emfaattisia painoja. Tutkimusaineistona käytettiin yhdeltä koehenkilöltä MRI:llä taltioituja kaksiulotteisia keskisagittaalileikkauksuvia pään ja kurkunpään alueilta sekä yhtä aikaa kuvanottojen kanssa tallennettuja ääninäytteitä. Näytelauseita oli yhteensä 12 kappaletta. Yhtä lausetta vastasi aina 20 magneettikuvaa ja noin 3,2 sekuntia kestävä ääninäyte. Kurkunpään asema mitattiin magneettikuvista Onis 2.4-ohjelmalla ja ääninäytteistä kerättiin F0-arvot manuaalisesti Praat-äänenkäsittelyohjelmalla. Numeeristen arvojen käsittely ja näytteiden lineaarisen korrelaation analysointi suoritettiin R-tilastomatematiikkaohjelmalla. Niiden lisäksi testattiin myös mittaustarkkuutta niin magneettikuvista kuin ääninäytteistäkin. Tutkimustulokset osoittivat, etteivät kurkunpään pystysuuntainen liike ja perustaajuuden vaihtelu korreloineet aineistossa. Ainoastaan yksittäisissä laajan fokuksen lauseissa oli havaittavissa korrelaatiota. Kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen lisäksi muillakin tekijöillä oli vaikutusta perustaajuuden vaihteluun. Tutkielma osoittaa, että magneettikuvista on mahdollista mitata kurkunpään liikettä sekä kerätä kohinaa sisältävistä äänitallenteista F0-arvot manuaalisesti. Jatkotutkimuksia ajatellen olisi kuitenkin suotavaa tarkentaa joitakin mittaustapoja ehdotetuin menetelmin.			
Avainsanat - Nyckelord - Keywords MRI, magneettikuvaus, kurkunpään pystysuuntainen liike, perustaajuuden vaihtelu, artikulatorinen fonetiikka			
Säilytyspaikka - Förvaringsställe - Where deposited Puhetieteiden toimisto			
Muita tietoja - Övriga uppgifter - Additional information Tarkistettu ja korjattu 05/2013			

Sisältö

1 Johdanto.....	1
1.1 Kurkunpään anatomiaa ja fysiologiaa sekä perustaajuuden säätely	1
1.2 Magneettikuvauksen pääperiaatteita ja sen käyttäminen artikulatorisessa puheentutkimuksessa.....	5
2 Työn tarkoitus.....	8
3 Metodit	9
3.1 Koejärjestelyt ja aineisto	9
3.2 Kurkunpään aseman mittaaminen.....	10
3.3 Perustaajuuden mittaaminen	14
4 Tulokset	16
4.1 Kurkunpään aseman mittaustulokset	16
4.2 Perustaajuuden mittaustulokset.....	17
4.3 Kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja perustaajuuden vaihtelun lineaarinen regressioanalyysi	19
5 Pohdinta.....	23
6 Yhteenveto.....	26
Lähteet	27

LIITTEET 1–5

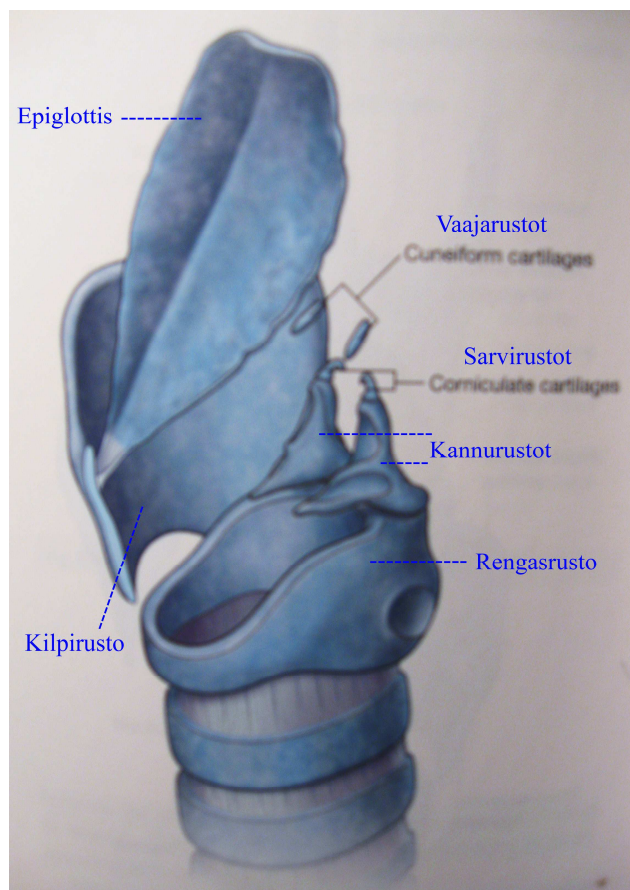
1 Johdanto

1.1 Kurkunpään anatomiaa ja fysiologiaa sekä perustaajuuden säätely

Puheen perustaajuuden muodostumiseen ja sen säätelyyn vaikuttavat useat eri tekijät. Fysikaalisia tekijöitä ovat muun muassa sub- ja superglottaaliset resonanssit, ilman virtausnopeus glottiksessa ja sen pyörteily kurkunpään eteisessä sekä äänihuulien massa ja kireys. Näihin muuttujiin voidaan vaikuttaa muuttamalla äänihuulten asemaa, kuten niiden kireyttä tai pituutta. Esimerkiksi kilpiruston sivusuuntainen liike ja kannurustojen asentojen muutokset aiheuttavat äänihuulten pidentymistä tai lyhentymistä, joka aistitaan äänen korkeuden muutoksina. Perustaajuuden muutosta voidaan hallita myös vaikuttamalla ilmavirtauksen vaihteluun, fonaatiotapaan. (Hardcastle, 1976; Drake ym., 2010.) Honda ja kumppanit (1999) ovat tutkineet kurkunpään pystysuoran liikkeen ja rengasruston kallistumisen yhteyttä puheen perustaajuuden vaihteluun magneettikuvausmenetelmällä, jossa näiden muuttujien korreloivan. Tutkimuksessa todettiin kurkunpään pystysuoralla liikkeellä ja rengasruston kallistumisella olevan osansa perustaajuuden vaihteluun eritoten matalilla taajuuksilla. Myös niskarangan taipumisen määrällä oli vaikutusta rengasruston kallistumiseen, eli siten myös perustaajuuden laskuun. Matalilla taajuuksilla kurkunpään aleneminen ja rengasruston kallistuminen havaittiin selkeästi, toisin kuin korkeilla taajuuksilla.

Kurkunpää muodostuu useista rustoista, lihaksista ja pehmytkudoksesta. Ne ovat kiinnittyneet toisiinsa siten, että yhdessä ne muodostavat toimivan kokonaisuuden, joka mahdollistaa puheen tuottamisen. Tärkeimmiksi ja suurimmiksi parittomiksi rustoiksi mainittakoon kilpi- ja rengasrusto sekä kurkunkansi eli epiglottis. Kilpirusto on nimensä mukaisesti kilven muotoinen ja se on sidekalvolla yhteydessä leuka-kieliluuhan. Sen tunnusmerkkinä on varsinkin miehillä helposti erotettavissa oleva ”aataminomena”. Kilpirusto suojaa kilven tavoin äänihuulia. Heti kilpiruston alapuolella on siihen kiinnittyneenä rengasrusto, joka levenee sinettisormuksen tavoin niskan puolelle. Epiglottis kohoaa kilpiruston posterioriselta puolelta aina kielen takaosaan asti sulkien ääniväylän nieltäessä. (Drake ym., 2010, 997–1003.) Kolmen suuren parittoman ruston lisäksi kurkunpäässä on myös kolme pientä ja parillista rustoa. Suurimmat näistä ovat kannurustot, jotka ovat kiinnittyneet rengasruston superolateraaliipinnan yläreunaan. Äänihuulet sijaitsevat kannurustojen ja kilpiruston välissä kiinnittyneinä niiden seinämiin. Äänihuulet ovat muodostuneet useista erilaisista kudoksista: äänijänteistä, limakalvoista ja lihaskudoksesta. Kannurustojen yläpuolella ovat ensin

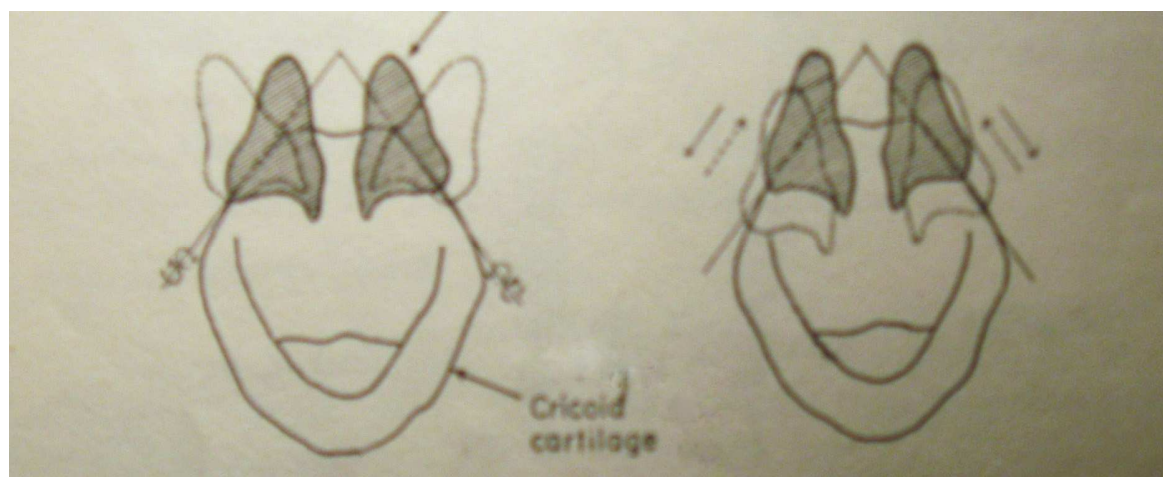
corniculate rustot (sarvirustot) ja niiden yläpuolella cuneiform rustot (vaajarustot), jotka ovat kiinnittyneet samaan pehmytkudokseen, mikä yhdistää epiglottiksen ja kannurustot. (Drake ym., 2010, 997–1003.) Kuvassa 1 on kurkunpään rakenne.



Kuva 1. Kurkunpään tärkeimmät rustot: epiglottis, kilpirusto, rengasrusto, kannurustot, sarvirustot ja vaajarustot. Äänihuulet sijaitsevat kilpiruston ja kannurustojen välissä. (Mukailtu Drake ym., 2010, Fig. 8.202.)

Kurkunpään lihaksisto jaetaan kurkunpään sisäisiin ja ulkoisiin lihaksiin. Jälkimmäisinä mainitut lihakset alkavat kurkunpään ulkopuolelta ja vastaavat sen suurista liikkeistä, kuten esimerkiksi sen pystysuorasta noususta ja laskusta. Sisäiset lihakset ovat pienempiä ja niiden kiinnikepisteet ovat kurkunpään alueella. Heti kilpiruston yläpuolen ja kielen alaosan välissä sijaitseva kieliluu on kehon ainoita luita, joka ei ole yhteydessä suoraan mihinkään toiseen luuhun. Siitä lähtee useita lihaksia niin sivu- kuin pystysuuntaan. Kieliluu jakaa lihasryhmät supra- ja infrahyoidisiksi. Ensimmäiset tarkoittavat kieliluun yläpuolisia osia ja jälkimmäiset sijaitsevat kieliluun alapuolella. Suprahyoidiset lihakset kohottavat kurkunpäästä ja

infrahyoidiset laskevat sitä. Aiemmin on ajateltu kurkunpään sisäisten lihasten vaikuttavan lähes ainoastaan äänihuulten muotoon, asentoon, pituuteen ja jännitystasoon. Näillä seikoilla on suora vaikutus perustaajuuden vaihteluun. (Hardcastle, 1976; Drake ym., 2010.) Kuvassa 2 on nähtävillä kannurustoissa tapahtuvat liikesarjat. Niiden keinuva liike loitontaa tai vaihtoehtoisesti lähentää rustoja toisistaan, mikä vaikuttaa suoraan äänihuulien asemaan. Kannurustojen liukuessa kohtisuoraan edes takaisin, äänihuulten jännitystaso vaihtelee, sillä niiden pituus pienenee tai suurenee. Molemmat liikkeet vaikuttavat perustaajuuden vaihteluun. (Hardcastle, 1976; Drake ym., 2010.) Hondan tutkimusten mukaan kuitenkin myös kurkunpään pystysuuntainen liike, ja rengasrustonkin kallistuminen, vaikuttavat etenkin matalien taajuuksien muodostumiseen. Perustaajuus ei välttämättä muodostu ainoastaan infrahyoidisten lihasten liikkeistä ja niiden vaikutuksesta äänihuulten asemaan ja muotoon. (Honda ym., 1999.)



Kuva 2. Vasemmalla on kannurustojen (harmaat) keinuva liike ja oikealla liukuva liike. (Hardcastle, 1976, Fig. 16.) Liikkeet vaikuttavat äänihuulten asemaan.

Fonaatiossa ääniraon toistuva sulkeutuminen ja avautuminen muodostavat sen läpi kulkevaan ilmavirtaan äänipulsseja, jotka resonoituvat ääniväylässä. Aerodynaamis-myoelastisen teorian mukaan perustaajuuden muodostumiseen tarvitaan tarpeeksi suuri subglottaalinen paine, mikä pakottaa äänihuulet avautumaan. Äänihuulten avautuessa subglottaalinen paine vähenee, jolloin äänihuulet kykenevät jälleen palautumaan normaalitilaansa. Elastisuutensa ansiosta ne

painautuvat nopeasti takaisin vastakkain. Tuloksena tästä avautumis-sulkeutumisliikkeestä on sarja ilmanpainepulsseja, joiden syntymistahti määrittää perustaajuuden. Mitä nopeammin äänihuulet värähtelevät, sitä korkeampi taajuuskin on. (Hardcastle, 1976.) Äänihuulten värähtelystä muodostuneet ilmanpainepulssit resonoituvat ääntöväylässä, jonka muoto ja rakenne muokkaavat spektriä. Kurkunpään asento ja sen säätely vaikuttavat myös puheeseen. Perustaajuuden säätelyssä tärkeässä osassa ovat äänihuulten muoto ja asento; pitkät ja kireät äänihuulet värähtelevät nopeammin kuin lyhyet ja rennot. Siksi esimerkiksi kannu- ja kilpirustojen sijainnit tai asennot vaikuttavat perustaajuuden muodostumiseen, sillä ne ovat suoraan yhteydessä äänihuuliin, jolloin rustojen kallistuminen tai siirtyminen paikaltaan vaikuttavat äänihuulten asentoon ja jännitykseen. (Hardcastle, 1976.)

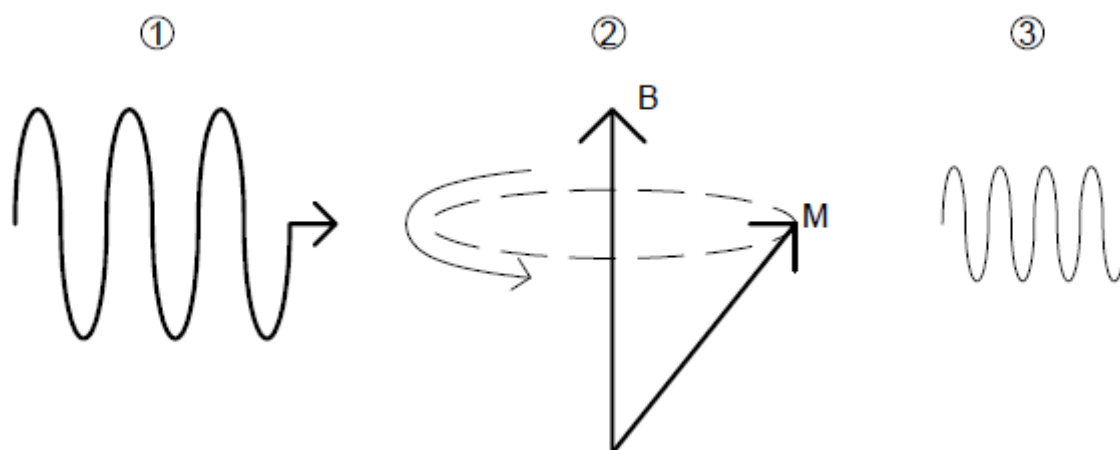
Kurkunpään aleneminen on vähäistä silloin kun perustaajuus laskee korkeilla taajuuksilla. Kieliluun sivusuuntaisella liikkeellä on silloin enemmän vaikutusta taajuuden vaihteluun. Kieliluuhun yhteydessä oleva kilpirusto mukailee kieliluun liikettä ja kallistuu venyttäen siihen kiinnittyneitä äänihuulia, mistä aiheutuu perustaajuuden nousu. Kieliluun liikkumisen aikana aktivoituvat myös suprahyyoidiset lihakset. Joidenkin ulkoisten kurkunpäänlihasten (kuten rintalasta- ja kilpirustokieliluulihaksen) voisi siis ajatella olevan vaikuttavia tekijöitä äänihuulten pidentymiseen, koska ne ovat yhteydessä kieliluuhun. Näin ainoastaan infrahyyoidiset lihakset eivät vastaisi perustaajuuden muutoksista. (Hardcastle, 1976; Honda ym., 1999.) Sen sijaan matalilla taajuuksilla kurkunpään pystysuuntainen lasku on jo huomattavasti suurempaa. Tällöin kilpiruston liikkeitä enemmän äänihuulten asemaan vaikuttaa rengasruston kallistuminen. Rengasrusto kallistuu kilpiruston välisen liitoksen kohdalta auki ja laskeutuu mukaillen samalla kaulanikamien muodostamaa kaarta. Rengasrustoon kiinnittyneet kannurustot mukailevat rengasruston kallistumisliikettä ja näin äänihuulet lyhenevät ja löystyvät, jolloin niiden värähtelynopeus hidastuu. Rangan kaarevuus vaikuttaa rengasruston kallistumisliikkeeseen: hyvin lordoottinen eli eteenpäin kaartunut kaularanka helpottaa rengasruston kallistumisliikettä. Siten myös kaularangan kaarevuuden voisi olettaa olevan yhteydessä taajuuden laskuun. Näin kurkunpään pystysuuntainen liike, rengasruston kallistuminen ja kaularangan kaarevuus vaikuttaisivat yhdessä äänihuulten pituuteen ja siten taajuuden muodostumiseen. (Honda ym., 1999.)

1.2 Magneettikuvauksen pääperiaatteita ja sen käyttäminen artikulatorisessa puheentutkimuksessa

Magneettikuvausmenetelmä keksittiin jo vuonna 1959, mutta se on kehittynyt nykyiseen muotoonsa vuosikymmenten saatossa (McRobbie ym., 2007). Puheentutkimukseen sovellettuna tämä menetelmä on tarjonnut uutta informaatiota artikulaatiosta. Sen avulla saadaan kerättyä leikkeitä kolmesta eri tasosta, joista voidaan muodostaa myös 3D-kuvia suun ja kurkunpään alueelta. Erilaisten tasojen ja kuvien avulla on mahdollista tarkastella esimerkiksi kurkunpään anatomista rakennetta, äänihuulia, kielen liikettä tai yleisesti niiden toiminnallisuutta (Aalto ym., 2011; Ahmad ym., 2009; Champsaur ym., 2000). Tällä tekniikalla kuvattuun materiaaliin voidaan myös yhdistää yhtä aikaa tallennettua äänimateriaalia, jolloin kuva ja ääni ovat peräisin samasta tilanteesta. Käytännössä äänitallenne sisältää kuitenkin paljon kohinaa, sillä magneettikuvauslaite tuottaa paljon taustamelua kuvaustilanteessa. Yleensä kuvaustilanteissa potilaan tulee olla paikallaan, jotta kuvalaatu olisi mahdollisimman tarkka. Puhuttaessa suun ja kurkunpään alue on jatkuvassa liikkeessä, mikä osaltaan aiheuttaa myös kuvamateriaaliin epätarkkuuksia. Kuvanlaatuongelmat, kohiseva äänite ja niiden optimaalinen yhdistäminen tuottavat ongelmia artikulaation tutkimiseen magneettikuvausmenetelmällä.

Magneettikuvauslaite muodostaa ulkoisen magneettikentän, joka on usein kliinisissä kokeissa 0,5-1,5 teslan vahvuinen, mutta nykyään käytetään myös tätä vahvempia magneettikenttiä. Magneettikentän voimakkuus korreloi kudoksissa muodostuvien signaalien voimakkuuden kanssa. Kuvauslaitteistoon kuuluu kolme gradienttikelaa, joiden avulla voidaan muodostaa kolmiulotteinen malli kuvattavasta kohteesta. Kaksiulotteiset kuvat muodostetaan tästä mallista yleensä koronaalisen, aksiaalisen ja sagittaalisen tason mukaan. Jokaisen gradienttikelan keskiosa on ulkoisen magneettikentän vahvuinen, mutta vahvuus joko kasvaa tai pienenee kelojen päihin päin mennessä. Magneettikentän vaihtelu aiheuttaa kudoksissa magneettisten momenttien prekessiotajuuden vähenemistä ja suurenemista. Vastaanotinkela tunnistaa MR-signaalin, joka sen jälkeen digitoituu tietokonekäsittelyä varten. (McRobbie ym., 2007, s. 11–14.)

Ihmiskehosta noin 75–80 % koostuu vedestä. Vetyprotoneita esiintyy runsaasti kehossa ja niiden magneettinen momentti (*spin*) on vahva. Siksi se on hyvä kuvauskohde kliinisessä magneettikuvauksessa. Kun vetyprotonit joutuvat vahvaan ulkoiseen magneettikenttään (B_0), ne kääntyvät sitä kohti omista satunnaisista asennoistaan. Vahvaenergiset vetyprotonit kääntyvät poispäin magneettikentästä, mutta joukossa on aina enemmistö heikompienergisiä vetyprotoneja, jotka muodostavat B_0 :n kanssa niin sanotun nettomagnetisaation. Se saa spinit prekessoimaan eli akselinsa ympäri pyörimisen lisäksi kallistumaan hieman ja kiertämään laajempaa kehää pyörien näin sekä itsensä että kehänsä ympäri. Prekessointi virittää ne Larmortaajuudelle, joka on laskettavissa prekessionopeudesta. Lähettämällä samalla Larmortaajuudella radioaaltosignaalin (RF) vetyprotoneita kohti, ne alkavat resonoida ja saavat siten lisää energiaa itseensä. RF-signaalin amplitudista ja kestosta riippuen vetyprotonit kääntyvät 90 asteen kulmaan jatkaen prekessointia. Signaalin osuessa vastaanotinkelaan, muodostuu havaittu MR-signaali (kuva 3).



Kuva 3. B = Ulkoinen magneettikenttä (eli B_0 , kuvassa B), M = nettomagnetisaatio.

1) Ulkoinen radiosignaali lähetetään Larmortaajuudella. 2) Radiosignaali poikkeuttaa prekessoivat vetyprotonit ulkoisen magneettikentän suunnasta. 3) Ulkoisen radiosignaalin päätyttyä havaitaan saman taajuinen heikko radiosignaali. (Mukailtu O.K. Deichmann, 2009.)

Radioaaltopulssin sammuaessa vetyprotonit yrittävät palautua nettomagnetisaatiotilaan ja luovuttavat RF-pulssista saamansa energian. Tätä paluuaikaa kutsutaan relaksaatioksi. Samaan aikaan tapahtuu toisistaan erilliseksi laskettava tapahtumasarja. Vetyprotonien paluuta kohtisuoralle linjalleen kutsutaan palautumiseksi (*recovery*), koska palattuaan

alkuperäiselle paikalleen (nettomagnetisaatiotilaan), niiden energiataso palautuu. Vaakasuoralta tasolta ajatellen vetyprotonit luovuttavat energiansa ja alkavat hiipua (*decay*). Palautumisvaihetta kuvataan merkillä T1 ja hiipumisvaihe merkitään T2. Eri kudoksilla on erilaiset T1- ja T2-ajat, esimerkiksi rasvan T1-aika on vettä nopeampi. Kuvantamisessa näillä kahdella erilaisella kuvaustavalla kerättyjä kuvia kutsutaan T1- ja T2-painotteisiksi kuviksi. On tärkeää ottaa huomioon RF-pulssien lähetysnopeus (*Time of Repetition, TR*). Jotta T1-painotteisten kuvien kontrastiiviset vaikutukset onnistuisivat, TR-ajan on oltava nopea. Silloin eri kudosten väliset erot tulevat esille. Liian hitaan TR:n aikana vesi ja rasva ehtisivät palautua nettomagnetisaatiotilaan ja niiden välille ei muodostuisi eroa, koska molemmat olisivat jo palautuneet. Yhtälailla T2-painotteisissa kuvissa kaikuajan (*Time of Echo, TE*) on oltava tarpeeksi hidasta, että veden ja rasvan lopullinen eroavaisuus ehtii kasvaa tarpeeksi kontrastiiviseksi. Erilaisilla kuvausmenetelmillä on onnistuttu saavuttamaan nopeampia kuvausaikoja, joilla saadaan kerättyä yhä enemmän materiaalia. (Westbrook & Kaut, 1998.)

T2-painotteisissa kuvissa sekä TR- että TE-ajat ovat pitkät, jolloin nämä kuvat ovat herkempiä patologisille prosesseille. Niiden spesifisyys on kuitenkin T1-painotteisia kuvia huonompi, joissa TE-aika on lyhyt (Hamberg & Aronen, 1992.) T1- ja T2-painotteiset kuvat eroavat toisistaan muun muassa kontrastiivisilta väreiltään. Tiedetyt aineet, tai aineettomuus, näkyvät molemmissa samoina värisävyinä, mutta useimmat sävyt ovat päinvastaisia. Kuvien väriskaala on puolittain käänteinen. Kun tiedetään mistä aineista värit muodostuvat, voidaan niitä tulkita. Esimerkiksi rasvakudos, vesiperäiset kudokset ja muut nesteet, kuten veri, muodostavat keskenään värikontrasteja, joiden avulla kuvista voidaan tulkita kehon sisäosien muotoja ja sijainteja. Kuvien muodostumisprosessi on turvallista koehenkilöitä ajatellen. Se ei altista toksineille tai röntgensäteilylle. (McRobbie ym., 2007.)

Useimmiten magneettikuvauksen hyvänä puolena pidetään luiden pois jäämistä kuvista; esimerkiksi röntgenkuvissa kuvanmuodostuminen pysähtyy luustoon. Puheentutkimuksen kannalta hampaiden olemassaolo olisi tärkeää kuvissa tapahtuvien liikkeiden tulkitsemisen kannalta, mutta MR-kuvissa hampaat eivät erotu. Kurkunpää koostuu useista pienistä lihaksista ja rustoista, jotka lähettävät MR-signaalia ja erottuvat hyvin toisistaan. Se ei silti tarkoita, että kurkunpään rakenteiden tarkastelu MR-kuvista olisi käytännössä yksinkertaista. Käytössä olevat kuvausparametrit vaikuttavat kuvanlaatuun kuten myös kuvauksen luonne, eli onko kyseessä esimerkiksi jatkuvan puheen vai yksittäisten äänteiden tarkastelu. (Lamminen & Soila, 1992.)

Puheen tutkimuksessa magneettikuvaus mahdollistaa suun ja kurkunpään alueiden liikkeiden visuaalisen tarkastelun. Leikkeistä voidaan muodostaa 3D-kuvaa, jolloin päästään tutkimaan yksityiskohtaisesti ja kokonaisvaltaisesti tietyssä osassa tapahtuvia muutoksia. 2D-kuvien avulla voidaan tutkia esimerkiksi äänihuulten avautumis-sulkeutumisliikettä tai nähdä poikkileikkaus koko ääniväylästä riippuen miltä tasolta kuvia katsellaan. Kuvauksen aikana voidaan yhtäaikaaisesti tallentaa myös äänimateriaalia, jolloin puhe ja kuva edustavat samaa tilannetta. Laitteesta lähtevä hälyääni hankaloittaa ääninäytteiden analysointia. Tämä tarkoittaa sitä, että erikseen äänitettyä puhetta on helpompi tutkia, vaikka tällöin puhe ja ääni eivät edustaisi täysin samaa tilannetta. Magneettikuvausmenetelmällä voidaan kuvata jatkuvaa puhetta, mutta esimerkiksi yksittäisten äänteiden liu'uilla saadaan kerättyä selkeämpää materiaalia, sillä jatkuvan puheen aikana tapahtuu enemmän liikettä, mikä vaikuttaa kuvanlaatuun. Puheen artikulaation tutkimus MR-menetelmällä on haastavaa, koska kyseessä on aina jatkuvassa liikkeessä olevaa informaatiota. Tarkimmat kuvat tulevat paikallaan ollessa ja pienetkin liikkeet voivat aiheuttaa kuvissa ylimääräisiä artefakteja, mitkä hankaloittavat kuvien tulkitsemista (Westbrook & Kaut, 1998). Magneettikuvaus tapahtuu normaalista puhetilanteesta poikkeavissa olosuhteissa, jotka tuovat omat haasteensa tutkimustilanteeseen: koehenkilöt ovat selällään puheentuoton aikana ja pyrkivät olemaan mahdollisimman paikallaan. Koehenkilön suositellaan käyttävän myös kuulosuojaimia. (McRobbie ym., 2007.)

2 Työn tarkoitus

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen yhteyttä puheen perustaajuuden vaihteluun. Projekti perustui osittain Hondan ja kumppaneiden (1999) tekemään tutkimukseen, jossa tarkasteltiin kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja rengasruston kallistumisen vaikutusta puheen perustaajuuden vaihteluun. Aineistona tutkielmassa käytettiin kahtatoista magneettikuvattua ja äänitettyä lausetta, jotka olivat peräisin suuremmasta tutkimusprojektista. Tarkoituksena oli luoda sopiva mittaustapa kurkunpään aseman määrittelyksi ja sen pystysuuntaisen liikkeen mittaamiseksi sekä kerätä ääniaineistosta puheen perustaajuudet ja verrata niitä keskenään mahdollisen lineaarisen yhteyden löytämiseksi. Tarkoituksena oli selvittää tarpeeksi tarkka manuaalinen tapa kerätä perustaajuudet ääninäytteistä, joissa kohina hankaloitti niiden automaattista mittaamista. Lopuksi testattiin lineaarisella regressioanalyysillä muuttujien välinen yhteys.

3 Metodit

3.1 Koejärjestelyt ja aineisto

Tutkimuksessa käytetyt magneettikuvat ja äänitteet olivat osa isomman tutkimusprojektin aineistoa, jossa tutkittiin magneettikuvantamisen avulla sellaisten potilaiden puheentuottoa, joille tehdään ylä- ja/tai alaleuan korjausleikkaus. Projektin tarkoituksena oli selvittää korjausleikkausten vaikutusta potilaiden puheeseen. Varsinaisen fokuksensa lisäksi projektista nousi esille myös muita mielenkiintoisia tarkastelunkohteita, joita tämä tutkielma edustaa.

Aineiston koehenkilö oli noin 25-vuotias mies, jonka leukoja ei ollut operoitu, eli kyseessä oli normaali puhuja. Magneettikuvat olivat T2-painotteisia ja yhtä lausetta vastasi aina 20 dicom-kuvaa (Digital Imaging and Communications in Medicine) ja noin 3,2 sekuntia kestävä äänitallenne magneettikuvasajalta. Kuvan ja äänen vertaamisen suhdetta hankaloitti se, että perustaajuus saattoi vaihdella paljon yhden kuvanoton aikana, mutta magneettikuvaan oli taltioituneena vain yksi hetki, jonka tallentumisajankohdasta ei ollut tietoa. Aineistoon kuului kaksitoista kolmisanaista lausetta, jotka muistuttivat muodoltaan pitkälti toisiaan. Lauseen ensimmäisen sanan ensitavu sisälsi kestoaltaan pitkän vokaalin, jota sitten seurasi lyhyt vokaali. Toisessa sanassa tilanne oli päinvastainen eli ensimmäisessä tavussa vokaali oli lyhyt ja toisessa pitkä. Viimeisen sanan molemmissa tavuissa oli pitkät vokaalit. Vokaaleja oli lauseissa yhteensä viisi (a, e, i, o, u), mutta yksi lause sisälsi enimmillään kolme eri vokaalia. Koehenkilön tuottamat lauseet olivat vastauksia hänelle esitettyihin kysymyksiin. Niiden tarkoituksena oli synnyttää erilaisia painotuksia. Lauseissa 3, 4, 5 ja 12 oli laaja fokus ja niissä vastattiin kysymykseen ”Mitä siellä tapahtui?”. Muissa lauseissa fokus oli kontrastiivinen joko subjektille tai objektille. Kyseisissä lauseissa ilmanpaineen vaihtelu saattoi vaikuttaa esimerkiksi kurkunpään pystysuuntaista liikettä enemmän perustaajuuden muutoksiin. Lauseet ovat taulukossa 1.

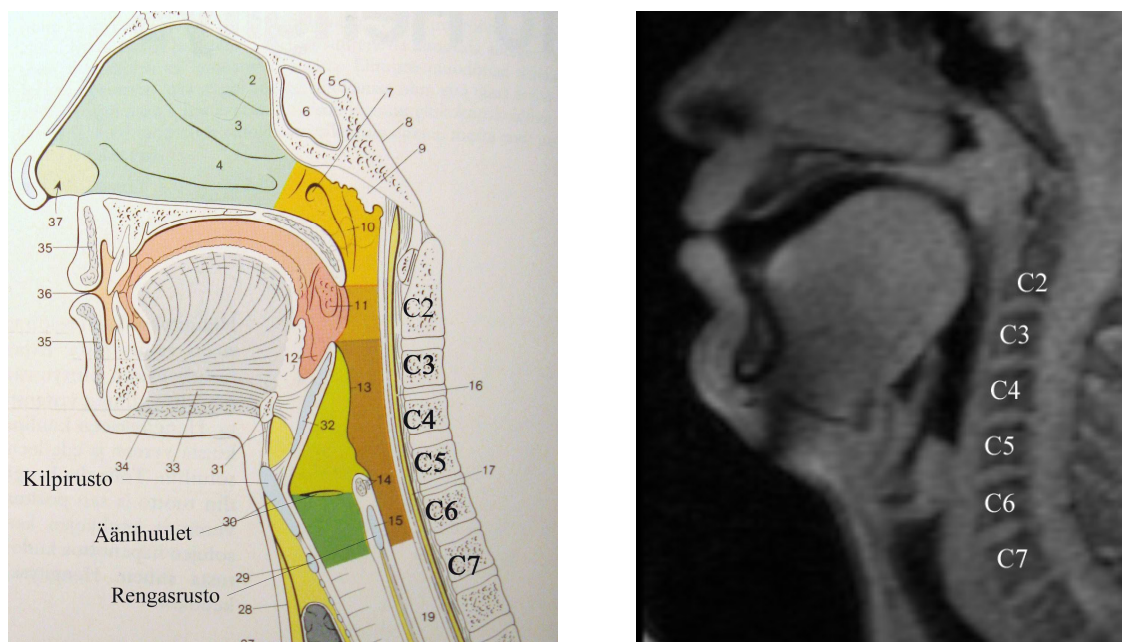
Taulukko 1. Ohessa on puhujan tuottamat kaksitoista lausetta. Painolliset sanat on lihavoitu. Laajan fokuksen lauseissa ei ole merkintöjä.

1. Tuula tukee Kuubaa.	7. Piika vahaa tuubaa .
2. Saana sahaa haapaa .	8. Paavi tavaa suuraa.
3. Taata tilaa taalaa.	9. Haamu lukee saagaa .
4. Ruusu varoo laavaa.	10. Paavi tekee siikaa.
5. Siiri kuvaa jaalaa.	11. Tuuli puhuu kiinaa .
6. Saara sukii laamaa.	12. Liinu tilaa viinaa.

3.2 Kurkunpään aseman mittaaminen

Magneettikuvien mittaukseen käytettiin Onix 2.4 Free Edit-ohjelmaa, joka on tarkoitettu muun muassa lääketieteellisten kuvien käsittelyyn. Käytössä olevat magneettikuvat olivat keskisagittaaleikkauskuvia pään ja kaulan alueelta. Kuvista erottui niin kielen kuin kurkunpään liikkeet. Leikkauskuvissa näkyi selkeästi kurkunpään alue, mutta ei rustojen tarkkoja rajoja tai niiden rakenteellisia eroja. Aiemman anatomisen tietämyksen perusteella tietyt kurkunpään osat oli mahdollista sijoittaa paikoilleen tarkemman tarkastelun jälkeen. Anatomisia kiinnekohtia ovat esimerkiksi niskanikamat, epiglottis ja kilpirusto.

Kuvamateriaalista erottui suunnilleen kilpiruston ja epiglottoksen alkupään alueet, jolloin tälle kohdalle arvioitiin äänihuulten sijoittuvan. Kurkunpään aseman mittaaminen magneettikuvasta ei ollut täysin yksioikoista, koska kuvamateriaalissa ei erottunut selkeitä rakenteellisia eroja. Tulkinta perustui tässä tapauksessa enemmänkin määritelmiin, joiden avulla voitiin tehdä mittauksia. Kurkunpään aseman mittaamista hankaloitti myös kuvien vaihteleva resoluutio. Kurkunpään anatomista piirroskuvaa voi verrata magneettikuvaan kuvassa 4.



Kuva 4. Vasemmalla on anatominen piirroskuva pään ja kaulan alueelta. Oikealla magneettikuva. Magneettikuva on otettu puhejakson aikana. (Mukailtu Nienstedt, ym., 2006, kuva 260; oikea kuva aineistosta.)

Magneettikuvia tarkastellessa oli etsittävä aluksi jokin mahdollisimman muuttumaton ja vakioinen alue tai mitta. Kurkunpään liikkeiden kannalta lähin tällainen alue on niskaranka ja sen nikamisto. Nikamat sijaitsevat aivan kurkunpään läheisyydessä ja ovat kuvaussession aikana melko liikkumattomina. Vakioisena anatomisena mittana käytettiin C4-nikaman yläetukulmaa ja C7-nikaman alaetukulmaa. Tästä anatomisesti vakioisesta nikamamitasta muodostettiin 90 asteen kulma kurkunpään suuntaan. Kurkunpään asema mitattiin nikamamitan sivusuuntaiselta viivalta (kuva 5). Mittauskohdan määrittäminen kuvasarjoista oli haasteellista, sillä niissä ei ollut kohtaa, joka olisi näkynyt virheettömästi kautta kuvasarjojen. Kurkunpään alueella on jatkuvasti useaan suuntaan tapahtuvaa liikettä, jolloin oli haasteellista määritellä yksittäistä mittapistettä. Esimerkiksi kuvassa 5 mittapisteen alla olevan rengasruston näkyvyys vaihteli läpi kuvasarjan.



Kuva 5. Anatomisena nikamamittana C4 yläreuna ja C7 alakulma, josta on vedetty 90 asteen kulma kurkunpään suuntaan. Mittapiste lähti sivutasolta ja mittapisteenä oli ventrikkelin keskikohta. (Kuva aineistosta.)

Myös etäisyys vaikutti magneettikuvien tarkasteluun jonkin verran. Katsoessa kuvaa kaukaa rajat näkyivät selvemmin, mutta myös virhemarginaali kasvoi. Läheltä mitattaessa mitan välimatka pieneni ja virhetarkkuus väheni, mutta toisaalta pisteiden erottaminen hieman hankaloitui. Asiaan vaikutti kuvan resoluution lisäksi osaltaan myös käytössä oleva tietokone ja sen näytönohjaimen laatu. Kuvassa 6 mittapiste on paljon epäselvempi kuin kuvassa 5. Kuvat ovat suurennoksia alkuperäisistä.



Kuva 6. Mittapisteinä käytetty ventrikkeli erottuu huonosti magneettikuvasta. (Kuva aineistosta.)

Varsinainen mittapiste valittiin paikantamalla ensin äänihuulten alue, jonka oletetaan sijaitsevan epiglottiksen ja kilpiruston yhdistymisalueella. Tässä kurkunpään keskialueella oleva musta kohta nousi ja laski puheen tuoton aikana muun kurkunpään mukana. T2-painotteisissa kuvissa luut, nivelsiteet, sidekudokset ja ilma näkyvät mustana. Kyseistä kohtaa oli kuitenkin vaikea nimetä yksiselitteisesti tietyksi osaksi. Tällä alueella on esimerkiksi laryngaalinen ventrikkeli, joka sijaitsee äänihuulten läheisyydessä (Champsaur, 2000). Tässä tutkielmassa kyseisestä kohtaa nimitettiin ventrikkeliksi, joka helpotti tähän kohtaan viittaamista. Mittauspisteinä oli ventrikkelin keskikohta. Sen ollessa huonosti erottuva, apukiintopisteinä pidettiin kilpiruston ja epiglottiksen kulmaa. Kuvasarjan ensimmäisen kuvan mittauspiste määriteltiin alkamaan noin kolmen ja neljän sentin väliltä. Mittaukset toistettiin kolme kertaa mittavirheiden minimoimiseksi. Magneettikuvien manuaalisessa käsittelyssä mittavirheisiin voivat vaikuttaa kuvaresoluution lisäksi myös inhimilliset seikat, kuten mittajan vireystaso.

Koska vastaavanlaisilla menetelmillä mittausta ei ollut suoritettu aiemmin, selvitettiin vaikuttaako mittausmääritelmän muokkaaminen tuloksiin. Esimerkiksi epiglottiksen kulma liikkui välillä eri suuntaan kuin muu kurkunpään alue. Toisessa mittauksessa alkuperäistä menetelmää muunnettiin siten, että mittapisteenä oli ventrikkelin alakulma ja epäselvissä kuvissa liike määriteltiin ventrikkelin lähialueiden liikkeen määrästä, esimerkiksi vertaamalla rengasruston alareunan ja/tai epiglottiksen alapuolisten osien liikkeiden määrää. Nämä mittaukset toistettiin vain kahdesti, koska mittaamisen ajateltiin tulleen rutiininomaisemmaksi. Keräämällä kahdet erilaiset mittaukset oli mahdollista verrata mittaustekniikoista saatuja tuloksia. Jatkossa ensimmäiseen mittaustapaan viitataan nimellä mittaustapa 1 ja jälkimmäiseen nimellä mittaustapa 2.

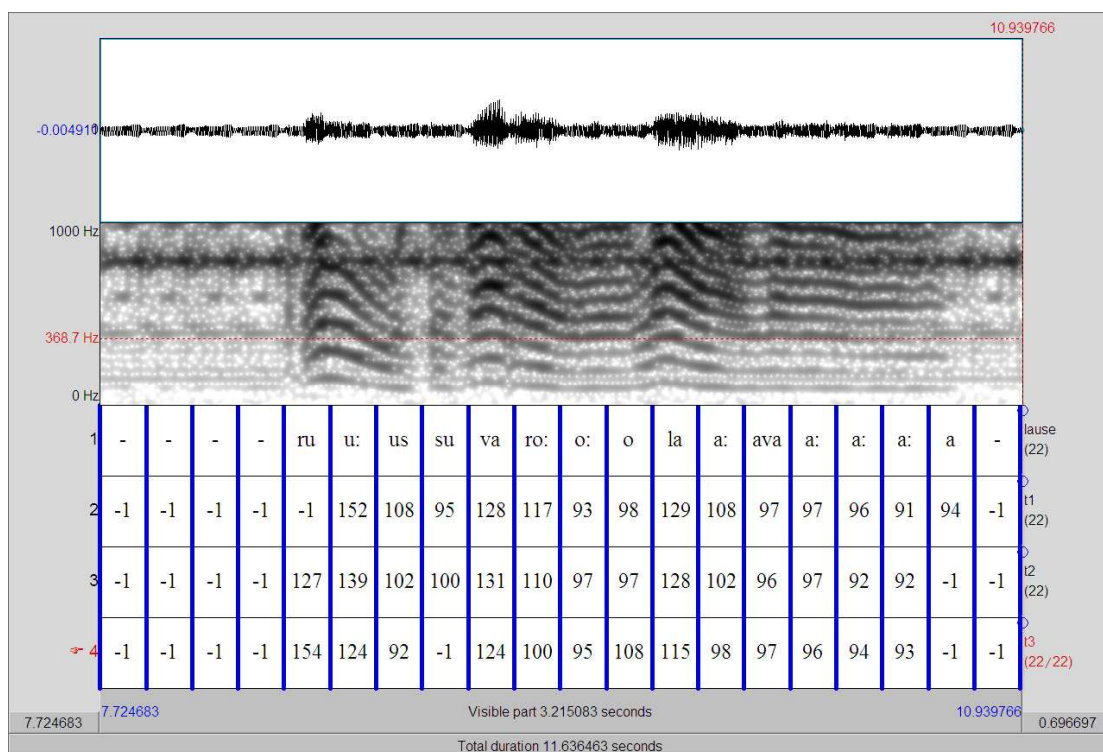
Aallon ja kumppaneiden (2011) tutkimuksessa oli mitattu magneettikuvadatasta kielen liikettä ja heidän tutkimuksessaan hyväksyttäväksi virhetarkkuudeksi ilmoitettiin noin 0,4 millimetriä. Tässä tutkielmassa testattiin virhetarkkuutta mittaamalla nikamamittaa (C4 yläetukulma ja C7 alaetukulma) 80 kertaa. Mitat kerättiin kahdesta ensimmäisestä lauseesta (lauseet 1 ja 2). Molemmat mitattiin kahdesti (Kuva 7). Ventrikkelin mittaustarkkuus selvitettiin käyttämällä ensimmäistä mittaustapaa, mutta vakioiden alataso samalle tasolle kautta kuvasarjan. Mittaus suoritettiin kolme kertaa kahdelle kuvasarjalle (lauseet 11 ja 12).



Kuva 7. Anatominen nikamamitta mitattiin 80 kertaa virhetarkkuuden selvittämiseksi nikamien C4 yläetukulman ja C7alaetukulman väliltä. (Kuva aineistosta.)

3.3 Perustaajuuden mittaaminen

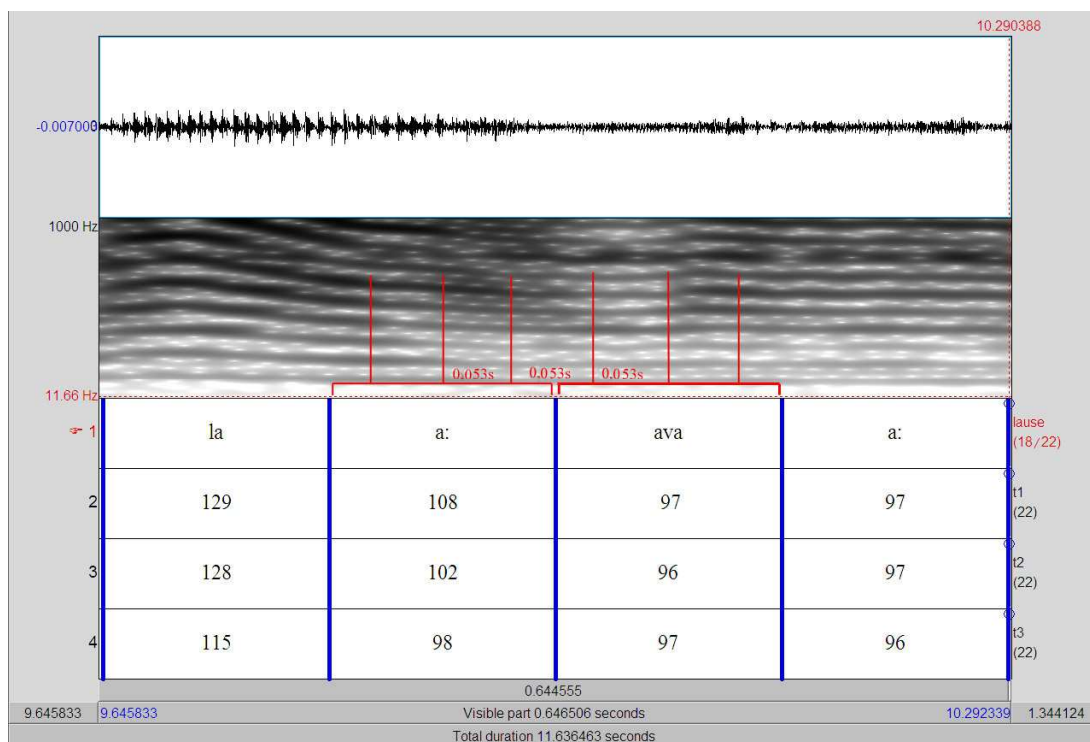
Ääninäytteet oli alun perin äänitetty kuusikanavaisesti, mutta tutkielmassa käytettiin niistä eristettyä yksikanavaista ääniraitaa, joka oli taltioitu suoraan koehenkilön suun edestä magneettikuvauksen aikana. Ääninäytteiden analysointia hankaloitti MR-laitteesta lähtevä häiriöääni, minkä vuoksi F0:n automaattinen laskeminen ei ollut mahdollista. Puhe analysoitiin Praat-ohjelmalla (5.3.0.3). Spektrogrammi muutettiin kapeakaistaiseksi ja sen ylätaajuudeksi asetettiin 1000 Hz. Spektrin laskentaikkunan pituus muutettiin 0,05 sekunniksi, jolloin kerrannaiset osasävelet erottuivat toisistaan. Ääninäytteistä luotiin myös textgrid-tiedostot, joihin lisättiin neljä annotointitasoa. Ensimmäiselle riville kirjoitettiin lauseen karkea transkriptio ja kolmelle alemmalle merkittiin hertsiarvot. Tällöin lauseita voidaan tarkastella omina kokonaisuuksinaan, mikäli niitä halutaan myöhemmin tarkastella erikseen. Jokainen ääninäyte (noin 3,2 sekuntia) jaettiin kuvanäytteiden määrällä (20:llä). Lopputuloksena oli 20 ääniblokkia, jotka olivat noin 0,160 sekuntia pitkiä (kuva 8). Lauseita saattoi jo mittausvaiheessa tarkastella vertaamalla hertsiarvoja lauseen sanojen sekä osasävelten kulkuun.



Kuva 8. Kapeakaistainen spektrogrammi, jossa osasävelet erottuvat selkeästi toisistaan. Lause 4 jaettiin 20 blokkiin. Tyhjät mittapisteet merkittiin koodilla ”-1”.

Ääniblokit jaettiin kolmeen osaan siten, että jokaisen mittauspisteen välillä oli noin 0,053 sekuntia. Tällöin ensimmäinen mittauspiste oli 0,027 sekunnin päässä ääninäytteen alusta ja viimeinen mittauspiste 0,027 sekunnin päässä lopusta. Praat-ohjelmalla luotiin neljä annotointitasoa, joista ensimmäiseen merkittiin transkriptio ääninäytteestä ja seuraaviin kolmeen yhden blokin taajuusarvot. Jokaisesta näkyvästä mittapisteestä laskettiin viisi ensimmäistä osasäveltä, joista laskettiin keskiarvo mittapisteelle. Sitten ääniblokin kolmesta mittapisteestä laskettiin keskiarvosta laskettiin blokin yhteinen keskiarvo. Tällöin yhtä kuvaa vastasi yksi hertsiarvo, joka muodostui kuvaa vastaavan ääniblokin perustaajuuksien keskiarvoista (kuvat 9).

Lauseiden perustaajuudet mitattiin ainoastaan kerran, sillä tulokset olivat keskiarvoja useista mittauksista. Koska perustaajuuden mittauksen tarkkuutta halutaan selvittää, toistettiin mittaukset ensimmäisistä seitsemästä ääniblokista kolmesti lauseesta 1, samalla menetelmällä kuin varsinaiset mittaukset oli tehty. Sen lisäksi yksi mittapiste laskettiin kuusi kertaa, jotta nähtäisiin, kuinka paljon hajontaa yhdessä mittapisteessä voi olla.



Kuva 9. Osasävelten mittausvälit lauseesta 4, jossa jokaisen pisteen välillä oli noin 0,053 sekuntia. Transkriptio, ääniblokit ja hertsit merkittiin annotointiriveille textgrid-tiedostoon.

4 Tulokset

4.1 Kurkunpään aseman mittaustulokset

Kurkunpään liikkeen keskiarvot ja -hajonnat ovat taulukkona liitteessä 1. Lähtötaso alkoi noin kolmesta ja puolesta senttimetrinä ($\pm 0,5$ cm) ja lauseiden viimeiset arvot olivat yleensä tätä korkeampia. Vain muutamassa lauseessa viimeisten kuvien mittapiste oli lähtötasoa alempana. Hajonta vaihteli paljon, mihin vaikutti sekä nikamamitan että mittapisteen virhemarginaali ja sen vaihteleva erottuminen. Mittaustavalla 2 mitatut kurkunpään liikkeet erosivat ensimmäisestä. Sen tulokset löytyvät liitteessä 2 olevasta taulukosta. Mittausten väliseen eroon vaikutti ventrikkelin eri mittaushaara. Myös epiglottoksen ja kilpiruston liittymisalue ei liikkunut täysin samaan suuntaan kuin muu kurkunpään alue. Se voi johtua rustojen kallistumisliikkeistä. Oheisessa taulukossa 2 on vertailtavana kahden mittaustavan tuottamat kurkunpään liikkeet lauseesta 2.

Taulukko 2. Kaksi mittaustapaa lauseesta 2, joissa kuvia oli 20. Kurkunpään liike (mm) ja sen keskihajonta (kh) sekä otos (n). Tulokset vaihtelivat mittaustavasta riippuen.

Mittaustapa 1				Mittaustapa 2			
Lause2	ka/mm	kh	n	Lause2	ka/mm	kh	n
F1	30,66	0,30	3	F1	31,09	0,60	2
F2	29,57	0,62	3	F2	30,04	0,66	2
F3	27,71	0,48	3	F3	27,78	0,09	2
F4	27,38	0,08	3	F4	27,36	0,04	2
F5	30,51	0,55	3	F5	30,36	0,22	2
F6	31,68	0,79	3	F6	33,41	0,52	2
F7	31,05	0,61	3	F7	32,55	0,29	2
F8	30,92	0,58	3	F8	31,90	0,21	2
F9	32,67	0,43	3	F9	32,26	0,41	2
F10	34,09	0,72	3	F10	34,85	0,37	2
F11	32,33	0,44	3	F11	32,54	0,29	2
F12	30,49	1,25	3	F12	31,32	0,44	2
F13	30,94	0,69	3	F13	31,13	0,27	2
F14	31,48	0,59	3	F14	31,76	0,40	2
F15	30,9	0,55	3	F15	31,47	0,81	2
F16	29,98	0,54	3	F16	30,24	0,37	2
F17	29,53	0,66	3	F17	30,07	0,76	2
F18	30,91	0,25	3	F18	32,04	0,29	2
F19	30,09	0,98	3	F19	33,06	0,72	2
F20	31,09	0,25	3	F20	31,46	0,52	2

Magneettikuvien mittauksen virhetarkkuutta oli mitattu 80 kertaa nikamien C4 yläetukulman ja C7 alaetukulman välimatkalta, jota käytettiin vakioisena anatomisena mittana (liite 3). Keskiarvo nikamien pituudesta oli tässä otoksessa 71,52175 millimetriä. Sen keskihajonta oli $0,4145725 \sim 0,415$ millimetriä. Keskimääräistä virhemittaa voitiin pitää noin puolena millimetrinä, kuten Aallon ja kumppaneiden (2011) artikkelissa todettiin. Nikaman C7 vasemman alakulman resoluutio vaihteli kuvasarjan aikana huonontuen yleensä kuvasarjan loppua kohden. Ventrikkelin mittauksen keskihajonta vaihteli lähes nolasta suurimmillaan 0,77 millimetriin (liite 4). Suurin osa keskihajonnoista jäi kuitenkin alle puolen millimetrin ja useissa tapauksissa hajonta oli hyvin vähäistä.

4.2 Perustaajuuden mittaustulokset

Kaikkien kahdentoista lauseen perustaajuudet ovat liitteessä 5. Alla olevassa taulukossa 3 on näkyvillä neljä toisistaan poikkeavaa lausetta esimerkkinä niiden heterogeenisyydestä. Lauseiden välillä oli vaihtelua puheen alkamis- ja päättymisajankohdan suhteen, kuten myös korkeiden taajuushuippujen välillä. Perustaajuus vaihteli melko säännönmukaisesti kautta lauseiden: puhunnoksen alussa esiintyi usein koko lauseen korkein hertsiarvo, joka keskimäärin oli noin 140 Hz. Sitä seurasivat matalammat huiput lauseen jatkuessa. Kaksi jälkimmäistä taajuushuippua olivat ensimmäistä taajuushuippua matalampia. Ne eivät laskeneet kuitenkaan järjestelmällisesti siten, että toinen huippu olisi ollut lauseen toiseksi suurin ja niin edelleen, vaan huippujen välillä oli vaihtelua. Jälkimmäisten taajuushuippujen välillä ei ollut selkeää järjestystä.

Kaikissa kahdessatoista lauseessa korkeita taajuusarvoja oli keskimäärin yhteensä noin kolme. Lauseiden lopussa hertsit laskivat noin 90 hertsin molemmin puolin. Ainoastaan taulukon 3 lauseessa 1 viimeiset hertsiarvot eivät laskeneet alle sadan hertsin. Perustaajuuden vaihtelu kulki säännöllisesti kautta lauseiden. Kaikissa mittausblokeissa ei ollut kolmea mittauspistettä laskettavissa, esimerkiksi klusiilien ja frikatiivien kohdalla. Eniten yhden mittapisteen blokkeja oli lauseiden alussa ja lopussa, mutta niitä esiintyi myös keskellä lauseita. Ne ovat lihavoituna taulukossa 3.

Taulukko 3. Lauseiden 1, 5, 9 ja 12 perustaajuudet. Lihavoidut arvot ovat ääniblokeista, joissa oli vain yksi mittapiste.

Lause 1	F0/Hz	Lause 5	F0/Hz	Lause 9	F0/Hz	Lause 12	F0/Hz
F1	-1	F1	-1	F1	-1	F1	-1
F2	-1	F2	-1	F2	-1	F2	-1
F3	-1	F3	120,28	F3	-1	F3	-1
F4	151,4	F4	145,4	F4	148,58	F4	-1
F5	146,53	F5	112,34	F5	128,24	F5	-1
F6	119,92	F6	107,31	F6	107,77	F6	-1
F7	116,72	F7	120,17	F7	104,78	F7	149
F8	124,37	F8	106,18	F8	115,36	F8	121,9
F9	111,39	F9	104,24	F9	109,99	F9	108,8
F10	103,09	F10	105,95	F10	105,08	F10	130,1
F11	137,58	F11	122,16	F11	100,75	F11	111
F12	120,52	F12	105,96	F12	-1	F12	107,9
F13	106,13	F13	98,93	F13	131,78	F13	120,9
F14	107,83	F14	96,32	F14	109,09	F14	131,1
F15	108,19	F15	94,66	F15	96,21	F15	102,1
F16	106,58	F16	92,28	F16	99,16	F16	98,4
F17	-1	F17	-1	F17	93,27	F17	96,74
F18	-1	F18	-1	F18	88,59	F18	97,39
F19	-1	F19	-1	F19	87,1	F19	-1
F20	-1	F20	-1	F20	-1	F20	-1

Perustaajuuden mittaamisessa virhetarkkuuden määrittelyn suhteen tuli esiin samanlaisia ongelmia kuin magneettikuvienkin kohdalla. Osasävelistä osa oli monitulkintaisia tai muuten muita epäselvemmin havaittavissa, mikä hankaloitti tarkkaa mittaamista. Mittaustarkkuus tarkastettiin laskemalla kolme kertaa samat mittapisteet samalta ajanjaksolta. Ääninäytteen alusta valittiin ensimmäiset 1,12 sekuntia, jotka ositettiin seitsemään ääniblokkiin. Perustaajuus oli mitattavissa neljännen blokin kolmannesta mittapisteestä. Kaikki mahdolliset mittapisteet laskettiin tästä alkaen seitsemänteen ääniblokkiin saakka. Mittapisteitä oli yhteensä yhdeksän. Kahdeksan ensimmäistä laskettiin kolmesti ja viimeinen laskettiin kuudesti. Tulokset ovat näkyvillä taulukossa 4. Perustaajuuden mittatarkkuuden mittaamisessa käytettiin paljon pienempää otantaa kuin magneettikuvien nikamamitan virhetarkkuuden kartoituksessa, mutta testi oli suuntaa antava. Keskimääräinen keskihajonta oli noin 0,64 Hz tässä kahdeksan kolmesti lasketun mittapisteen otoksessa.

Taulukko 4. Kolmesti mitattu lause 1, jossa puhe alkoi neljännen blokin kolmannesta mittapistestä (4;3;X). Mittapisteiden keskiarvot on merkitty mustalla ja niiden keskiarvot ja -hajonnat ovat oikealla punaisella.

Lause 1: mittauskerta 1 mittakohta/ka	Lause 1: mittauskerta 2 mittakohta/ka	Lause 1: mittauskerta 3 mittakohta/ka	Mittakohdan keskiarvo (Hz)	Keskiarvon keskihajonta
4;3;1	4;3;2	4;3;3	4;3	
151,11	149,81	150,1	150,34	0,68
5;1;1	5;1;2	5;1;3	5;1	
154,79	153,49	153,9	154,06	0,66
5;2;1	5;2;2	5;2;3	5;2	
148,6	148,19	147,9	148,22	0,37
5;3;1	5;3;2	5;3;3	5;3	
133,82	134,61	135,3	134,58	0,75
6;1;1	6;1;2	6;1;3	6;1	
128,98	126,49	127,4	127,62	1,26
6;2;1	6;2;2	6;2;3	6;2	
117,01	117,39	117,1	117,15	0,21
6;3;1	6;3;2	6;3;3	6;3	
115,21	114,64	115,8	115,22	0,58
7;1;3	7;1;3	7;1;3	7;1	
107,98	106,35	106,7	107,01	0,86

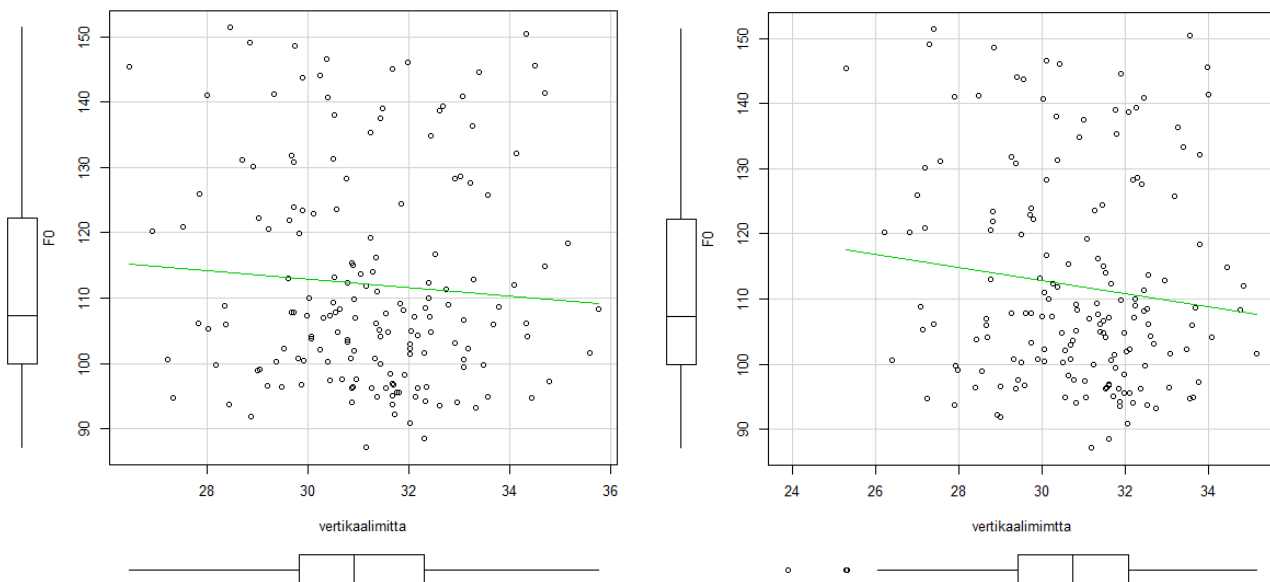
Sen lisäksi laskettiin myös yksittäistä mittauskohtaa yhteensä kuusi kertaa, jotta nähtiin kuinka paljon epäselvässä kohdassa saattoi tulla hajontaa. Taulukossa 5 näkyy lauseen 1 kohdat 7;3;1-6 eli seitsemännen blokin kolmannen mittapisteen kuusi mittausa. Hajonta on keskimäärin noin 2 Hz.

Taulukko 5. Yhden mittapisteen viisi osasäveltä laskettiin kuusi kertaa. Arvot ovat hertseinä. Alhaalla ovat osasävelten keskiarvot ja oikealla punaisella saman osasävelen kuuden otoksen yhteinen keskiarvo sekä sinisellä keskiarvon keskihajonta. Oikeassa alanurkassa ovat kuuden mittapisteen keskiarvo ja -hajonta.

Lause 1 Mittakohta 7;3;1	Lause 1 Mittakohta 7;3;2	Lause 1 Mittakohta 7;3;3	Lause 1 Mittakohta 7;3;4	Lause 1 Mittakohta 7;3;5	Lause 1 Mittakohta 7;3;6	Keskiarvo hertseinä	Keskiarvon keskihajonta
138,5	138	138,7	138	138	138	138,2	0,32
139,7	138,8	141,5	144,2	136,2	138,8	139,86	2,73
144,83	140,9	146,27	144,47	142,7	140,9	143,35	2,21
145,03	139,23	145,95	144,6	140,6	139,23	142,44	3,09
144,2	140,4	144,68	142,54	139,3	138,24	141,56	2,65
KA 142,45	KA 139,47	KA 143,42	KA 142,77	KA 139,36	KA 139,03	141,08	2,00

4.3 Kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja perustaajuuden vaihtelun lineaarinen regressioanalyysi

Kurkunpään liikkeestä mitattuja arvoja ja perustaajuuden vaihtelua verrattiin keskenään R-tilasto-ohjelmalla (2.15.1). Koska arvot olivat suhteasteikolla ja normaalijakautuneita, muuttujien vertailuun käytettiin lineaarista regressioanalyysia. Nollahypoteesiksi asetettiin, ettei kurkunpään liike selitä puheen perustaajuuden vaihtelua. Molempien mittaustapojen tuloksia verrattiin erikseen puheen perustaajuuteen siten, että selittävänä muuttujana oli kurkunpään asema ja selitettävänä perustaajuuden vaihtelu. Lineaarinen regressio tehtiin kaikkia lauseita käyttäen, sillä kyseessä oli sama puhuja ja voitiin olettaa kaikkien arvojen olevan vertailukelpoisia keskenään. Havaintoja oli molemmissa 240, joista puuttui 71 perustaajuusarvoa, joten havaintopareja oli yhteensä 169. Kummallakaan mittaustavalla p-arvot eivät saavuttaneet 95 % luotettavuusrajaa ($p > 0,05$). Nollahypoteesi astui voimaan. Kuvassa 10 on molempien mittaustapojen sirontakuviot. Pisteet ovat sijoittuneet kuviin ilman minkäänlaista selvästi erotettavaa lineaarista korrelaatiota.



Kuva 10. Kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja F0:n vaihtelun suhde: Pystyakselilla on perustaajuus hertseinä ja vaaka-akselilla kurkunpään pystysuuntainen liike millimetreinä. Vasemmalla on mittaustavan 1 kuva ja oikealla mittaustavan 2. Sirontakuviossa ei ole lineaarista yhteyttä muuttujien välillä.

Kaikkien lauseiden kesken tehty lineaarinen regressio ei tuottanut tulosta, joten molemmista aineistoista tarkasteltiin yksittäisiä lauseita. Koska yksittäisissä lauseissa havaintopareja oli alle 20, lauseiden ensimmäisiä tai viimeisiä arvoja ei otettu huomioon, mikäli ne koostuivat vain yhdestä mittapisteestä. Tarkastelemalla aineistojen lauseiden sirontakuvioita, ne jaettiin nouseviin ja laskeviin pisteparviin. Molempien aineistojen lauseissa suunnat olivat samat, mutta niiden p-arvot ja merkitsevyystasot vaihtelivat. Lauseiden 1, 5, 8, 9, 10, 11 ja 12 sirontakuvioissa oli negatiivinen korrelaatio ja lauseiden 2, 3, 4, 6 ja 7 sirontakuvioissa oli positiivinen korrelaatio. Ainoastaan neljän yksittäisen lauseen p-arvot jäivät luotettavuusrajan alapuolelle. Mittaustavan 2 lauseissa p-arvot olivat pienempiä. Molemmista aineistoista lauseista 3 ja 4 löytyivät positiiviset korrelaatiot ja lauseista 8 ja 12 negatiiviset. Taulukossa 6 on nähtävillä lauseet.

Taulukko 6. Ylemmässä taulukossa lauseet on jaettu sirontakuvion perusteella negatiivisiin (kursivoitu) ja positiivisiin (normaali). Lihavoidut lauseet saavuttivat luotettavuusrajan 95 %.

Alemmassa taulukossa on eroteltu lauseiden fokukset. Lihavoiduissa sanoissa on paino ja merkitsemättömissä lauseissa on laaja fokus. P-arvojen saavuttaneiden ja laajan fokuksen lauseissa on yhteys.

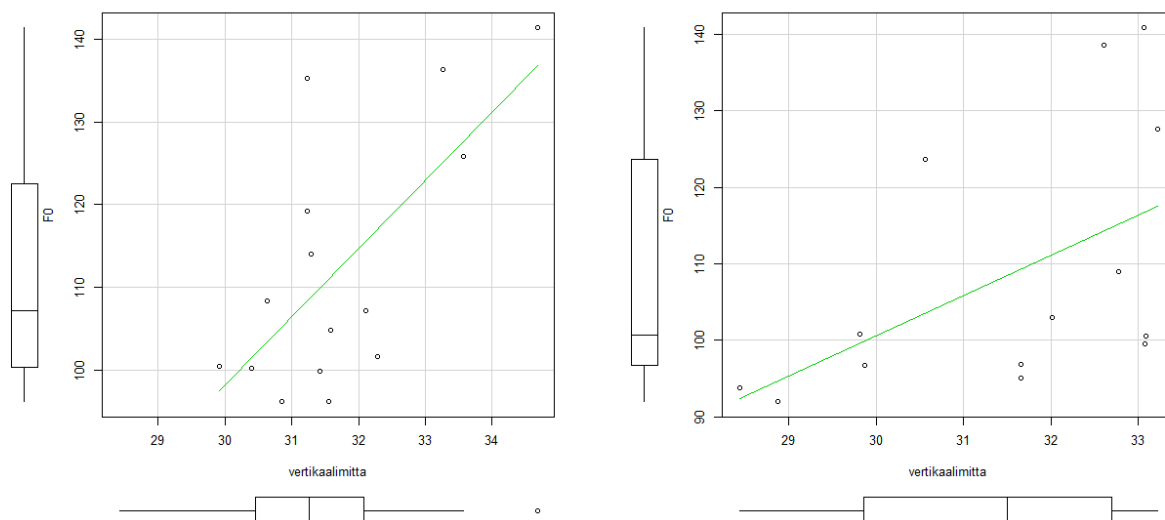
Sirontakuvioiden perusteella jaetut lauseet

- | | |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 1. <i>Tuula tukee Kuubaa.</i> | 7. <i>Piika vahaa tuubaa.</i> |
| 2. <i>Saana sahaa haapaa.</i> | 8. Paavi tavaa suuraa. |
| 3. Taata tilaa taalaa. | 9. <i>Haamu lukee saagaa.</i> |
| 4. Ruusu varoo laavaa. | 10. <i>Paavi tekee siikaa.</i> |
| 5. <i>Siiri kuvaa jaalaa.</i> | 11. <i>Tuuli puhuu kiinaa.</i> |
| 6. <i>Saara sukii laamaa.</i> | 12. Liinu tilaa viinaa. |

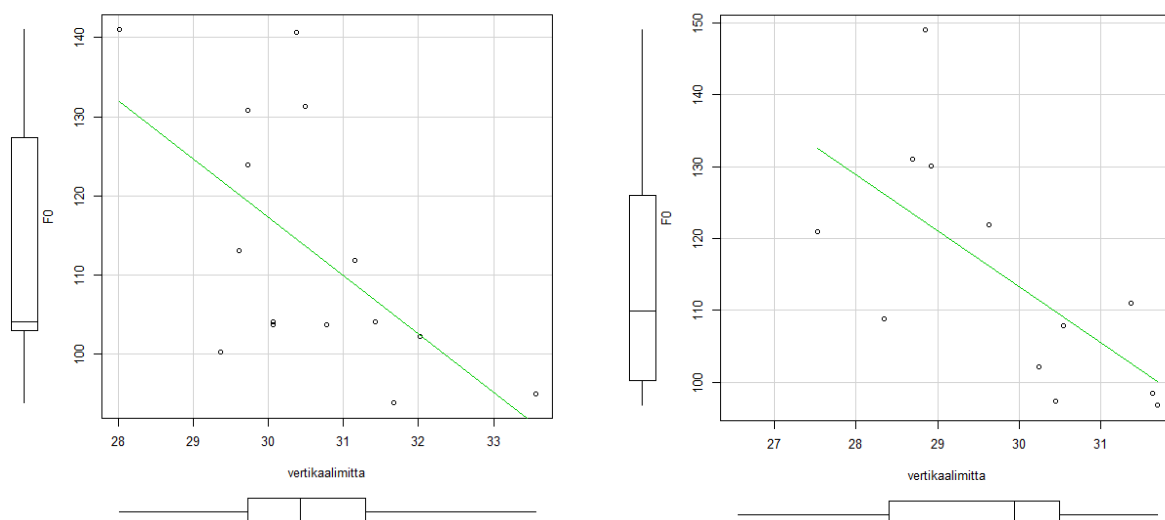
Lauseiden sanapainot

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------|
| 1. Tuula tukee Kuubaa. | 7. Piika vahaa tuubaa . |
| 2. Saana sahaa haapaa . | 8. Paavi tavaa suuraa. |
| 3. Taata tilaa taalaa. | 9. Haamu lukee saagaa . |
| 4. Ruusu varoo laavaa. | 10. Paavi tekee siikaa. |
| 5. Siiri kuvaa jaalaa. | 11. Tuuli puhuu kiinaa . |
| 6. Saara sukii laamaa. | 12. Liinu tilaa viinaa. |

Mittaustavalla 1 kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja puheen perustaajuuden välinen positiivinen korrelaatio oli marginaalisesti merkitsevä lauseissa 3 ja 4 (L3: $R^2=0,462$, $p=0,005$ ja L4: $R^2=0,275$, $p=0,058$). Positiivisesti korreloivien lauseiden sirontakuviot ovat kuvassa 11. Negatiiviset korrelaatiot olivat tilastollisesti melkein merkitseviä lauseissa 8 ja 12 (L8: $R^2=0,365$, $p=0,017$ ja L12: $R^2=0,435$, $p=0,020$). Kurkunpään pystysuuntainen liike selitti korkeimmillaan 46 % perustaajuuden vaihtelua. Lauseiden sirontakuviot ovat kuvassa 12.

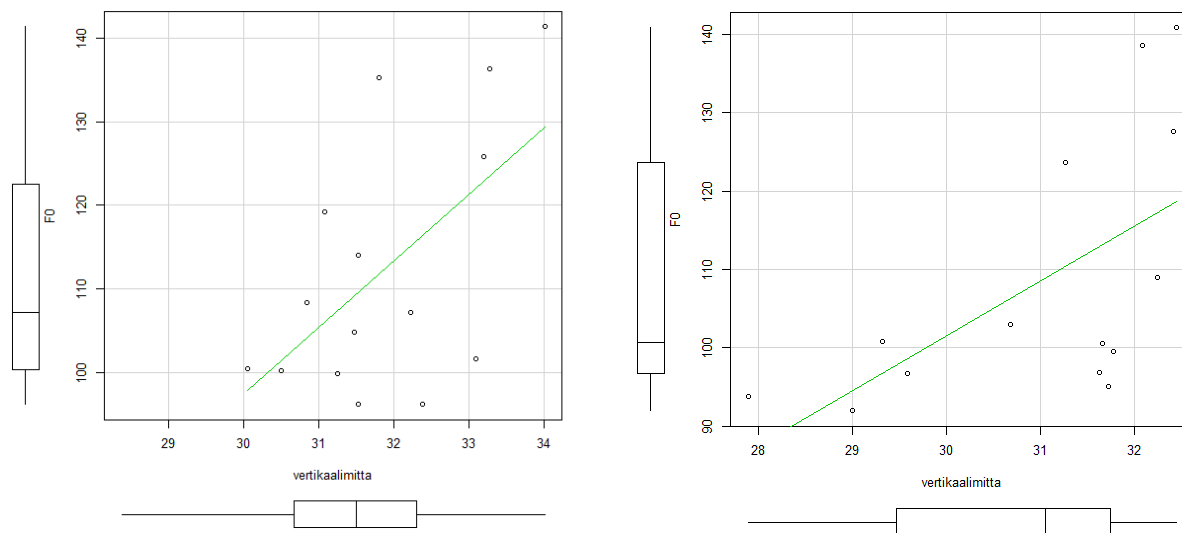


Kuva 11. Mittaustavalla 1 mitatut positiiviset korrelaatiot lauseista 3 ja 4. Kurkunpään vertikaalinen liike selittää 46 % ja 28 % perustaajuuden vaihtelusta. Vasemmalla on lause 3 ja oikealla lause 4.

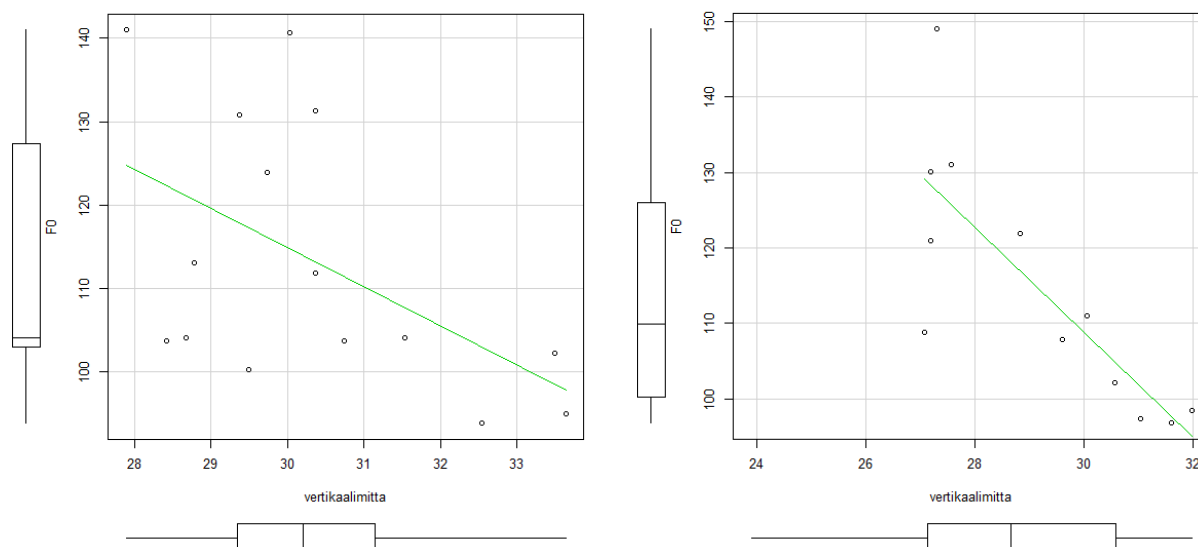


Kuva 12. Negatiiviset korrelaatiot lauseista 8 (selitysaste 37 %) ja 12 (selitysaste 44 %) mittaustavalla 1 mitattuna. Vasemmalla on lause 8 ja oikealla lause 12.

Mittaustavalla 2 mitattujen lauseiden tulokset olivat samankaltaiset, mutta p-arvot olivat pienempiä (L3: $R^2=0,334$, $p=0,024$ ja L4: $R^2=0,360$, $p=0,023$). Lauseissa 8 ja 12 korrelaatiot olivat negatiiviset ja tilastollisesti positiivisia merkitsevempiä (L8: $R^2=0,269$, $p=0,048$ ja L12: $R^2=0,643$, $p=0,002$). Sirontakuviot positiivisesti korreloivista lauseista 3 ja 4 ovat kuvassa 13 ja negatiivisesti korreloivat lauseet 8 ja 12 kuvassa 14. Mittaustavan 2 p-arvot olivat pienemmät kuin mittaustavalla 1.



Kuva 13. Mittaustavalla 2 mitatut nousevat positiiviset korrelaatiot lauseissa 3 ja 4. Kurkunpään vertikaalinen liike selittää 33 % lauseessa 3 ja 36 % lauseessa 4 F0:n varianssia. Lause 3 on vasemmalla ja lause 4 oikealla.



Kuva 14. Mittaustavalla 2 mitatut negatiivisesti korreloivat lauseet 8 ja 12, joissa kurkunpään pystysuuntainen liike selittää 27 % ja 64 % perustaajuuden varianssista. Vasemmalla on lause 8 ja oikealla lause 12.

5 Pohdinta

Tulokset olivat poikkeavia aiempaan teorian tietoon verrattuna. Yleisesti on oletettu kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen mukailevan perustaajuuden vaihtelua, eli karkeasti ottaen taajuuden noustessa myös kurkunpää nousee. Tämän tutkimuksen tulokset eivät täysin vastanneet tuota olettamusta. Kaikkien kahdentoista lauseen kesken ei tullut esiin lineaarista korrelaatiota kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen yhteydestä perustaajuuden nousuun kummassakaan aineistossa. Sen sijaan yksittäisistä lauseista löytyi positiivisia ja negatiivisia korrelaatioita. Suurimmat korrelaatiot löytyivät selvästi lauseista 3, 4, 8 ja 12 niin mittaustavalla 1 kuin 2. Kyseiset lauseet kuuluivat laajan fokuksen ryhmään, eli niissä ei ilmennyt emfaattisia painoja. Muut lauseet, jotka sisälsivät painon joko ensimmäisellä tai viimeisellä sanalla, eivät saavuttaneet p-arvoja. Hondan ja kumppaneiden (1999) tutkimuksessa kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen vaikutuksesta puheen perustaajuuteen käytettiin staattista liukuäännettä, joten se ei sisältänyt lainkaan kielellistä sisältöä. Tämä voi siten vaikuttaa siihen, että painon sisältävissä lauseissa ei löytynyt korrelaatioita ja sitä vastoin laajan fokuksen lauseissa korrelaatio oli havaittavissa. Näin ollen tämän tutkielman aineistossa esimerkiksi ilmanpaineen vaihtelu on voinut vaikuttaa kurkunpään pystysuuntaista liikettä enemmän perustaajuuden vaihteluun, mahdollisesti johtuen sen kielellisestä sisällöstä. On huomioitava myös, että rengasruston kallistumisen mittaaminen toisi lisäinformaatiota ja usean muuttujan regressioanalyysi voisi antaa näin ollen selittävämpiä tuloksia.

Tulosten perusteella oli pohdittava tutkielmassa käytettyjen metodien käyttökelpoisuutta jatkotutkimusten kannalta. Kurkunpään aseman tai perustaajuuden mittaamisen tarkentamista tulisi miettiä. Ensinnäkin kun verrattiin kurkunpään ja perustaajuuden mittaustuloksia, huomattiin perustaajuuden kulkevan saman kaavan mukaan kaikissa lauseissa. Kurkunpään liike vaihteli enemmän ja siitä oli hankalampi löytää yhtäläisyyksiä lauseiden kesken. Perustaajuusarvot olivat useista mittauksista koottuja keskiarvoja. Ne antoivat tuloksen yhden ääniblokin viitteellisestä taajuuden korkeudesta. MR-laitteen aiheuttamasta melusta johtuen suoraa F0-analyysia ei voitu suorittaa Praat-ohjelmalla. Manuaalisesti kerätty tapa osoittautui kuitenkin hyväksi keinoksi, joskin aikaa vieväksi, saada luotettavat perustaajuusarvot MR-kuvauksen aikana taltioidusta äänimateriaalista. Se osoitti myös, että F0-kerääminen äänitaltioinneista on mahdollista. Jatkotutkimuksia ajatellen anatomisen nikamamitan muuntaminen vinoksi olisi suositeltavaa. Tällöin mittaamiseen ei vaikuttaisi liike tai kuvien epäsuhteet. Nikamamitan saisi helposti vaihdettua vinoksi vaihtamalla mittapisteiden paikkoja

esimerkiksi nikaman C4 ylätakakulmaan ja nikaman C7 alaetukulmaan. Tässä tutkielmassa käytetyn nikamamitan virhetarkkuus oli noin 0,5 millimetriä, joten muuten sen käyttö soveltuu virhetarkkuudeltaan MR-kuvien käsittelyyn. Ventrikkelin käyttöä mittapisteenä tulisi myös jatkossa pohtia, sillä sen mittaushajonta vaihteli paljon. Sen lisäksi tulisi myös miettiä uudemman kerran miten toimia tilanteissa, joissa mittapiste ei erottunut kunnolla. MR-kuvista oli hankalaa määritellä kurkunpään alueelta tarpeeksi tarkkaa tai kiinteästi tietyssä muodossa pysyvää pistettä, koska rakenteet liikkuvat siellä niin pysty- kuin vaakasuoraankin, tehden kallistumisliikkeitä. Toisaalta MR-kuvilta ei voi olettaa parempaa kuvanlaatua vaihtamatta mittaussparametreja, jotka vaikuttaisivat moneen muuhun asiaan, kuten aikaresoluution kestoon tai kuva-alueen kokoon. Siksi näissä olosuhteissa on huomioitava epävarmuutta lisäävät tekijät ja pyrittävä vain toimimaan niiden puitteissa mahdollisuuksien mukaan. Mittaustapojen välillä oli kuitenkin eroja ja voidaan todeta, että mittaustapa 2 osoittautui paremmaksi tavaksi, sillä siinä hajonta jäi keskimäärin pienemmäksi ja mittauspiste kuvasi paremmin kurkunpään pystysuuntaista liikettä. Sen mittausta osoittautui myös helpommin kohdistettavaksi. Kuvanlaadun lisäksi myös itse kuvan ja äänen yhteensovittamisesta saattoi aiheutua ongelmia. Magneettikuvat edustivat yhtä pitkää hetkeä, kun taas yhdessä ääniblokissa saattoi tapahtua kymmenien hertsien taajuusvaihtelua. Tätä ongelmaa kompensoitiin laskemalla ääniblokeista taajuuksien keskiarvot sekä jättämällä yksittäiset mitta-arvot pois regressioanalyysistä. Yksittäiset hertsien mittausravot sijoittuivat lauseiden alkuun ja loppuun tai keskelle sellaisiin kohtiin, joissa esiintyi klusiileita tai frikatiiveja. Tämä saattoi myös osaltaan vaikuttaa tuloksiin. Ongelmista huolimatta tutkielma osoitti magneettikuvista ja äänitallenteista olevan mahdollista mitata kurkunpään liikettä ja perustaajuutta. Sen lisäksi tulokset paljastivat lauseissa olevan pieniä eroja riippuen mahdollisesti niiden kielellisestä sisällöstä: Koehenkilön puhumat lauseet olivat vastauksia hänelle esitettyihin kysymyksiin, joten niissä esiintyi emfaattisia painoja. Tällöin ilmanpaineen vaihtelulla, äänihuulilihaksella ja rengasruston kallistumisella oli varmasti pystysuuntaista liikettä merkittävämmän vaikutusta perustaajuuden säätelyyn.

6 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa tarkasteltiin kurkunpään pystysuuntaisen liikkeen ja puheen perustaajuuden vaihtelun yhteyttä käyttäen aineistona ääni- ja magneettikuva-materiaalia. Kurkunpään liike mitattiin magneettikuvista ja perustaajuus kerättiin manuaalisesti magneettikuvauksen aikana äänitetystä näytteestä. Kurkunpään liikkeen mittaamiseen käytettiin kahta toisistaan hieman poikkeavaa mittaustapaa. Lineaarinen regressioanalyysi ei paljastanut muuttujien välillä olevan korrelaatiota. Ainoastaan muutamassa yksittäisessä lauseessa havaittiin korrelaatioita joko negatiiviseen tai positiiviseen suuntaan. Nämä lauseet edustivat laajan fokuksen lauseita. Muissa lauseissa, joissa oli paino joko ensimmäisellä tai viimeisellä sanalla, eivät osoittaneet korreloivuutta perustaajuuden kanssa. Lauseiden kielellinen sisältö mahdollisesti vaikutti tulokseen. Magneettikuvien aikaresoluutiota tulisi nostaa jatkotutkimuksia ajatellen. Tutkielman perusteella mittaustapaa tulisi muuttaa hieman, jotta varmistettaisiin luotettavammat tulokset. Sen lisäksi esimerkiksi rengasruston kallistumisliikkeen mittaaminen olisi suotavaa. Mittaukset on tehty ainoastaan yhdeltä koehenkilöltä kerätystä aineistosta, joten yleistä ei tulosten perusteella voitu tehdä. Tutkielma kuitenkin osoittaa, että MR-materiaalista on mahdollista kerätä puheen perustaajuudet sekä mitata kurkunpään liikkeitä ja vertailla niitä keskenään.

Lähteet

Aalto, D., Malinen, J., Vainio, M., Saunavaara, J. & Palo, P. (elokuu, 2011). Estimates for the measurement and articulatory error in MRI data from sustained vowel production. *Esitelmä konferenssissa 17th International Congress of Phonetic Sciences (ICPhS XVII)*. Hong Kong, Kiina.

Ahmad, M., Dargaud, J., Morin, A. & Cotton, F. (2009). Dynamic MRI of Larynx and vocal fold vibrations in normal phonation. *Journal of Voice*, 23, 245–239.

Champsaur, P., Parlier-Cuau, C., Brunet, C., Moulin, G., Chagnaud, C., Lassau, J.P. & Kasbarian, M. (2000). Serial anatomy of the larynx in MRI: MRI-histologic correlations. *Surgical Radiologic Anatomy*, 22, 5–11.

Deichmann, R. (2009). Principles of MRI and functional MRI. Teoksessa M. Filippi (toim.), *fMRI techniques and protocols*. Neuromethods, 41, 3–29. Humana Press.

Drake, R., Vogl, A.W. & Mitchell, A. (2010). Gray's anatomy for students (2.painos). Philadelphia: Elsevier.

Hamberg, L. & Aronen, H. (1992). Magneettikuvauksen perusteet ja tutkimusmenetelmät. *Duodecim*, 108, 713–724.

Hardcastle, W.J. (1976). Physiology of speech production. London: Academic press.

Honda, K., Hirai, H., Masaki, S. & Shimada, Y. (1999). Role of vertical larynx movement and cervical lordosis in F0 control. *Language and Speech*, 42, 401–411.

Lamminen, A. & Soila, K. (1992). Luuston ja lihaksiston magneettikuvaus. *Duodecim*, 108, 783–796.

Nienstedt, W., Hänninen, O., Arstila, A. & Björkqvist, S.-E. (2006). Ihmisen fysiologia ja anatomia (16.painos). Helsinki: WSOY.

McRobbie, D.W., Moore, E.A., Graves, M.J. & Prince, M.R. (2007). MRI, from picture to proton (2.painos). Cambridge: University press.

Westbrook, C. & Kaut, C. (1998). MRI In Practice (2.painos). Oxford: Blackwell science.

LIITTEET

Liite 1. Mittaustavalla 1 mitatut kaksitoista lausetta (L1-12), jossa F1-20 ovat kuvakehyksiä, **ka/mm** on kurkunpään liike millimetreinä ja **kh** on kolmen otoksen (**n**) keskihajonta.

L1	ka/mm	kh	n	L2	ka/mm	kh	n	L3	ka/mm	kh	n	L4	ka/mm	kh	n
F1	30,15	0,13	3	F1	30,66	0,3	3	F1	30,52	0,34	3	F1	30,76	0,58	3
F2	29,11	0,12	3	F2	29,57	0,62	3	F2	30,33	0,33	3	F2	29,84	0,27	3
F3	27,08	0,23	3	F3	27,71	0,48	3	F3	28,42	0,68	3	F3	29,75	0,12	3
F4	28,45	0,27	3	F4	27,38	0,08	3	F4	30,24	0,6	3	F4	31,33	0,18	3
F5	30,36	0,34	3	F5	30,51	0,55	3	F5	33,26	0,19	3	F5	33,07	0,39	3
F6	29,82	0,13	3	F6	31,68	0,79	3	F6	31,29	0,78	3	F6	32,61	0,61	3
F7	31,35	0,33	3	F7	31,05	0,61	3	F7	30,63	0,41	3	F7	33,09	0,36	3
F8	31,84	0,66	3	F8	30,92	0,58	3	F8	32,11	0,32	3	F8	33,08	0,45	3
F9	32,74	0,13	3	F9	32,67	0,43	3	F9	34,68	0,11	3	F9	33,22	0,51	3
F10	32,9	0,61	3	F10	34,09	0,72	3	F10	33,57	0,58	3	F10	32,77	0,11	3
F11	31,44	0,27	3	F11	32,33	0,44	3	F11	31,58	0,66	3	F11	31,66	0,39	3
F12	29,21	0,2	3	F12	30,49	1,25	3	F12	31,43	0,54	3	F12	29,81	0,14	3
F13	27,82	0,61	3	F13	30,94	0,69	3	F13	32,29	0,25	3	F13	30,56	0,44	3
F14	29,72	0,63	3	F14	31,48	0,59	3	F14	31,24	0,16	3	F14	32,01	0,51	3
F15	31,88	0,94	3	F15	30,90	0,55	3	F15	31,23	0,24	3	F15	31,66	0,73	3
F16	33,09	0,33	3	F16	29,98	0,54	3	F16	29,92	0,65	3	F16	29,87	0,62	3
F17	31,58	0,79	3	F17	29,53	0,66	3	F17	30,4	0,27	3	F17	28,43	0,28	3
F18	31,19	0,33	3	F18	30,91	0,25	3	F18	30,86	0,26	3	F18	28,87	0,35	3
F19	31,55	0,4	3	F19	30,09	0,98	3	F19	31,55	0,49	3	F19	30,87	0,39	3
F20	33,05	0,45	3	F20	31,09	0,25	3	F20	32,04	0,15	3	F20	31,95	0,33	3

L5	ka/mm	kh	n	L6	ka/mm	kh	n	L7	ka/mm	kh	n	L8	ka/mm	kh	n
F1	30,65	0,19	3	F1	30,13	0,2	3	F1	30,26	0,25	3	F1	30,49	0,17	3
F2	29,69	0,45	3	F2	29,86	0,34	3	F2	29,53	0,09	3	F2	30,03	0,12	3
F3	26,92	0,42	3	F3	31,97	0,27	3	F3	31,43	0,45	3	F3	29,72	0,22	3
F4	26,45	0,36	3	F4	34,49	0,27	3	F4	34,31	0,16	3	F4	30,38	0,06	3
F5	30,78	0,39	3	F5	32,39	0,11	3	F5	33,01	0,15	3	F5	30,49	0,22	3
F6	30,43	0,24	3	F6	34,34	0,75	3	F6	35,75	0,53	3	F6	31,15	0,38	3
F7	26,92	0,33	3	F7	34,18	0,46	3	F7	34,68	0,26	3	F7	30,77	0,06	3
F8	31,34	0,42	3	F8	30,52	0,19	3	F8	33,28	0,26	3	F8	30,48	0,32	3
F9	32,18	0,52	3	F9	31,54	0,01	3	F9	32,01	0,46	3	F9	29,72	0,06	3
F10	33,66	0,64	3	F10	33,47	0,18	3	F10	31,33	0,2	3	F10	29,61	0,32	3
F11	29,02	0,65	3	F11	34,78	0,41	3	F11	30,02	0,17	3	F11	29,37	0,18	3
F12	28,36	0,26	3	F12	32,52	0,15	3	F12	29,89	0,45	3	F12	30,06	0,22	3
F13	29,01	0	3	F13	30,77	0,4	3	F13	30,11	0,11	3	F13	30,06	0,16	3
F14	29,47	0,41	3	F14	30,67	0,45	3	F14	28,02	0,43	3	F14	28,01	0,38	3
F15	27,32	0,34	3	F15	32,35	0,33	3	F15	28,18	0,14	3	F15	29,72	0,16	3
F16	31,71	0,34	3	F16	31,75	0,49	3	F16	29,19	0,27	3	F16	31,43	0,38	3
F17	29,91	0,31	3	F17	32,6	0,19	3	F17	30,96	0,16	3	F17	32,02	0,68	3
F18	29,88	0,27	3	F18	33,2	0,26	3	F18	32,51	0,12	3	F18	33,56	0,4	3
F19	29,46	0,54	3	F19	33,55	0,5	3	F19	32,54	0,46	3	F19	31,67	0,12	3
F20	28,58	0,29	3	F20	33,79	0,15	3	F20	32,44	0,17	3	F20	31,67	0,73	3

L9	ka/mm	kh	n	L10	ka/mm	kh	n	L11	ka/mm	kh	n	L12	ka/mm	kh	n
F1	30,54	0,11	3	F1	30,44	0,12	3	F1	30,14	0,35	3	F1	30,31	0,25	3
F2	28,74	0,29	3	F2	28,07	0,16	3	F2	29,45	0,61	3	F2	28,44	0,07	3
F3	28,68	0,29	3	F3	27,79	0,39	3	F3	30,21	0,28	3	F3	27,5	0,55	3
F4	29,74	0,8	3	F4	29,32	0,31	3	F4	33,39	0,44	3	F4	30,3	0,63	3
F5	30,75	0,49	3	F5	29,88	0,44	3	F5	32,91	0,33	3	F5	28,37	0,26	3
F6	29,67	0,47	3	F6	30,3	0,3	3	F6	32,43	0,05	3	F6	26,55	0,43	3
F7	30,58	0,8	3	F7	27,21	0,07	3	F7	32,43	0,31	3	F7	28,85	0,41	3
F8	30,86	0,54	3	F8	27,86	0,09	3	F8	34,32	0,86	3	F8	29,63	0,31	3
F9	32,39	0,79	3	F9	32,4	0,32	3	F9	35,58	0,26	3	F9	28,34	0,61	3
F10	31,42	0,56	3	F10	32,05	0,41	3	F10	33,67	0,25	3	F10	28,92	0,51	3
F11	30,84	0,88	3	F11	31,91	0,44	3	F11	34,13	0,46	3	F11	31,37	0,71	3
F12	29,28	0,73	3	F12	32,16	0,43	3	F12	33,77	0,23	3	F12	30,54	0,42	3
F13	29,68	0,66	3	F13	35,14	0,76	3	F13	34,43	0,53	3	F13	27,53	0,6	3
F14	31,83	0,64	3	F14	33,16	0,32	3	F14	32,95	0,65	3	F14	28,69	0,56	3
F15	31,25	0,69	3	F15	30,85	0,71	3	F15	32,33	0,75	3	F15	30,24	0,31	3
F16	29,05	0,47	3	F16	31,37	0,13	3	F16	32,12	0,49	3	F16	31,63	0,45	3
F17	33,32	0,69	3	F17	31,81	0,27	3	F17	32,6	0,45	3	F17	31,69	0,33	3
F18	32,29	0,52	3	F18	32,02	0,71	3	F18	33,81	0,51	3	F18	30,44	1,09	3
F19	31,14	0,59	3	F19	32,02	0,74	3	F19	33,88	0,62	3	F19	30,24	0,22	3
F20	32,02	0,51	3	F20	33,26	0,60	3	F20	34,13	0,53	3	F20	31,22	0,46	3

Liite 2. Mittaustavalla 2 mitatut kaksitoista lausetta (L1-12), jossa F1-20 ovat kuvakehyksiä.

ka/mm on kurkunpään liike millimetreinä ja **kh** on kolmen otoksen (**n**) keskihajonta.

L1	ka/mm	kh	n	L2	ka/mm	kh	n	L3	ka/mm	kh	n	L4	ka/mm	kh	n
F1	30,21	0,08	2	F1	31,09	0,60	2	F1	31,27	0,39	2	F1	30,77	0,23	2
F2	28,89	0,31	2	F2	30,04	0,66	2	F2	30,38	0,25	2	F2	29,78	0,95	2
F3	26,05	0,42	2	F3	27,78	0,09	2	F3	28,38	0,49	2	F3	28,59	0,47	2
F4	27,41	0,33	2	F4	27,36	0,04	2	F4	29,41	0,14	2	F4	29,36	0,82	2
F5	30,10	0,37	2	F5	30,36	0,22	2	F5	33,28	0,56	2	F5	32,44	0,20	2
F6	29,51	0,44	2	F6	33,41	0,52	2	F6	31,53	0,57	2	F6	32,08	0,43	2
F7	31,34	0,01	2	F7	32,55	0,29	2	F7	30,84	0,71	2	F7	31,66	0,30	2
F8	31,44	0,57	2	F8	31,90	0,21	2	F8	32,22	0,86	2	F8	31,77	0,29	2
F9	32,46	0,40	2	F9	32,26	0,41	2	F9	34,01	0,50	2	F9	32,41	0,15	2
F10	32,70	0,29	2	F10	34,85	0,37	2	F10	33,19	0,31	2	F10	32,24	0,35	2
F11	31,01	0,61	2	F11	32,54	0,29	2	F11	31,47	0,35	2	F11	31,72	0,07	2
F12	28,78	0,61	2	F12	31,32	0,44	2	F12	31,25	0,66	2	F12	29,32	0,14	2
F13	27,40	0,60	2	F13	31,13	0,27	2	F13	33,09	0,30	2	F13	31,26	1,44	2
F14	29,73	0,01	2	F14	31,76	0,40	2	F14	31,80	0,49	2	F14	30,68	0,04	2
F15	32,45	0,38	2	F15	31,47	0,81	2	F15	31,08	0,62	2	F15	31,62	0,37	2
F16	31,49	0,57	2	F16	30,24	0,37	2	F16	30,05	0,13	2	F16	29,58	0,36	2
F17	31,77	0,27	2	F17	30,07	0,76	2	F17	30,50	0,25	2	F17	27,89	0,16	2
F18	30,89	0,43	2	F18	32,04	0,29	2	F18	31,53	0,57	2	F18	29,00	0,31	2
F19	31,71	0,22	2	F19	33,06	0,72	2	F19	32,38	0,41	2	F19	30,83	0,47	2
F20	33,20	0,21	2	F20	31,46	0,52	2	F20	32,15	0,49	2	F20	31,62	0,08	2

L5	ka/mm	kh	n	L6	ka/mm	kh	n	L7	ka/mm	kh	n	L8	ka/mm	kh	n
F1	30,72	0,16	2	F1	29,90	0,14	2	F1	30,32	0,29	2	F1	30,64	0,15	2
F2	29,90	0,42	2	F2	29,59	0,15	2	F2	28,50	0,29	2	F2	30,00	0,16	2
F3	26,21	0,15	2	F3	30,42	0,44	2	F3	29,66	0,07	2	F3	29,31	0,23	2
F4	25,31	0,37	2	F4	33,99	0,36	2	F4	33,55	0,28	2	F4	30,03	0,12	2
F5	30,27	0,80	2	F5	31,66	0,44	2	F5	32,29	0,22	2	F5	30,37	0,23	2
F6	30,01	0,86	2	F6	34,09	0,22	2	F6	34,77	0,71	2	F6	30,37	0,52	2
F7	26,83	0,60	2	F7	33,06	0,08	2	F7	34,46	0,43	2	F7	30,74	0,30	2
F8	31,39	0,55	2	F8	29,95	0,51	2	F8	32,94	0,14	2	F8	30,48	0,22	2
F9	32,62	0,30	2	F9	31,35	0,59	2	F9	31,73	0,14	2	F9	29,37	0,15	2
F10	33,62	0,96	2	F10	32,49	0,15	2	F10	30,69	0,33	2	F10	28,78	0,52	2
F11	29,80	0,42	2	F11	33,78	0,51	2	F11	30,16	0,07	2	F11	29,50	0,49	2
F12	28,67	0,23	2	F12	30,12	0,27	2	F12	29,56	0,21	2	F12	28,68	0,37	2
F13	28,56	0,37	2	F13	29,75	0,08	2	F13	29,71	0,28	2	F13	28,42	0,44	2
F14	28,40	0,14	2	F14	29,44	0,08	2	F14	27,13	0,21	2	F14	27,89	0,30	2
F15	27,24	0,47	2	F15	31,56	0,15	2	F15	27,93	0,07	2	F15	29,74	0,22	2
F16	28,93	0,46	2	F16	32,12	0,07	2	F16	29,00	0,14	2	F16	31,54	0,36	2
F17	30,10	0,15	2	F17	31,87	0,29	2	F17	30,77	0,07	2	F17	33,49	0,15	2
F18	30,52	0,45	2	F18	32,85	0,07	2	F18	32,29	0,36	2	F18	33,64	0,82	2
F19	29,95	0,35	2	F19	33,01	0,15	2	F19	32,09	0,36	2	F19	32,54	1,04	2
F20	28,36	0,08	2	F20	33,01	0,29	2	F20	32,34	0,29	2	F20	31,80	1,04	2

L9	ka/mm	kh	n	L10	ka/mm	kh	n	L11	ka/mm	kh	n	L12	ka/mm	kh	n
F1	30,60	0,08	2	F1	30,24	0,21	2	F1	30,29	0,15	2	F1	30,11	0,14	2
F2	29,48	0,30	2	F2	28,07	0,43	2	F2	29,14	0,30	2	F2	27,08	0,07	2
F3	28,84	0,30	2	F3	27,61	0,07	2	F3	29,32	0,49	2	F3	23,89	0,37	2
F4	28,84	0,15	2	F4	28,47	0,42	2	F4	31,89	0,12	2	F4	28,47	0,15	2
F5	30,12	0,15	2	F5	28,82	0,07	2	F5	32,18	0,14	2	F5	26,67	0,22	2
F6	29,26	0,45	2	F6	28,67	0,14	2	F6	31,97	0,15	2	F6	25,33	0,21	2
F7	30,49	0,52	2	F7	26,39	0,21	2	F7	30,89	0,24	2	F7	27,29	0,36	2
F8	30,65	0,30	2	F8	27,00	0,21	2	F8	32,57	0,09	2	F8	28,83	0,08	2
F9	32,24	0,14	2	F9	31,61	0,14	2	F9	35,16	0,06	2	F9	27,08	0,66	2
F10	30,81	0,23	2	F10	31,41	0,14	2	F10	33,59	0,08	2	F10	27,18	0,07	2
F11	29,91	0,30	2	F11	30,65	0,21	2	F11	33,80	0,23	2	F11	30,06	0,07	2
F12	28,03	0,23	2	F12	31,86	0,07	2	F12	33,69	0,22	2	F12	29,60	0,15	2
F13	29,26	0,30	2	F13	33,79	0,21	2	F13	33,55	0,42	2	F13	27,18	0,37	2
F14	30,81	0,07	2	F14	32,12	0,29	2	F14	32,19	0,16	2	F14	27,57	0,62	2
F15	29,37	0,60	2	F15	29,89	0,29	2	F15	31,87	0,16	2	F15	30,56	0,35	2
F16	27,98	0,30	2	F16	30,55	0,22	2	F16	31,05	0,28	2	F16	31,98	0,02	2
F17	32,73	0,38	2	F17	31,97	0,22	2	F17	31,36	0,16	2	F17	31,60	0,07	2
F18	31,61	0,16	2	F18	32,07	0,07	2	F18	33,43	0,14	2	F18	31,04	0,15	2
F19	31,19	0,30	2	F19	32,17	0,21	2	F19	33,64	0,15	2	F19	30,62	0,28	2
F20	31,35	0,37	2	F20	32,68	0,22	2	F20	33,70	0,23	2	F20	31,29	0,21	2

Liite 3. Anatominen nikamamitta (N1-80) on mitattu 80 kertaa nikamien C4 (yläetukulma) ja C7 (alaetukulma) väliltä lauseista 1 ja 2.

N1-20	N21-40	N41-60	N61-80
71,48	71,7	71,7	71,53
71,15	71,7	71,81	70,83
71,92	71,7	71,92	71,14
71,58	71,7	71,92	71,45
71,81	71,48	71,04	71,45
71,92	71,59	71,26	71,14
71,81	71,59	71,26	71,24
71,92	71,7	71,82	71,24
71,48	71,37	71,26	71,34
72,03	72,13	71,48	70,93
71,93	71,92	71,26	70,73
72,25	72,03	72,46	70,73
71,92	71,59	71,48	70,52
71,37	71,48	71,37	70,22
71,93	71,37	72,03	71,45
72,03	71,7	71,92	70,63
71,92	72,03	71,59	71,24
71,7	71,59	71,7	70,83
71,26	71,48	71,48	71,04
71,48	71,48	71,92	71,04

Liite 4. Ventrikkelin virhetarkkuuden mittaustulokset lauseista 11 ja 12 (L11 ja L12). **Ka/mm** on kurkunpään liikkeen keskiarvo millimetreinä ja **kh** on kolmen otoksen (**n**) keskihajonta.

L 11	ka/mm	kh	n	L 12	ka/mm	kh	n
F1	30,04	0,08	3	F1	30,53	0,05	3
F2	28,93	0,14	3	F2	28,46	0,01	3
F3	29,96	0,26	3	F3	26,39	0,18	3
F4	33,08	0,19	3	F4	30,02	0,15	3
F5	32,49	0,00	3	F5	28,17	0,08	3
F6	32	0,00	3	F6	26,31	0,19	3
F7	31,58	0,19	3	F7	28,58	0,12	3
F8	33,41	0,07	3	F8	29,9	0,14	3
F9	36,1	0,00	3	F9	28,33	0,37	3
F10	33,61	0,21	3	F10	28,87	0,19	3
F11	33,53	0,07	3	F11	31,42	0,00	3
F12	33,57	0,07	3	F12	30,52	0,07	3
F13	34,07	0,14	3	F13	27,88	0,56	3
F14	32,79	0,14	3	F14	28,58	0,12	3
F15	32	0,00	3	F15	30,68	0,87	3
F16	31,66	0,08	3	F16	32,83	0,61	3
F17	31,75	0,13	3	F17	31,84	0,26	3
F18	33,74	0,13	3	F18	30,85	0,50	3
F19	33,65	0,08	3	F19	30,97	0,36	3
F20	33,57	0,07	3	F20	31,75	0,14	3

Liite 5. Perustaaajuusarvot 12 lauseesta (L1-12). Lihavoidut arvot ovat ääniblokeista, joissa on vain yksi mittapiste ja ”-1” tarkoittaa mittapistetöntä ääniblokkia.

L 1	F0/Hz	L 2	F0/Hz	L 3	F0/Hz	L 4	F0/Hz	L 5	F0/Hz	L 6	F0/Hz
F1	-1	F1	-1	F1	-1	F1	-1	F1	-1	F1	-1
F2	-1	F2	-1	F2	-1	F2	-1	F2	-1	F2	-1
F3	-1	F3	-1	F3	-1	F3	-1	F3	120,28	F3	146,03
F4	151,4	F4	-1	F4	143,98	F4	-1	F4	145,4	F4	145,53
F5	146,53	F5	138,05	F5	136,3	F5	140,89	F5	112,34	F5	112,33
F6	119,92	F6	145,13	F6	114,08	F6	138,62	F6	107,31	F6	104,06
F7	116,72	F7	113,63	F7	108,32	F7	100,58	F7	120,17	F7	-1
F8	124,37	F8	109,84	F8	107,18	F8	99,47	F8	106,18	F8	113,1
F9	111,39	F9	139,28	F9	141,39	F9	127,58	F9	104,24	F9	107,59
F10	103,09	F10	111,93	F10	125,83	F10	108,94	F10	105,95	F10	99,78
F11	137,58	F11	108,44	F11	104,82	F11	95,08	F11	122,16	F11	97,19
F12	120,52	F12	109,33	F12	99,86	F12	100,75	F12	105,96	F12	116,66
F13	106,13	F13	106,96	F13	101,64	F13	123,65	F13	98,93	F13	103,29
F14	107,83	F14	138,98	F14	135,32	F14	102,99	F14	96,32	F14	97,5
F15	108,19	F15	114,97	F15	119,22	F15	96,83	F15	94,66	F15	96,47
F16	106,58	F16	107,32	F16	100,41	F16	96,77	F16	92,28	F16	95,6
F17	-1	F17	102,34	F17	100,21	F17	93,78	F17	-1	F17	93,6
F18	-1	F18	101,89	F18	96,16	F18	91,94	F18	-1	F18	-1
F19	-1	F19	96,4	F19	96,25	F19	94,09	F19	-1	F19	-1
F20	-1	F20	-1	F20	-1	F20	-1	F20	-1	F20	-1

L 7	F0/Hz	L 8	F0/Hz	L9	F0/Hz	L10	F0/Hz	L11	F0/Hz	L12	F0/Hz
F1	-1	F1	-1	F1	-1	F1	-1	F1	-1	F1	-1
F2	-1	F2	-1	F2	-1	F2	-1	F2	-1	F2	-1
F3	-1	F3	-1	F3	-1	F3	-1	F3	-1	F3	-1
F4	150,38	F4	140,61	F4	148,58	F4	141,21	F4	144,54	F4	-1
F5	128,53	F5	131,33	F5	128,24	F5	123,49	F5	128,28	F5	-1
F6	108,35	F6	111,88	F6	107,77	F6	107	F6	104,85	F6	-1
F7	114,8	F7	103,63	F7	104,78	F7	100,56	F7	134,78	F7	149,04
F8	112,78	F8	-1	F8	115,36	F8	125,93	F8	106,09	F8	121,92
F9	101,38	F9	130,82	F9	109,99	F9	107,16	F9	101,54	F9	108,76
F10	100,77	F10	113,04	F10	105,08	F10	104,87	F10	-1	F10	130,13
F11	109,99	F11	100,21	F11	100,75	F11	98,32	F11	132,08	F11	110,99
F12	143,78	F12	104,08	F12	-1	F12	96,28	F12	108,67	F12	107,86
F13	122,84	F13	103,74	F13	131,78	F13	118,44	F13	94,76	F13	120,94
F14	105,3	F14	141,02	F14	109,09	F14	102,34	F14	94,06	F14	131,08
F15	99,83	F15	123,93	F15	96,21	F15	-1	F15	94,19	F15	102,11
F16	96,58	F16	104,06	F16	99,16	F16	94,91	F16	94,9	F16	98,4
F17	97,636	F17	102,2	F17	93,27	F17	95,48	F17	-1	F17	96,74
F18	-1	F18	94,89	F18	88,59	F18	90,9	F18	-1	F18	97,39
F19	-1	F19	93,77	F19	87,1	F19	-1	F19	-1	F19	-1
F20	-1	F20	-1	F20	-1	F20	-1	F20	-1	F20	-1