

Tero Ikävalko

Äänihuulilihaksen rooli lauluäänen muodostuksessa

Äänifysiologiaa laulopedagogiikan opiskelijoille

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Musiikkipedagogi
Pop/jazz-musiikin koulutusohjelma
Opinnäytetyö
29.11.2011

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tero Ikävalko Äänihuulilihaksen rooli lauluäänen muodostuksessa – Äänifysiologiaa laulopedagogiikan opiskelijoille 47 sivua 29.11.2011
Tutkinto	Musiikkipedagogi (AMK)
Koulutusohjelma	Pop/jazz -musiikin koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	Laulunopettaja
Ohjaaja Ohjaava opettaja	Lehtori Jukka Väisänen Lehtori Susanna Mesiä
<p>Opinnäytetyöni on kirjallisuuskatsaus. Tavoitteenani on ollut kerätä tietoa äänihuulilihaksen roolista lauluäänen muodostuksessa ja saattaa se sellaiseksi kirjalliseksi kokonaisuudeksi, että sen lukemisesta voisivat hyötyä laulopedagogiikan opiskelijat tai muut ihmisäänestä kiinnostuneet henkilöt. Olen tehnyt havainnon, että tästä äänifysiologisesti merkittävästä aiheesta ei ole juurikaan tietoa suomen kielellä. Sen takia olen halunnut tehdä opinnäytetyön, joka tarjoaa yhdessä paikassa tämän tiedon kohtuullisen helposti ymmärrettävässä muodossa.</p> <p>Opinnäytetyötäni varten olen käynyt läpi suuren määrän äänihuulilihaksesta tietoa sisältäviä tutkimusartikkeleita, muita ääneen liittyviä artikkeleita ja lisäksi ihmisääntä käsitteleviä laajempia teoksia sekä muutaman äänenkäytön oppaan. Nämä lähdeteokset olen kokenut merkittäviksi ja keskeisiksi sen perusteella, että niihin on viitattu paljon muissa tutkimuksissa. Jokaisen uuden löytämäni artikkelin kohdalla olen etsinyt käsiini siinä käytetyt sellaiset lähteet, jotka ovat vaikuttaneet oman aiheeni kannalta hyödyllisiltä. Olen hakenut ja löytänyt myös paljon lähdemateriaalia Google Scholar -hakupalvelun avulla.</p> <p>Keräämästäni tiedosta kävi ilmi, että muuttamalla äänihuulilihaksen aktiivisuutta voidaan vaikuttaa äännön rekisteriin, sävelkorkeuteen, kynnyspaineeseen, taloudellisuuteen, tehokkuuteen ja äänen intensiteettiin. Äänihuulilihaksen aktiivisuuden vaikutus näihin perustuu muutoksiin äänihuulten muodossa, jäykkyydessä, jännityksessä ja elastisuudessa. Kun ne muuttuvat, muuttuu myös äänihuulien värähtely ja se, miten siihen siirtyy ilmavirrasta energiaa korvaamaan kudoksen aiheuttaman värähtelyn vaimenemisen. Paksummat äänihuulet ja niissä värähtelyn aikana esiintyvä pinta-aalto myötävaikuttavat siihen, että syntyy voimakkaampi äänen yläsävelsarja, joka aistitaan täyteläisempänä ja rintarekisterin omaisempana. Äänihuulilihaksen lihassäikeiden jatkuessa aina kurkunkansi-kannurustositeeseen ja kurkunkannen uloimpiin reunoihin voi mahdollisesti äänihuulilihaksen supistumisella olla vaikutus kurkunpään eteisontelon kaventumiseen. Tämä kaventuminen lisää äntöväylän reaktanssia, jolla on todettu olevan positiivisia vaikutuksia ääneen.</p>	
Avainsanat	kilpirusto-kannurustolihas, rekisterit, sävelkorkeus, äänihuulilihas, vocalis, äänihuuli, äänihuulivärähtely, äännön kynnyspaine.

Author	Tero Ikävalko
Title	Role of the Thyroarytenoid Muscle in Singing – Voice Physiology for Vocal Pedagogy Students
Number of pages	47 pages
Date	29 November 2011
Degree	Bachelor of Music
Degree Programme	Pop and Jazz Music
Specialisation Option	Pop and Jazz Music Educator
Instructor(s)	Jukka Väisänen, M.Mus. Susanna Mesiä, M.Mus.
<p>My thesis is a literature review. My objective was to find information concerning the role of the thyroarytenoid muscle in phonation and to present the essential information in the form that vocal pedagogy students or others interested in the human voice could benefit from it. I have noticed that there is very little information on the important topic of voice physiology in Finnish. My thesis offers the essential information in an easily digestible form.</p> <p>For my thesis I did extensive research on the thyroarytenoid muscle. I read research reports, other voice related articles in different journals, books about voice physiology and also some guidebooks on vocal production. These books and articles seemed to be very significant since there were multiple references to them in research papers. I also went through the list of references for each article and book I read to find more relevant information on the topic. I found many research articles with the help of the Google Scholar search engine.</p> <p>The information I gathered showed that the activity of the thyroarytenoid muscle has an effect on vocal register, pitch, phonation threshold pressure, vocal economy, vocal efficiency and voice intensity. This is due to the changes in shape, stiffness, stress and elasticity of the vocal folds. Alterations in these properties change the way that energy is transferred to the vibrating vocal fold tissue to make up the energy loss that is caused by the viscosity of the tissue. Thicker folds and the mucosal wave appearing in the vocal fold cover contribute to the existence of stronger spectrum of harmonic frequencies and sound that has more qualities typical of the chest register. The thyroarytenoid muscle may also have a role in narrowing the epilaryngeal vestibule. It is known that the narrowing of this small space just above the vocal folds can raise the positive reactance of the vocal tract, which would be beneficial for vocal production.</p>	
Keywords	phonation threshold pressure, pitch, register, thyroarytenoid muscle, vocal folds, vocal fold oscillation, vocalis

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Keskeisiä käsitteitä	3
3	Ääni-instrumentin rakenne	8
3.1	Kurkunpää	8
3.2	Kurkunpään lihaksia	9
3.3	Äänihuulet	11
4	Ääni-instrumentin toiminta	13
5	Äänihuulivärähtely	14
6	Äänihuulilihas	17
7	Äänihuulilihaksen rooli	18
7.1	Rekisterit	18
7.1.1	Äänihuulivärähtely eri rekistereissä	18
7.1.2	Neljä äänihuulivärähtelyn mallia	21
7.1.3	Tutkimuksia äänihuulilihaksen roolista rekisterin säätelyssä	22
7.2	Sävelkorkeus	24
7.2.1	Äänihuulet värähtelijänä ja sävelkorkeuteen vaikuttavat tekijät	24
7.2.2	Jännityksen ja jäykkyyden muuttaminen äänihuulissa	27
7.2.3	Tutkimuksia äänihuulilihaksen roolista sävelkorkeuden säätelyssä	29
7.3	Äännön kynnyspaine	37
7.4	Sekalaista	38
8	Pohdinta	40
	Lähteet	45

1 Johdanto

Opinnäytetyöni tarkoitus on valottaa äänihuulilihaksen eli kilpirusto-kannurustoliuksen (thyreoarytaenoidus) merkitystä lauluäänen muodostuksessa. Olen pyrkinyt keräämään tästä äänifysiologisesti merkittävästä aiheesta tietoa ja esittämään sen tässä opinnäytetyössäni kirjallisuuskatsauksen muodossa niin, että tämän opinnäytetyön lukemisesta voisivat hyötyä laulopedagogiikan opiskelijat tai muut ihmisäänen toiminnasta kiinnostuneet henkilöt. Koen aiheen merkittäväksi, sillä äänihuulilihas on yksi tärkeimmistä ihmisäänen muodostuksessa roolin omaavista lihaksista. Se vaikuttaa mm. niinkin keskeisiin asioihin kuin sävelkorkeus ja rekisteri. Tästä huolimatta kyseisestä lihaksesta on varsin suppeasti tietoa saatavilla suomen kielellä. Englannin kielellä aiheesta löytyy enemmän, mutta tällöinkin usein tieteellisen kirjoituksen muodossa. Aiheeseen liittyvän materiaalin puute näkyy mielestäni esimerkiksi siinä, että omien laulopedagogiikkaopintojeni ohella läpikäydyssä varsin laajasti äänifysiologiaa käsittelevässä materiaalissa ei käyty läpi juurikaan äänihuulilihaksen olemassaoloa tai merkitystä. Toivon, että tästä opinnäytetyöstä voisi olla hyötyä opetusmateriaalina esimerkiksi juuri laulopedagogikoulutuksessa.

Työskentelytapanani on ollut mm. etsiä käsiini aineistoa, joka on toiminut lähdemateriaalina ihmisääntä käsittelevissä merkittävässä julkaisuissa, joissa on käsitelty äänihuulilihasta. Tällaisia julkaisuja ovat olleet mm. erilaiset tutkimusartikkelit ja laajemmat ihmisääntä käsittelevät teokset, kuten vocologiassa oppikirjana käytetty teos: *Principles of Voiceproduction* (Titze 2000). Olen myös etsinyt aiheeseen liittyviä tutkimusartikkeleita internetin kautta Google Scholar - hakupalvelun avulla sekä selannut ihmis- ja lauluääneen liittyviä lehtiä, kuten *Journal of Voice* ja *Journal of singing*. Lisäksi olen pyytänyt ideoita hyvistä lähteistä Tampereen yliopiston vocologian professori Anne-Maria Laukkaselta. Tavoitteenani ja osaksi haasteenani on ollut kirjoittaa löytämäni tieto sellaiseen muotoon, että se olisi helposti ymmärrettävää myös henkilöille, jotka eivät ole välttämättä tottuneet lukemaan tieteellistä tekstiä. Ihmisääni on monimutkainen biofyysinen ilmiö, jonka yksinkertaisimmatkin, edes jossain määrin todenmukaiset mallit sisältävät sellaista matemaattista monimutkaisuutta, että moni oman äänensä kehittäjä keskittyy mieluummin muihin laulamiseen liittyviin osa-alueisiin.

Laulupedagogilla on oltava kuva oman instrumenttinsa toimintaperiaatteista. Koska jokaisen oppilaan instrumentti on hieman erilainen, täytyy lauluopettajalla olla oman soittimensa tuntemuksen lisäksi myös laajempi yleinen tuntemus lauluinstrumentin toiminnasta. Esimerkiksi jo nais- ja miesäänien välillä on tiettyjä eriävyyksiä, jotka laulupedagogin on hyvä tiedostaa. Jotta laulutekniikkaa voitaisiin harjoitella tai opettaa, pitäisi ensin ymmärtää, mitä äänessä oikeastaan harjoitetaan. Mihin harjoituksilla pyritään? Näihin kysymyksiin auttaa vastaamaan ihmisäänien toimintaperiaatteiden ymmärtäminen. Koska ihmisäänien mekanisme ei vielä toistaiseksi kukaan ole täysin pystynyt avaamaan, ei voi olettaa, että laulunopettajakaan siitä kaikkea tietäisi. Äänen käytön opetuksessa on silti aina hyödyksi tiettyjen perusperiaatteiden ymmärtäminen. Se on mielestäni lähtökohtana laulutekniikan opetukselle. Hyvä laulutekniikka puolestaan auttaa laulajaa välittämään sanomansa ja tunteensa kuulijalle. Myös useat musiikkiteokset saattavat asettaa äänenkäytölle sellaisia vaatimuksia, ettei niitä puutteellisen tekniikan takia pysty esittämään. Laulunopettajan kuuluu mielestäni pitää oma tietotaitonsa ajan tasalla ääneen liittyvän uuden tiedon suhteen.

Tiede tutkii koko ajan ihmisääntä ja lisää ymmärrystä sen suhteen. Toisinaan tutkimusmenetelmien kehittyessä ja ihmisten viisaannuttua uusi tieto kumoaa vanhan tiedon. Menee kuitenkin aina oma aikansa, ennen kuin uusi tieto popularisoituu ja päätyy äänenkäytön ja laulunopetuksen pariin. Viime vuosikymmeninä on tehty paljon uutta ja mielenkiintoista tutkimusta ja ihmisääntä kuvaavat teoriat ovat kehittyneet huomasti. Tästä on esimerkkinä mm. epälineaarisen äänilähde-ääntöväylä teorian (nonlinear source-filter theory) kehittyminen. Sen näkökulmana on, ettei ääntöväylä ainoastaan muokkaa äänihuulissa syntyvää ääntä vaan voi vaikuttaa myös itse äänihuulten värähtelyyn ja ääniraossa syntyvään ilmavirtapulssiin (Titze 2008, 2747 - 2748). Äänihuulien rakennetta ja niiden eri kerrosten ominaisuuksia on alettu ymmärtää paremmin kuten myös niiden värähtelyä ja siihen vaikuttavia mekanismeja. Tähän jälkimmäiseen kokonaisuuteen vaikuttaa oleellisesti myös äänihuulilihaksen olemassaolo.

Tämä opinnäytetyöni rakentuu niin, että aloitan sen käymällä läpi työn kannalta tärkeitä käsitteitä. Tämän jälkeen teen yleiskatsauksen ihmisen äänielimistön rakenteeseen

ja ihmisäänen toimintaperiaatteisiin. Nämä asiat käyn läpi, koska uskon niiden ymmärtämisen olevan lukijalle välttämätöntä, jotta hän pystyisi muodostamaan kuvan työn myöhemmässä vaiheessa vastaan tulevista ilmiöistä. Tämän jälkeen käyn läpi roolin, joka äänihuulilihaksella on lauluäänen muodostuksessa. Tässä osiossa esittelen mm. joitain tutkimuksia, joita aiheeseen liittyen on tehty. Lisäksi teen näistä tutkimuksista vertailua ja yhteenvetoa käyttäen hyödyksi myös teoreettista tietoa. Työn lopussa on vielä osio, joka erikseen sisältää yhteenvedon ja pohdintaa. Lukijalle haluan vielä todeta, että tätä opinnäytetyötä lukiessa on syytä muistaa, että en ole kirjoittanut sitä ihmisäänen tutkijana enkä vokologina tai vokologian opiskelijana vaan äänen tutkimuksesta kiinnostuneena laulunopiskelijana.

2 Keskeisiä käsitteitä

Ihmisääneen liittyen on paljon käsitteitä, joista käytetään poikkeavia nimityksiä. Toisaalta myös on tiettyjä sanoja, joiden merkitys vaihtelee käyttöyhteydestä ja sanan käyttäjästä riippuen. En ota sen enempää kantaa siihen, mikä nimitys on mistäkin asiasta oikea vaan tyydyn ainoastaan selittämään, mitä nimitystä tämän opinnäytetyön yhteydessä on käytetty. Suurimman osan käsitteistä selvennän, kun ne ensimmäistä kertaa tulevat tekstissä vastaan. Muutama tällainen vaatii kuitenkin laajempaa selvitystä ja koen parhaaksi, että käyn ne läpi tässä erillisessä osiossa.

Elektromyografia eli EMG. mittaa lihaksen sähköistä toimintaa, joka kasvaa lihaksen supistuessa. Tätä tutkimusmenetelmää on käytetty kurkunpään lihasten äännön aikaisen aktiivisuuden tutkimisessa varsin paljon aina 1960-luvun lopulta lähtien. Ennen tätä tutkiminen kyseisellä menetelmällä on ollut hankalaa, sillä käytössä olleet lihaksen aktiivisuutta mittaavat neulaelektrodit aiheuttivat tutkimuskohteille runsaasti kipua ja epämukavuuden tunnetta. Lisäksi ne eivät myöskään pystyneet seuraamaan äännössä tapahtuvia kurkunpään rajuja liikkeitä. (Hirano, Vennard & Ohala 1970, 1 – 3.) Nykyään kurkunpään lihasten aktiivisuuden tutkimiseen käytetäänkin niin sanottua kaksinapaista koukullista johtoelektrodia. Hiranon ym. (1970, 1 - 3) antamasta kyseisen tutkimusmetodin kuvauksesta selviää, että tämä elektrodi koostuu kahdesta kuparisesta johdosta, joiden päissä on lyhyet koukut. Ne asetetaan ihon läpi kohdelihakseen

neulalla, joka poistetaan, kun elektrodi on saatu paikoilleen. Kaksinapaisella koukullisella elektrodilla suoritettu EMG on koehenkilölle huomattavasti mukavampi kuin neulaelektrodeilla suoritettu. (Hirano ym. 1970.) EMG:n avulla saadaan muun muassa tietoa siitä, mitkä lihakset ovat aktiivisena tai muuttavat aktiivisuuttaan esimerkiksi sävelkorkeuden tai rekisterin muuttuessa.

Rekisteri on opinnäytetyöni sanaston ehkä hankalin käsite. Yritän antaa oman arvioni siitä, mitä siihen liittyen on tämän työn lähdetutkimuksissa tarkoitettu. Ihmisäänestä puhuttaessa rekisterin käsitettä käytetään usein kuvaamaan tiettyä sävelkorkeusalueita, jossa äänenväri kuulostaa samanlaiselta ja on oletettavasti tuotettu samanlaisella äänenmuodostusmekanismilla. Sillä viitataan myös usein äänihuulien erillisiin värähtelytapoihin. Äänihuulten värähtelytapa ja äänen väri eivät sinänsä ole täysin riippumattomia toisistaan, sillä tiedetään, että kun äänihuulet värähtelevät tiiviisti koko paksuudeltaan ylä- ja alapinnoistaan yhteen, syntyy voimakkaampi äänen yläsävelsarja. Tällöin äänihuulet värähtelevät myös ylä- ja alapinnoistaan erivaiheessa niin, että alapinta liikkuu yläpinnan edellä. Voimakkaan yläsävelsarjan omaava ääni aistitaan paksumpana ja täyteläisempänä ja siitä käytetään usein nimitystä rintarekisteri tai modaalirekisteri. Silloin, kun äänihuulet värähtelevät heikommin ja ainoastaan yläpinnoistaan yhteen, syntyy vaimeampi yläsävelsarja. Tällöin ääni aistitaan ohuempana ja värittömämpänä. (Laukkanen & Leino 2001, 44 – 49.) Siitä käytetään tällöin nimitystä päärekisteri tai ohennerekisteri riippuen, kuinka ohuesti äänihuulet osuvat yhteen tai kuinka ohuena ääni aistitaan.

Rekisteri-ilmiö ei ole kuitenkaan todellisuudessa näin yksinkertainen, koska siihen vaikuttaa myös merkittävästi äänihuulten ylä- ja alapuolinen ääniväylä. Ne vaikuttavat sekä äänihuulten tapaan värähdellä että siihen, mitkä osasävelet vahvistuvat ja kuinka paljon. Ääniväylää hyödyntäen on mahdollista saada aikaan varsin suuri yläsävelsarja ilman, että itse äänihuulet värähtelisivät kovin paksusti ja voimakkaasti yhteen (Titze 2009). On monia näkemyksiä siitä, kuinka monta rekisteriä on olemassa. Karkein, mutta ehkä selkein jako sisältää kaksi rekisteriä: rintarekisterin ja ohennerekisterin.

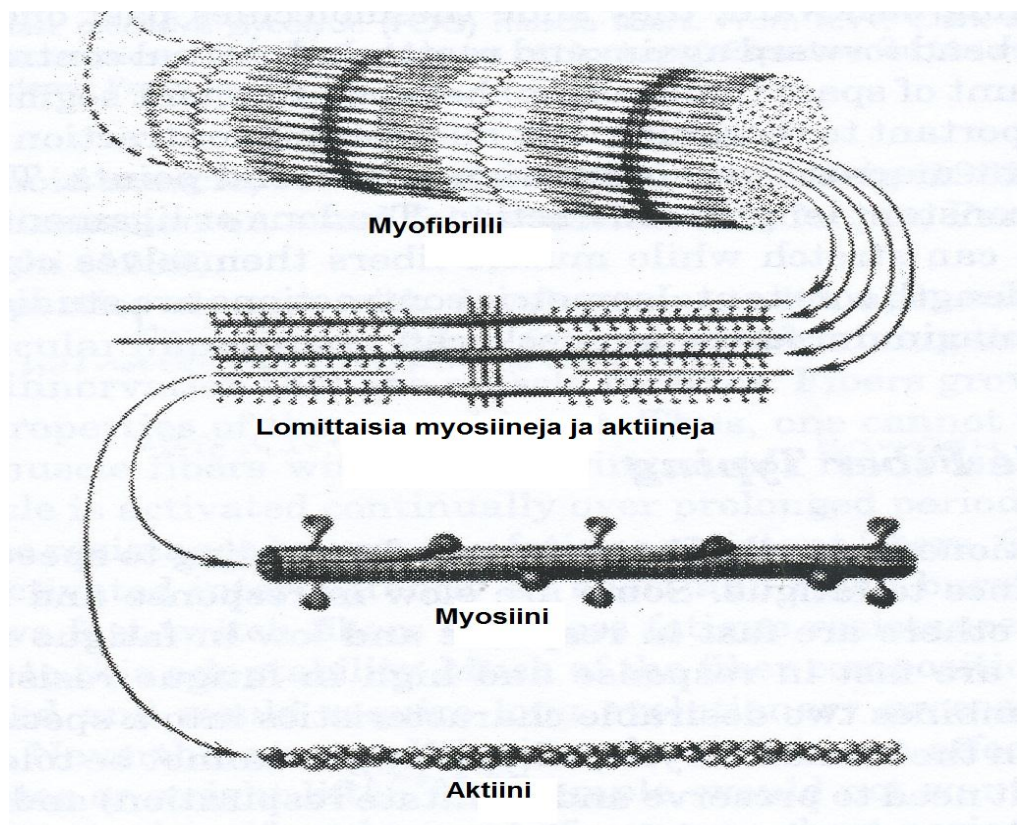
Opinnäytetyötäni varten tutkimissani artikkeleissa ei useinkaan ollut eriteltyä tarkemmin minkälaisesta äänenlaadusta puhuttiin käytettäessä termejä rintarekisteri (chest register), modaalirekisteri (modal register), päärekisteri (head register) ja ohennerekisteri (falsetto). Modaalirekisterin sijasta käytettiin myös nimitystä raskaampi rekisteri (Heavier register) ja ohenne- ja päärekisterin sijasta nimitystä kevyempi rekisteri (Lighter register). Oletan, että rinta- ja modaalirekisteri viittasivat teksteissä äänensävyyn, joka oli paksumman ja täyteläisemmän kuuloinen ja pää- ja ohennerekisteri äänensävyyn, joka oli ohuemman ja värittömämmän kuuloinen. Tätä tarkempia oletuksia on täysin mahdotonta tehdä ilman ääniesimerkkejä. Koen tämän erittelyn kuitenkin riittäväksi, koska sen perusteella lukija pystyy tekemään johtopäätöksen siitä, mihin suuntaan äänensävy muuttuu tietyn lihaksen aktivoituessa.

Kilpirusto-kannurustolihas (thyroarytaenoidus) on lihas, josta käytän työssäni nimitystä *äänihuulilihas*. Kilpirusto-kannurustolihas voidaan jakaa kahteen osaan: ulompaan ja sisempään kilpirusto-kannurustolihakseen (katso kuvio 2, s. 9). Suomenkielisessä kirjallisuudessa viitataan äänihuulilihas-nimityksellä toisissa lähteissä rengasrusto-kilpirustolihakseen kokonaisuutena, kun taas toisissa lähteissä sisempään äänihuulilihakseen. Englanninkielisessä kirjallisuudessa käytetään nimitystä *thyroarytenoid muscle*. Kahtiajaon tapauksessa sisempi osa on *thyrovocalis* tai pelkistetysti *vocalis* ja ulompi osa *thyromuscularis*. Artikkeleissa ja kirjallisuudessa, jota olen käynyt läpi on usein käytetty yksinkertaistetusti nimitystä *thyroarytenoid muscle* tai lyhennettä TA. Jos on haluttu tehdä selvästi ero ulomman ja sisemmän osan välille, on käytetty myös nimeä *vocalis*. Tässä opinnäytetyössä ei ole tarvetta sen tarkemmalle erittelylle, joten tyydyn käyttämään suomenkielistä nimeä äänihuulilihas kirjoitusasun yksinkertaistamiseksi.

Lihäs ja sen toiminta ei välttämättä ole itsestäänselvyys siitä huolimatta, että lihastyö on jatkuvasti läsnä kaikessa fyysisessä, mitä teemme. Poikkijuovaisella lihaksella, joka on tässä kiinnostuksen kohteena, on monikerroksinen rakenne. Lihas itsessään koostuu lihassyykimpuista, jotka rakentuvat taas pienemmistä yksittäisistä lihassyistä eli lihassoluista. Lihassolut jakaantuvat vielä pieniksi myofibrilleiksi, joissa on peräkkäisiä toiminnallisia yksiköitä (sarkomeeri). Näisää toiminnallisissa yksiköissä on kahdenlaista puikkomaisista proteiinia *aktiinia* ja *myosiinia* (katso kuvio 1.). Nämä sijoittuvat toistensa

kanssa osin lomittain siten, että sarkomeerin molemmissa päissä on aktiinit ja niiden välissä myosiini (katso kuvio 1.). Kun lihas saa supistumiskäskyn, myosiinien kyljissä olevat pienet ulokkeet tarttuvat kiinni aktiineihin ja taittumalla kohti sarkomeerin keskustaa vetävät aktiineja lähemmäksi toisiaan. Näin sarkomeerin ja samalla koko lihaksen pituus lyhenee. Seuraavaksi myosiinit irrottautuvat ja tekevät saman uudelleen ja lihas lyhenee vielä lisää. Tämänkaltaista lihastyötä, jossa lihaksen pituus muuttuu, kutsutaan konsentriseksi lihastyöksi. Isometriseksi kutsutaan lihastyötä, jossa lihaksen pituus ei muutu. Tällöin myosiini kiinnittyy aktiiniin, mutta ei siirry seuraavaan kiinnityskohtaa. (Erämetsä & Laakko 1998, 96 – 100.)

Riippuen lihaksen kiinnittymiskohdista, voidaan lihassupistumisella saada aikaan eri asioita. Usein luurankolihakset kulkevat jonkin nivelen yli ja kiinnittyvä sen molemmilta puolilta luihin. Tällöin niiden supistuminen saa aikaan nivelen liikkeen. Kaikki luurankolihakset eivät kuitenkaan kiinnity molemmista päistään luihin vaan esimerkiksi osa suun ja silmän ympäryksen lihaksista kiinnittyy toisesta päästään kudokseen. Näin ollen ne saavat supistuessaan aikaan kyseisen kudoksen liikkeen. (Erämetsä & Laakko 1998, 96 – 100.)



Kuvio 1. Lihassolun syvin rakenne. (Titze 2000, 45) (muokattu).

Jännitys, σ ilmaisee tiettyyn pinta-alayksikköön kohdistuvaa voimaa. Kun tietyn kokoista aluetta painetaan esimerkiksi kädellä, syntyy tietyn suuruinen jännitys. Tämänkaltaista jännitystä kutsutaan myös paineeksi. Jännitys lisääntyy myös silloin, kun kitaran kieltä kiristetään virityskoneiston avulla.

Jousivakio, k kertoo jousen jäykkyyden eli sen, kuinka voimakkaasti jousi pyrkii palautumaan tasapainoasemaansa. Mitä enemmän jousen tasapainoasemaa poikkeutetaan sitä suurempi voima sen poikkeuttamiseen tarvitaan. Jousivakio auttaa hahmottamaan opinnäytetyön myöhemmässä vaiheessa äänihuulikudoksen jäykkyyttä.

Massa, m ilmaisee materiaalin määrää. Usein sen ajatellaan virheellisesti merkitsevän kappaleen painoa. Kilogramma ainetta painaa enemmän massan kuin kuussa, mutta kummassakin sijainnissa sen massa pysyy samana. Arkikielessä painolla tarkoitetaan yleensä kappaleen massaa.

Elastisuus kuvaa sitä, kuinka välittömästi materiaali muuttaa muotoaan, kun siihen vaikutetaan voimalla ja sitä, kuinka täydellisesti se palaa takaisin alkuperäiseen muotoonsa, kun voima on poistettu.

Viskositeetti kuvastaa sitä, kuinka hitaasti aine muuttaa muotoaan, kun siihen kohdistetaan voima. Esimerkiksi neste, jolla on korkea viskositeetti, valuu hitaammin, kuin matalan viskositeetin omaava neste silloin, kun siihen kohdistuu painovoima (vertaa esim. siirappi ja vesi).

Pinta-aalto on äänihuulien pintakerroksessa värähtelyn aikana kulkeva aalto. Se kulkee pystysuunnassa alhaalta ylöspäin äänihuulen ääniraonpuoleista seinämää pitkin ja näkyy äänihuulissa värähtelyn aikana niiden ylä- ja alapintojen erivaiheisena värähtelynä. Äänihuulet aukeavat ensin alapinnoistaan ja sitten yläpinnoistaan. Sulkeutumisvaihe noudattaa samaa järjestystä eli äänihuulien alapinnat sulkevat ääniraon ensin ja yläpinnat seuraavat perässä. Äänihuulten alapinnat liikkuvat siis yläpintojen edellä.

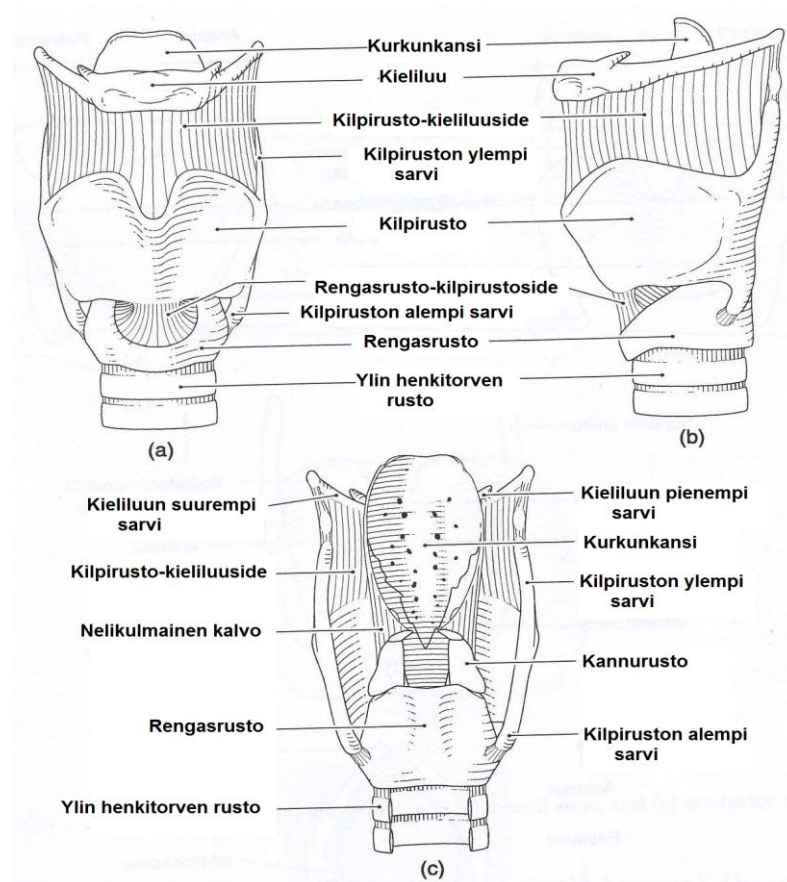
Ääni-instrumentti on ilmaisu, jota käytän välillä kuvaamaan sitä osaa ihmisestä, joka osallistuu lauluäänen tuottamiseen.

3 Ääni-instrumentin rakenne

Tämän opinnäytetyön lukijalle on hyödyllistä tuntee ihmisen ääntöelimistön suurpiirteinen rakenne. Pyrin käymään sen läpi tässä osiossa niin, että siitä jää äänenkäyttöön perehtymättömälle henkilölle jonkinlainen kokonaiskuva. Tarkempaa tietoa ääntöelimistöstä löytyy esimerkiksi äänenkäytön oppaista kuten *Auta Ääntäsi* (Aalto & Parvainen 1990). Keskityn pääasiallisesti kurkunpään ja vielä tarkemmin äänihuuliin niiden ollessa merkityksellisimmät työni aiheen kannalta. Ääntöelimeen kuuluu näiden lisäksi kuitenkin myös hengityselimistö sekä ääniväylä ja artikulaatioelimistö. Ääniväylällä tarkoitetaan äänihuulten sekä ylä- että alapuolista putkistoa ja ääntöväylällä äänihuulten yläpuolista putkistoa. Ääntöväylä ulottuu siis aina äänihuulista huuliin ja sieraimiin ja käsittää kurkun, suun ja nenän ontelot. (Laukkanen & Leino 2001, 61)

3.1 Kurkunpää

Kurkunpää on henkitorven yläpäässä sijaitseva rustorakennelma (katso kuvio 2). Se kiinnittyy henkitorveen rengasruston välityksellä. Rengasrustoon kiinnittyy puolestaan kurkunpään kaksi muuta äänihuulten pituussäätelyyn oleellisesti osallistuvaa rustoa: kilpirusto (cartilago thyreoidea) ja kannurustot (arytenoidea). Kannurustot sijaitsevat rengasruston yläpinnalla sen takaosassa niskan puolella ja toimivat äänihuulten taaempana kiinnityskohtana. Kannurustojen ja rengasrustojen välinen liitos mahdollistaa sen, että kannurustot voivat moninaisilla eri liikeradoilla sulkea tai avata äänirakoa eli äänihuulten välistä aukkoa. Kurkunpään suurin rusto on kilpirusto, joka muodostuu kahdesta ikään kuin toisissaan kiinni olevasta levystä, jotka taittuvat kaulanpuoleisesta liitospaikastaan taaksepäin kohti niskaa noin 90 - 120 asteen kulmassa ympäröiden kurkunpäästä edestä ja sivuilta. Äänihuulet kiinnittyvät etuosastaan sen sisäpuolelle levyjen liitospaikkaan. Kilpiruston taaimmaisissa reunoissa on molemmilla puolilla sekä ylös- että alaspäin suuntautuvat sarvimaiset ulokkeet. Alapuoliset sarvet kiinnittyvät rengasruston sivuille liitoksella, joka toimii nivelenä mahdollistaen sen, että joko kilpirusto voi laskea



Kuvio 2. Kurkunpään rustot edestä kuvattuna (a), sivulta kuvattuna (b) ja takaa kuvattuna (c). (Titze 2000, 5) (muokattu).

etureunastaan alaspäin tai rengasrusto nousta etureunastaan ylöspäin. Näin tapahtuessa kyseisten rustojen etureunat lähenevät toisiaan ja kilpiruston etuosassa sijaitseva äänihuulten etummainen liitoskohta loittonee kannurustoissa olevasta äänihuulten taemmasta liitoskohdasta ja äänihuulet venyvät. (Titze 2000, 5 - 12.)

3.2 Kurkunpään lihaksia

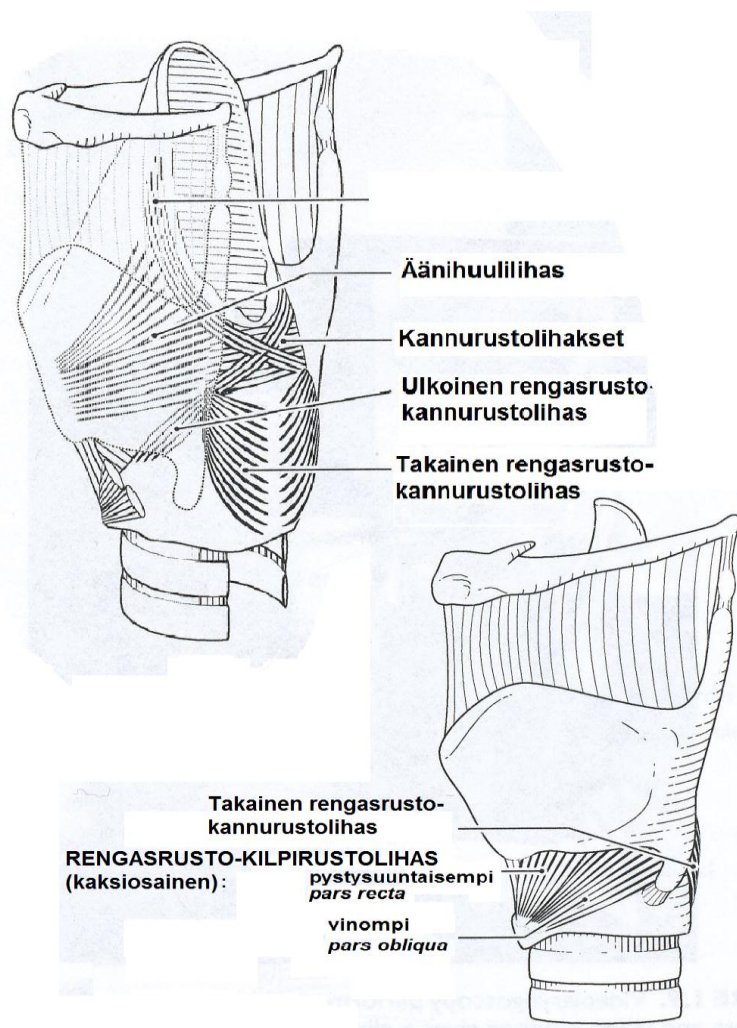
Kurkunpäässä on myös runsaasti äännön kannalta tärkeitä lihaksia. Niitä ovat mm. äänihuulten pituuteen ja ääniraon sulkemiseen ja avaamiseen vaikuttavat lihakset. Näiden mainitsemieni lihasten lisäksi ääntöön vaikuttavat myös useat muut lihakset, mutta niiden toiminnan ja sijainnin tunteminen ei ole tässä yhteydessä niin oleellista.

Äänihuulilihas (thyreoarytaenoidus) sijaitsee äänihuulten syvimmissä kerroksessa ja sen lihassäikeet kulkevat suurpiirteisesti äänihuulten ulkoreunan kanssa samansuuntaisesti (Hirano 1977). Äänihuulilihaksen katsotaan usein olevan kaksiosainen. Sen sisempi ääniraon puoleinen osa kiinnittyy kannurustojen äänihuulilisäkkeeseen, kun taas ulompi osa kannurustojen lihaslisäkkeeseen. Erkaannuttuaan näistä kiinnityskohdista on lihaksen kahtiajako vaikeampi hahmottaa, sillä sen ulompi ja sisempi osa sulautuvat yhteen ilman, että niiden välillä olisi minkäänlaista selkeää kalvoa (Sanders, Rai, Han & Biller 1998). Etupäästään äänihuulilihas kiinnittyy kilpiruston levyjen liitoskohtaan hie-man aataminomenaksi kutsutun ulkoneman alapuolelle (Titze 2000, 11). Tämän lihaksen toimintaa käyn tarkemmin läpi työni myöhemmässä vaiheessa.

Rengasrusto-kilpirustolihas (cricothyreoideus) on myös kaksiosainen lihas. Se kiinnittyy nimensä mukaisesti toisesta päästään rengasruston kaaren ulkopintaan ja toisesta päästään kilpirustoon (katso kuvio 3.). Supistuessaan se vetää kilpiruston ja rengasruston etureunoja lähemmäksi toisiaan saaden aikaan sen, että näissä molemmissa rustoissa kiinni olevat äänihuulet venyvät ja ohenevat. Rengasrusto-kilpirustolihas on merkittävässä roolissa äännön sävelkorkeuden säätelyssä. Kun äänihuulet venyvät, kasvaa niiden passiivinen jännitys, mikä saa aikaan sävelkorkeuden nousun. (Aalto & Parviainen 1990, 118.) Rengasrusto-kilpirustolihas on äänihuulilihaksen vastavaikuttaja eli agonisti.

Takainen rengasrusto-kannurustolihas (cricoarytaenoideus posterior) on äänirakoa avaava lihas. Se kiinnittyy toisesta päästään rengasruston takaosaan ja toisesta päästään kannuruston lihaslisäkkeeseen (katso kuvio 3.). Sen supistuminen keinuttaa kannurustoa taaksepäin ja samalla kääntää lihaslisäkettä ulospäin niin, että äänihuulet aukeavat. (Titze 2000, 13)

Ulkoinen rengasrusto-kannurustolihas (cricoarytaenoideus lateralis) on äänirakoa sulkeva lihas. Se saa alkunsa rengasruston kaaren uloimpien reunojen yläosasta ja liittyy samalla puolella olevan kannuruston lihaslisäkkeeseen (katso kuvio 3.). Sen supistuminen vetää kannurustoja yhteen ja eteenpäin sulkien näin äänirakoa. (Titze 2000, 13.)



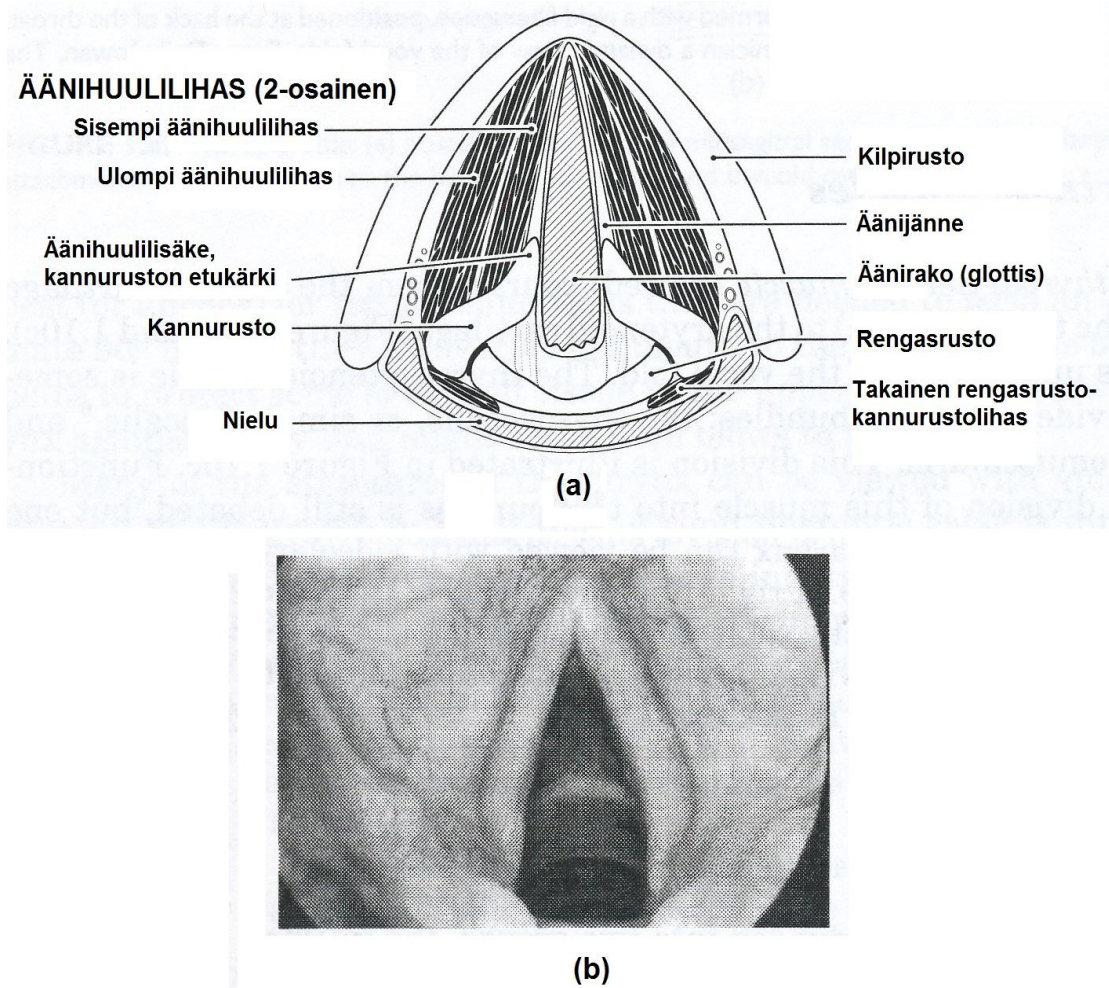
Kuvio 3. Kurkunpään lihaksia. (Titze 2000, 12) (muokattu).

Kannurustolihakset (arytaenoideus) kiinnittyvät kannurustojen välille. Ne auttavat ulkoista rengasrusto-kannurustolihasta ääniraon sulkemisessa tiivistäen lähinnä ääniraon kannurustojen puoleista taaempaa osaa (katso kuvio 3.). (Titze 2000, 12.)

3.3 Äänihuulet

Äänihuulet ovat henkitorven yläpäässä sijaitsevat poimut, jotka ovat toisesta päästään kiinni kannurustoissa ja toisesta päästään kiinni kilpirustossa (katso kuvio 4.). Ne koostuvat löysästä ja kimmoisasta limakalvosta ja lihaskudoksesta. Äänihuulten primääriteh-

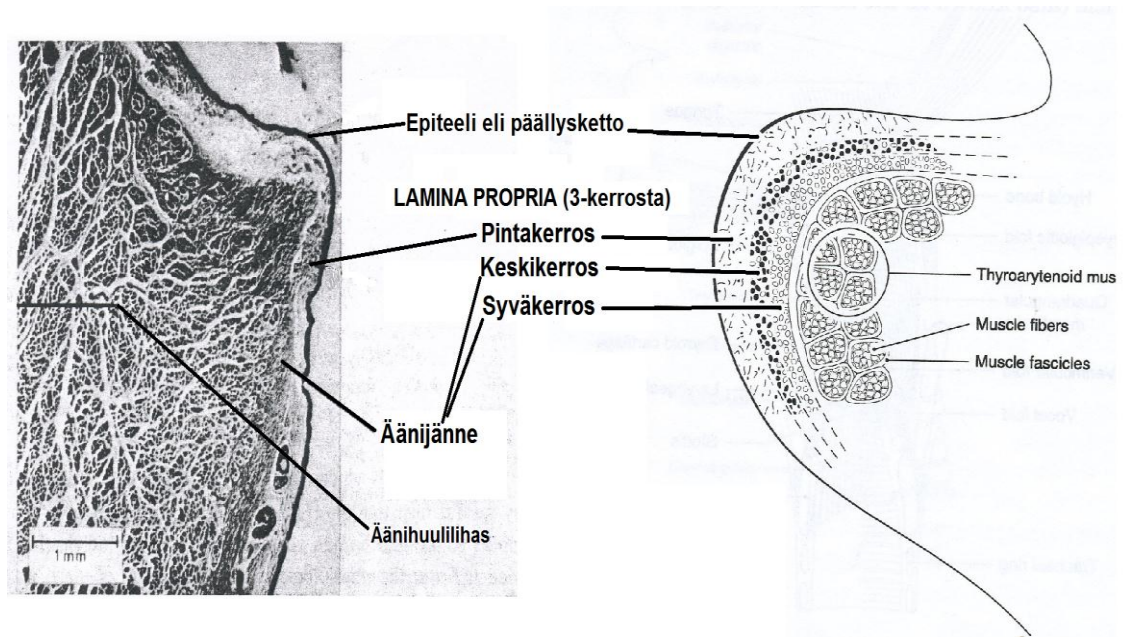
tävä on estää haitallisten aineiden päätymistä henkitorveen. Aikuisen miehen äänihuulet ovat pituudeltaan noin 1,6 cm ja aikuisen naisen noin 1 cm. Niiden paksuus puheäänien sävelkorkeudella äännettäessä on miehillä noin 7 - 8 mm ja naisilla noin 5 - 6 mm. (Laukkanen & Leino 2001, 33.)



Kuvio 4. (a): Äänihuulet ja niitä ympäröiviä rustoja, lihaksi ym. (b): valokuva äänihuulista (Titze 2000, 9 - 12). (muokattu).

Äänihuulet rakentuvat viidestä eri kerroksesta (katso kuvio 5.). Päällimmäisenä on epi-teeli eli päällysketto. Sen alapuolella oleva limakalvo (lamina propria) rakentuu kolmesta kerroksesta: pinta-, keski- ja syväkerros. Kaikkein syvimmän kerroksen muodostaa äänihuulilihas. Karkeammin jaoteltuna kerroksia voidaan ajatella olevan myös kaksi tai kolme. Kudosopillisesta näkökulmasta katsottuna äänihuuli koostuu limakalvosta ja li-

haksesta. Tällöin limakalvo käsittää neljä ylintä kerrosta ja lihas syvemmän kerroksen. Kudosten mekaanisten ominaisuuksien perusteella äänihuulten voidaan katsoa koostuvan limakalvosta, äänijänteestä ja lihaksesta. Tällöin limakalvo käsittää epiteelin lamina



Kuvio 5. Äänihuulten kerrokset (vasemman puoleinen kuva: Hirano 1974, 90, oikean puoleinen kuva: Titze 2000, 16)

proprian pintakerroksen, äänijänne laminaproprian keski- ja syväkerroksen ja lihaskerros äänihuulilihaksen. (Hirano 1977, 20 - 21)

4 Ääni-instrumentin toiminta

Lauluääni muistuttaa toiminnaltaan eniten puhallinsoittimia. Molemmissa soittimissa äänen voimanlähteenä toimii keuhkoista alkunsa saava ilmavirta. Laukkasen & Leinon (2001, 24) mukaan uloshengityksessä hengitysilhaksisto supistaa rintakehän tilavuutta, jolloin keuhkojen paine kasvaa. Keuhkojen ja ilmakehän paine-ero pyrkii tasoittumaan, mikä saa aikaan sen, että ilma alkaa virrata keuhkoista ulos. (Laukkanen & Leino 2001, 24.) Kun liikkuva ilmassa kohtaa värähtelijän, joka puhallinsoittimien tapauksessa on huulet tai lehdykkä ja ihmisäänen kohdalla äänihuulet, siirtyy ilmassa energiaa värähtelijään saattaen sen liiketilaan. Värähtelijän edestakainen ja äänihuulten kohdalla myös vuoroin avautuvat ja sulkeutuva liike tuottaa muutoksia ilmanpaineessa. Nämä

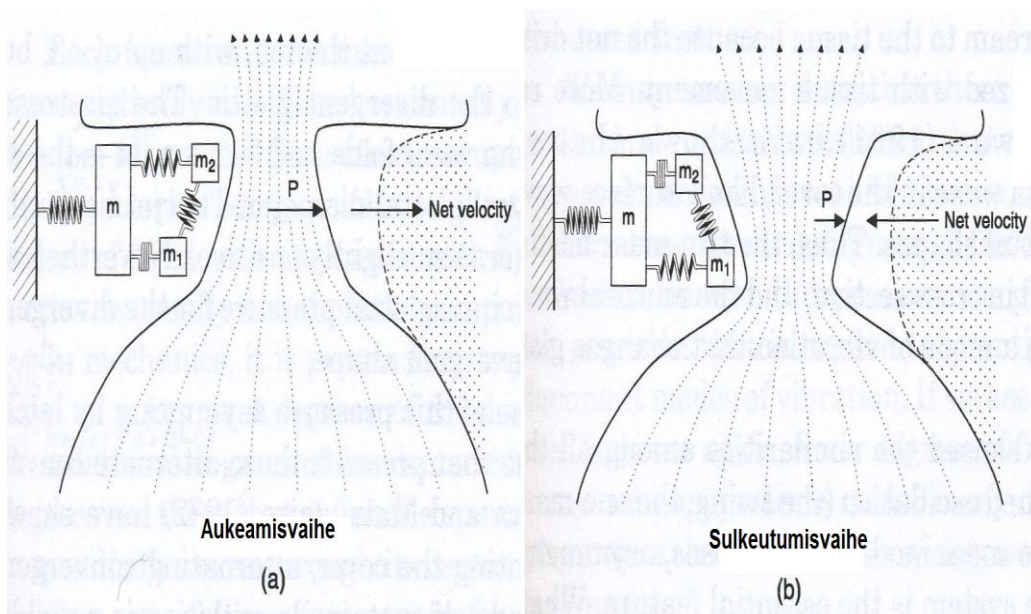
paineen muutokset etenevät ilmassa putkeen, jota ihmisäänestä puhuttaessa kutsutaan ääntöväyläksi. Ääntöväylä heijastaa osan paineen vaihtelusta takaisin äänilähteelle ja vaikuttaa näin ollen myös suoraan siellä syntyvän ilmavirtapulssiin muotoon (Titze 2009). Ääntöväylä toimii lisäksi suodattimena, joka korostaa ja vaimentaa äänilähteessä syntyneestä äänestä tiettyjä osasäveliä antaen suuaukosta poistuvalla äänelle sen lopullisen sävynsä. Laulaja tai puhuja pystyy muokkaamaan ääntöväylän akustisia ominaisuuksia muuttamalla sen muotoa esimerkiksi kielen ja pehmeän kitalaen avulla tai muuttamalla sen pituutta esimerkiksi laskemalla tai nostamalla kurkunpäättä. Tähän suodatusilmiöön perustuu esimerkiksi se, että ihmiskorva kuulee eri vokaalit erilaisina. Tällöin artikulaatioelimestö muuttaa ääntöväylän muotoa niin, että suusta ulos tulevan äänen yläsävelsarja on sellainen, että korva aistii sen puhujan tarkoittamana äänteenä (esimerkiksi tiettynä vokaalina).

5 Äänihuulivärähtely

Laukkasen & Leinon (2001, 35) mukaan äänihuulivärähtelyn periaate on yksinkertaistettuna seuraavanlainen. Värähtely saa alkunsa, kun toisiaan lähentyneet äänihuulet erkanevat niiden alapuolisen ilmanpaineen kasvaessa riittävän suureksi. Ensin erkanevat äänihuulten alapinnat ja sitten yläpinnat. Aukinaiseen äänirakoon syntyy ilmavirtaus, joka saa aikaan äänihuulet takaisin yhteen vetävän imuefektin. Imuefekti perustuu siihen, että fysiikan lakien mukaan kapeikkoon virtaavan kaasun nopeus kasvaa, mistä seuraa, että sen paine alenee. Myös äänihuulten kimmoisuus suuntaa äänihuulten liikkeen takaisin kohti ääniraon keskiviivaa. Äänihuulten palattua takaisin lähtöasentoon on syntynyt yksi äänihuulivärähdys ja seuraava on valmis alkamaan. (Laukkanen & Leino 2001, 35.)

Jottei äänihuulivärähtely päästyään alulle vaimentuisi ja loppuisi, pitäisi siihen tulla koko ajan lisää energiaa korvaamaan kitkan ja kudoksen liikettä vaimentavien ominaisuuksien aiheuttama energiahäviö. Näin tapahtuu, kun äänihuulten välissä on niiden avautuessa suurempi paine kuin niiden sulkeutuessa. Aiemmin mainittu kapeikossa virtaavan ilmavirran aiheuttama äänihuulet yhteen vetävä imuefekti on klassisen äänihuulivärähtelyteorian kuvaus tällaisesta tilanteesta. Tämä ilmiö on Bernoullin lain periaat-

teen mukainen. Titzen (2000, 87-89) mukaan kuitenkin kyseisen ilmiön roolia äänihuulivärähtelyn ylläpitäjänä on perinteisesti liioiteltu. Hänen mukaansa Bernoullin laki vaikuttaa äänihuulivärähtelyyn, mutta ei yksin tarjoa äänihuulivärähtelyn ylläpysymiselle vaadittavia olosuhteita, joissa ääniraon paine on avautumisvaiheessa suurempi kuin sulkeutumisvaiheessa. Bernoullin ilmiötä pohdittaessa on huomioitava, että vaikka kyseinen ilmiö edesauttaakin äänihuulien sulkeutumisvaihetta, sama ilmiö vallitsee myös avautumisvaiheen aikana ja aiheuttaa tällöin aukeamista jarruttavan voiman ja näin ollen käytännössä kumoaa sulkeutumisvaiheessa syntyvän värähtelyä edesauttavan vaikutuksen (Titze 1988, 1537). Äänihuulivärähtelyä ylläpitävät olosuhteet voi tarjota ääniraon läpivirtaava ilmavirta joko silloin, kun äänihuulten ylä- ja alapinnat liikkuvat eri tahdissa tai, kun äänihuulten ylä- tai alapuolinen putki on vuorovaikutuksessa ilmavirran kanssa (Titze 2000, 87 - 89).

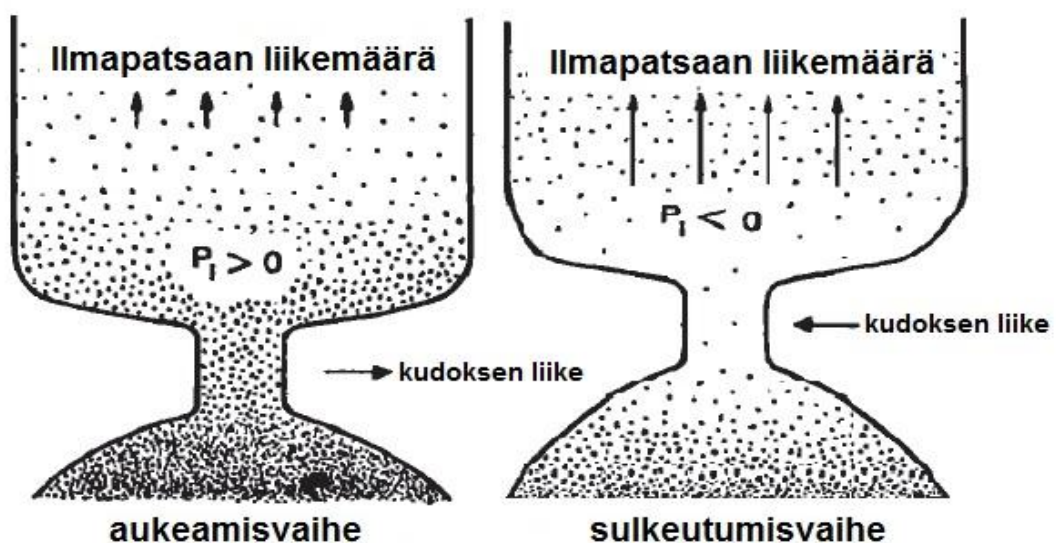


Kuvio 6. äänihuulten aukeamisvaihe (a) ja sulkeutumisvaihe (b). (Titze 2000)

Näistä ensimmäinen vaihtoehto tapahtuu ainakin silloin, kun äänihuulet värähtelevät koko paksuudeltaan, kuten rintarekisterissä äännettäessä. Tällöin äänihuulten oma muoto ja liike saavat aikaan sen, että aukeamisvaiheen aikana ääniraossa vallitsee suurempi paine kuin sulkeutumisvaiheessa. Äänihuulet avautuvat ensin alapinnoistaan (kuvio 6a.), minkä seurauksena äänihuulten seinämiin kohdistuu ilmavirtauksen ansios-

ta suurempi paine ja äänihuulia avaava voima. Äänihuulten sulkeutuessa (kuvio 6b.) ääniraon päinvastainen muoto aiheuttaa äänihuulten välisen suhteellisen paineen alenemisen lähelle nollaa. Suhteellinen paine ei kuitenkaan todennäköisesti mene negatiiviseksi, sillä tämänkaltainen ääniraon muoto aiheuttaa myös bernoullin lain vaikutuksen pienenemisen. Tällöin ilmavirta irtoaa usein äänihuulen seinästä ja muodostaa leveydeltään äänirakoa kapeamman suihkun. Paine on kuitenkin pienempi kuin avautumisvaiheessa ja tämä on riittävä olosuhde äänihuulivärähtelyn ylläpysymiselle. (Titze 2000, 102 - 104.)

Äänihuulten yläpuolinen akustinen putki eli ääntöväylä voi myös ylläpitää äänihuulivärähtelyä. Kuviossa 7. on esitetty miten äänihuulten yläpuolinen paine (p_i) kasvaa, kun avautuvasta ääniraosta virtaava ilma törmää ääntöväylän paikoillaan olevaan ilmapatsaseen. Tämä tapahtuu sen takia, että äänihuulten yläpuolinen ilmapatsas ei lähde välittömästi ylöspäin vaan ääniraosta virtaavan ilman täytyy työntää se liikkeelle. Äänihuulten yläpuolisen paineen nousu aiheuttaa myös paineen nousun äänihuulten välissä, mikä auttaa työntämään äänihuulia erilleen. Äänihuulten sulkeutumisvaiheessa taas glottiksen ilmavirta heikkenee eikä pysy ylöspäin jatkavan ääntöväylän ilmapatsan mukana. Tästä syystä äänihuulten yläpuolinen paine (P_i) pienenee. Ääntöväylässä ylöspäin jatkava ilmapatsas ikään kuin vetää äänihuulet perässään kiinni. (Titze 2000, 99 - 102.)



Kuvio 7. Äänihuulten yläpuolisen ilmapatsan vaikutus äänihuulivärähtelyyn. Mitä tiheämmin pisteet sijoittuvat sitä suurempi paine. (Titze 1988) (muokattu)

Nämä kaksi edellä kuvattua äänihuulivärähtelyä edesauttavaa mekanismia voivat toimia ja useimmiten toimivatkin samanaikaisesti. Äänihuulten yläpuolinen ilmamassa ja äänihuulten oma liike saavat aikaan sen, että energiaa siirtyy äänihuulivärähtelyyn korvaamaan kitkan ja muiden värähtelyä vaimentavien tekijöiden aiheuttaman energiahäviön. Tähän äänihuulten ylä- ja alapintojen erivaiheiseen värähtelyyn vaikuttaa myös äänihuulilihaksen aktiivisuus tavalla, joka kuvataan tämän työn myöhemmässä vaiheessa.

6 Äänihuulilihas

Parillinen äänihuulilihas eli kilpirusto-kannurustolihas (thyroaretaenoidus) on äänihuulten syvin rakenne. Perinteisesti äänihuulilihaksen on katsottu jakautuvan kahteen osaan: lähempänä äänirakoa sijaitsevaan sisempään äänihuulilihakseen (thyreoarytaenoidus vocalis) ja ääniraosta kauempana sijaitsevaan ulompaan äänihuulilihakseen (thyreoarytaenoidus externus, thyromuscularis). Sisempi äänihuulilihas kiinnittyy niskan puolelta kannuruston äänihuulilisäkkeeseen ja ulompi äänihuulilihas kannuruston lihassäkkeeseen. Yhden hypoteesin mukaan ulompaa äänihuulilihasta voidaan käyttää mm. äänihuulten nopeaan lyhentämiseen, kun taas sisempää äänihuulilihasta äänihuulten ääniraon puoleisten reunimmaisten kerrosten jäykkyyden hienosäätöön (Titze 2000, 11).

Äänihuulilihaksen jakoa kahteen osaan on pidetty myös kyseenalaisena, sillä lihaksen erkaannuttua kannurustosta, sisempi- ja ulompi osa sulautuvat toisiinsa ilman, että niiden välillä olisi minkäänlaista selkeää kalvoa. Äänihuulilihaksen lihassolurakenteessa on kuitenkin havaittu sen kaltaista jakautumista, että ulompi osa sisältää suhteessa enemmän nopeasti supistuvia lihassoluja, kun taas sisempi osa enemmän hitaasti supistuvia lihassoluja. Näin ollen lihassolujen perusteella lihaksesta voidaan erottaa nopeasti supistuva ulompi osa ja hitaasti supistuva sisempi osa. (Sanders, Rai, Han & Biller 1998, 826 – 827.) Tämän lisäksi Sanders ym. (1998, 827) ovat havainneet, että sisempi äänihuulilihas on myös teoriassa mahdollista jakaa vielä ylempään ja alempaan osaan. Heidän tutkimustensa mukaan sisemmän äänihuulilihaksen yläpuoli sisältää useita lihassolukimppuja, joissa lihassolut ovat harvasti pakkautuneena. Alapuolinen osa sisältää puolestaan yhden suuren lihassolukimppun, jossa lihassolut ovat tiheästi

pakkautuneena. Tämänkaltainen rakenne viittaa siihen, että lihaksen eri osilla saattaisi olla erilaiset toiminnalliset tehtävät. Niitä ja niiden eri kohtia voi olla mahdollista aktivoita ja kontrolloida erikseen. (Sanders ym. 1998, 829.) Sanders ym. (1998, 830 - 831) ovat esittäneet arvion, että tällä jaolla saattaa olla yhteys myös siihen, että äänihuulten värähdellessä niiden ylä- ja alapinnat liikkuvat eri vaiheissa.

7 Äänihuulilihaksen rooli

Kun pohditaan äänihuulilihaksen roolia äänen muodostuksessa, on ensin ymmärrettävä, mitä äänihuulilihaksen aktivoitumisesta seuraa. Teoriassa se voi muuttaa värähtelevien äänihuulien biomekaniikkaa neljällä tavalla: sen säikeet voivat lyhentää äänihuulta, muuttaa sen muotoa, muuttaa sen pituus suunnassa olevaa jännitystä lihaksen eri kohdissa ja mahdollisesti liittyä limakalvoon ja muuttaa suoraan sen jännitystä. (Sanders ym. 1998, 826.) Ensin tarkastelemme sen merkitystä rekistereihin liittyen. Rekisterin merkitys käsitteenä on selvennetty opinnäytetyöni luvussa 2 (Keskeisiä käsitteitä).

7.1 Rekisterit

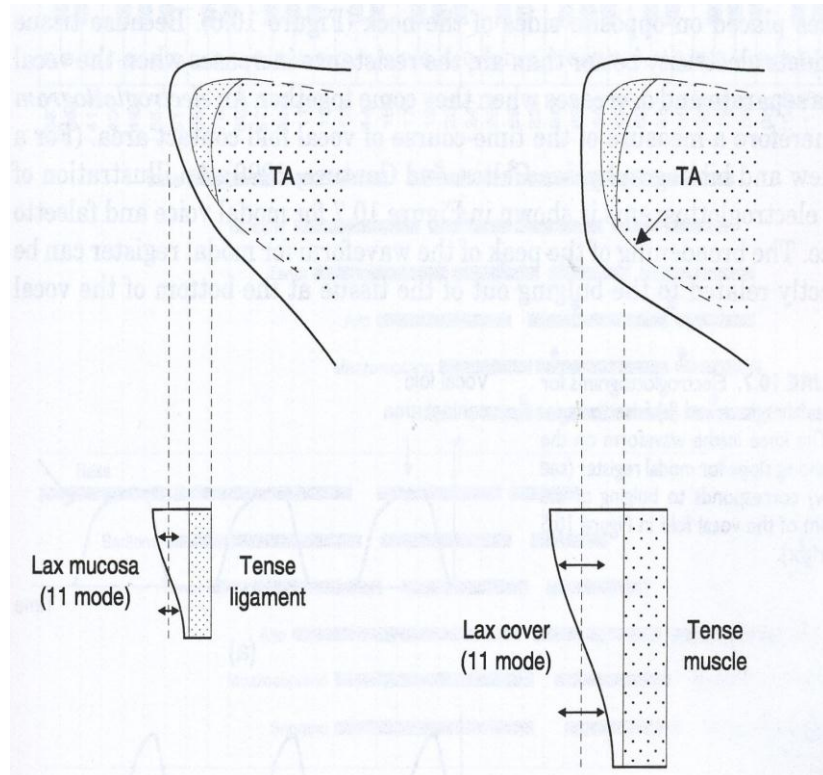
Siihen, missä rekisterissä korva aistii äänen olevan, vaikuttaa se, miten äänihuulet värähtelevät yhteen sekä ääntöväylän vaikutus ääneen. Tässä keskitymme ainoastaan siihen, mikä on äänihuulitason toiminnan vaikutus kyseiseen ilmiöön. Tarkempana kiinnostuksen kohteena on äänihuulilihaksen vaikutus äänihuulivärähtelyyn ja näin ollen rekisteriin.

7.1.1 Äänihuulivärähtely eri rekistereissä

Äänihuulilihaksen vaikutus rekisteriin on kytköksissä äänihuulilihaksen aktivoitumisesta aiheutuvaan äänihuulten muodonmuutokseen ja limakalvon löystymiseen. Aiemmasta lihaksen toimintaa esittelevästä kappaleesta muistamme, että lihassupistus voi olla konsentrisen, jolloin lihaksen pituus muuttuu, tai isometrinen, jolloin lihas supistuu, mutta sen pituus pysyy samana. Isometrisen lihassupistuksen aikana voivat lihassolu-

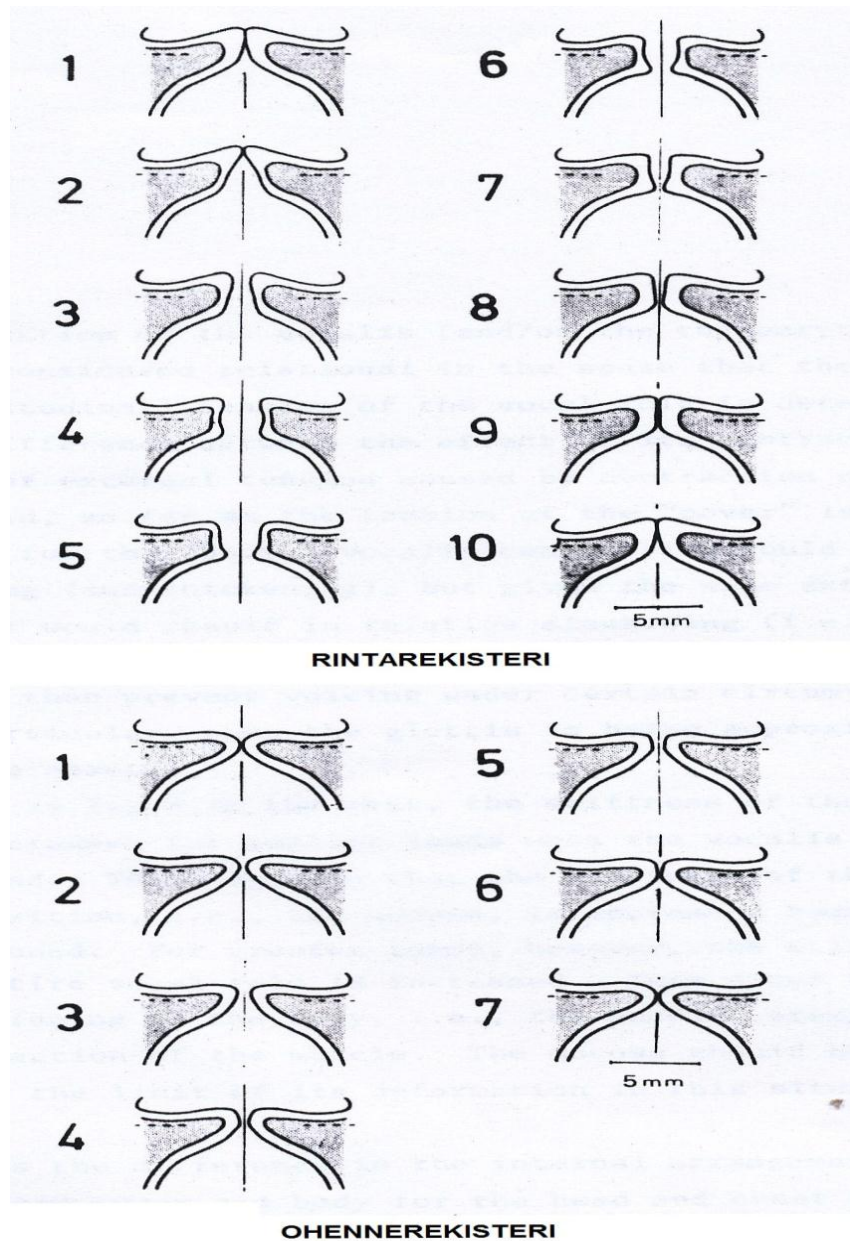
jen itsensä supistuessa sidekudokset ja jänteet lihaksen päissä venyä niin, ettei lihaksen kokonaispituus käytännössä muutu (Titze 2000, 46). Myös äänihuulilihas voi aktivoitua muuttamatta juurikaan äänihuulten pituutta. Näin ollen lihaksen pituus pysyy samana, mutta sen jäykkyys ja paksuus voivat muuttua.

Tutkimus on osoittanut, että äänihuulilihaksen aktivoituminen lähentää äänihuulten alareunoja lähemmäksi toisiaan ja ääniraon keskustaa. Näin syntyy paksumpi ja syvämpi värähtelevä rakenne (katso kuvio 8.). Lihaksen jäykistyessä sekä äänihuulien pintakerros että äänijänne löystyvät, mikä tukee ja laajentaa äänihuulten ylemmän ja alemman reunan erivaiheista värähtelyä (alapinta liikkuu edellä, ns. pinta-aalto). Äänihuulilihas säätelee värähtelevän äänihuulen kokonaisjännitystä. Tämä on tyypillinen asetus rintarekisterissä tapahtuvalle äännölle. Ohennerekisterissä taas äänihuulilihas on passiivisempi ja äänihuulten jännitystä säätelee äänihuulten pituusvenytys. Pituusvenytyksen tuoman jännityksen kohdistuessa äänijänteeseen voi äänihuulten limakalvo pysyä edelleen suhteellisen löysänä. Näin ollen pienentynyt pinta-aalto voi edelleen säilyä limakalvossa. (Titze 2000, 291.)



Kuvio 8. Äänihuulen poikkileikkaus ohennerekisterissä (vasen) ja rintarekisterissä (oikea) (Titze 2000, 291).

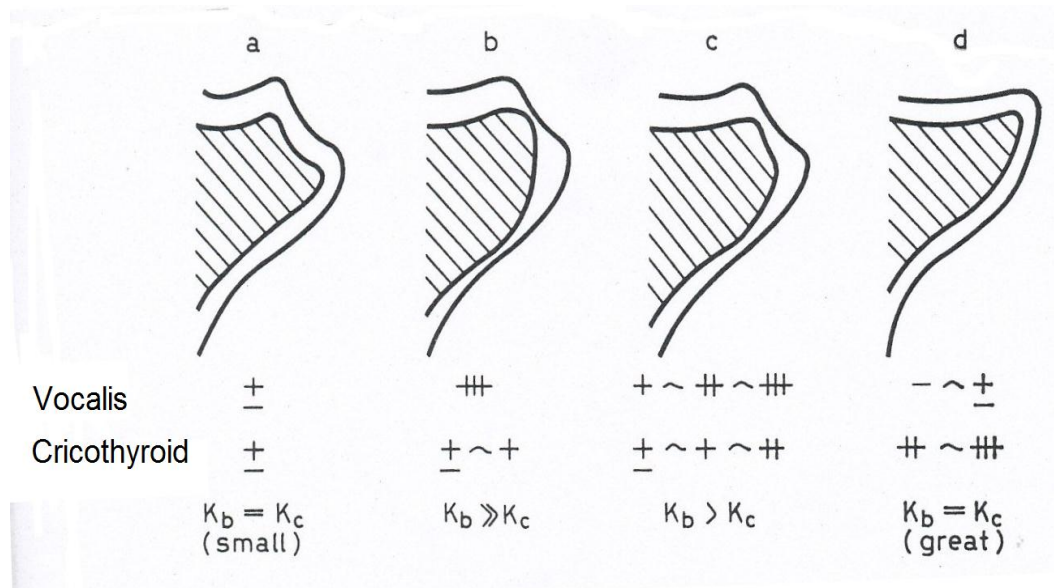
Äänihuulilihaksen rooli rekisterin säätelyssä perustuu siis äänihuulen muodon ja elastisuuden muutoksille, jotka kyseisen lihaksen aktiivisuus saa aikaan. Äänihuulivärähtely muuttaa toisin sanoen luonnettaan, mikä aiheuttaa muutoksen syntyvän äänen yläsävelsarjassa. Korva aistii voimakkaamman yläsävelsarjan omaavan äänen täyteläisempänä ja paksumpänä. Äänihuulivärähtelyn vaiheet rintarekisterissä ja ohennerekisterissä on esitelty kuviossa 9. Hiranon (1977, 25 - 26) mukaan.



Kuvio 9. Äänihuulivärähtely rintarekisterissä (ylempi) ja ohennerekisterissä (alempi) (Hirano 1977, 26).

7.1.2 Neljä äänihuulivärähtelyn mallia

Äänihuulilihaksen ja rengasrusto-kilpirustolihaksen erilaisilla aktivoimisstrategioilla voidaan tuottaa erilaisia äänihuulivärähtelyn variaatioita. Hirano (1974, 91 - 92) on esittänyt neljä erilaista äänihuulivärähtelyn mallia (katso kuvio 10). Tietoperustan näille malleille hän on kerännyt tutkimuksistaan, joissa on mm. tutkittu erilaisilla kokeilla äänihuulikudosten ominaisuuksia ja analysoitu videolle kuvatusta äänihuulivärähtelystä osa kerrallaan äänihuulien eri kohtien liikkeitä. Mallit on yksinkertaistettu sellaisiksi, että niissä ei ole huomioitu äänijänteen olemassaoloa vaan ne perustuvat ainoastaan pintakerroksen ja ytimen (lihas) läsnäololle. Neljän eri mallin erilaiset muodot johtuvat äänihuulilihaksen ja sen vastavaikuttajan rengasrusto-kilpirustolihaksen aktiivisuuksien erilaisista yhdistelmistä. Lihasten aktiivisuudet vaikuttavat muodon lisäksi myös eri kerrosten elastisuuteen ja jännitykseen.



Kuvio 10. Neljä tyypillistä äänihuulten asetusta, jotka määrittelevät äänihuulilihaksen (Vocalis) ja rengasrusto-kilpirustolihaksen (Cricothyroid) aktiivisuuksien erilaiset yhdistelmät. K_b kuvastaa lihaksen jännitystä ja K_c pinnan jännitystä. Plus ja miinus merkit kuvastavat lihassupistuksen määrää. (Hirano 1974, 91)

Kuvioissa 10a - c on esitetty kolme rintarekisteriasetusta, joille on tyypillistä pintakerroksen aaltomainen liike (ylä- ja alareunan erivaiheinen värähtely). Kuvio 10d kuvastaa puolestaan äänihuulen muotoa ohennerekisterissä. Kolmen rintarekisteriasetuksen erot

ovat siinä, että kuvion 10a mallissa sekä äänihuulilihaksen että rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuus on varsin alhainen. Hiranon (1974, 92) mukaan näin tapahtuu matalilla taajuuksilla kevyen äännön aikana. Värähtely ulottuu myös lihakseen asti. Jännitys on molemmissa kerroksissa alhainen ja ne osallistuvat molemmat miltein yhtä paljon värähtelyyn. Kuviossa 10b äänihuulilihas on paljon aktiivisempi, kuin rengasrusto-kilpirustolihas. Näin tapahtuu keskikorkeilla äänenkorkeuksilla voimakkaassa ja raskaassa äännössä. Tällöin limakalvo on löysä, lihas jäykkä ja aaltomainen liike ulottuu ainoastaan limakalvoon. Värähtely ulottuu myös pääasiallisesti vain pintakerrokseen. Kuvio 10c mallintaa äänihuulen muotoa sellaisessa tilanteessa, jossa äänihuulilihaksen aktiivisuus on hieman dominoivampi, kuin rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuus. Hiranon (1974) mukaan tämä kuvioiden 10a ja 10b välimuoto on oletettavasti yleisin tilanne rintarekisterissä tapahtuvissa äännöissä. Värähtely ja pinnan aaltomainen liike ulottuvat sekä pinta- että lihaskerrokseen, mutta selvemmin pintakerrokseen. Viimeisessä kuviossa 10d on tilanne, jossa rengasrusto-kilpirustolihas on huomattavasti aktiivisempi, kuin äänihuulilihas, joka on passiivinen tai ainoastaan hieman aktiivinen. Molemmat äänihuulikerrokset ovat venyneinä ja erittäin jännittyneinä. Värähtelyn laajuus on pienempi, kuin rintarekisterissä eikä aaltomaista liikettä pinnassa juurikaan ole. (Hirano 1974, 92.)

7.1.3 Tutkimuksia äänihuulilihaksen roolista rekisterin säätelyssä

Tässä osiossa esittelen muutaman esimerkin siitä, miten on tutkittu lihasten aktiivisuuksien vaikutuksia äänihuulten muotoon ja rekisteriin. Yumoto, Kadota, Kurokawa & Sasaki (1995) stimuloivat sähköisesti kuolleiden koira-eläimien äänihuulilihaksia ja rengasrusto-kilpirustoliaksia jäädyttäen kurkunpäästä välittömästi tämän toimenpiteen perään nestemäisen typen avulla. Jäädytetyistä kurkunpäistä oli mahdollista tutkia äänihuulen poikkileikkauksesta lihassupistumisen aiheuttamia muodonmuutoksia eri kerroksissa. Myös heidän tuloksensa osoittivat, että äänihuulet, joissa äänihuulilihasta stimuloitiin, paksunivat ääniraon puoleiselta reunaltaan. Stimuloinnin johdosta reunan muoto muuttui neliskanttisemmaksi (vertaa kuvio 8, Titze 2000). Äänihuulilihaksen vastavaikeuttajan rengasrusto-kannurustoliuksen stimulointi aiheutti puolestaan vastakkaisen reaktion, jossa äänihuulten ääniraon puoleinen reuna oheni ja terävöityi äänihuulten venyessä. (Yumoto ym. 1995.)

Hirano, Vennard & Ohala (1970) tutkivat kurkunpään neljän eri lihaksen aktiivisuuksia eri laulurekistereissä. Eri rekisterit olivat rintarekisteri (chest), keskirekisteri (mid), päärekisteri (head) ja ohenne (falsetto). Heidän koehenkilöinä toimi neljä ammattilaulajaa (oletettavasti klassista laulajaa). Kaksi heistä oli äänialaltaan sopraanoja, yksi tenori ja yksi basso. Lihasten aktiivisuudet mitattiin elektromyografian avulla kahden erityyppisen äännön aikana. Ensimmäin he vertasivat samalla äänenkorkeudella eri rekistereissä tuotettujen äänien lihasaktiivisuuksien eroja. Seuraavaksi he tutkivat, miten lihasaktiivisuudet muuttuivat rekisterin muuttuessa sinä aikana, kun koehenkilö lauloi asteikkoja, arpeggioita tai lauluja. Kuviossa 11. on esitelty ensimmäisen kokeen tulokset. Koehenkilöistä J.R. on äänialaltaan sopraano, M.M. tenori ja W.V. basso. Neljäs koehenkilö ei pystynyt muuttamaan rekisteriä merkittävästi tutkituilla sävelkorkeuksilla. Koehenkilöt saivat itse valita äänen voimakkuuden sillä perusteella, mikä heistä tuntui luonnolliselta. Kuviossa 11. näkyy, missä rekisterissä ääni on tuotettu ja kuinka aktiivisena tutkitut lihakset ovat äännön aikana olleet. Lihakset, joiden aktiivisuudet mitattiin, olivat: rengasrusto-kilpirustolihas (cricothyroid, äänihuulia venyttävä), ulompi rengasrustokannurustolihas (lateral crico-arytenoid, äänirakoa sulkeva), äänihuulilihas (vocalis) ja kannurustolihas (interarytenoid, äänirakoa avaava). Lihaskäytävää kuvaavista numeroista 1 - 3 pienin numero kuvastaa suurinta aktiivisuutta. Taulukosta voidaan nähdä, että rekisterin muuttuessa raskaammaksi lisääntyy aina äänihuulilihasaktiivisuus.

Subject	Pitch	Register	Cricothyroid	Lateral crico-arytenoid	Vocalis	Interarytenoid
2. J.R.	G ₄	head	2	3	3	
		mid	3	2	2	
		chest	1	1	1	
3. M.M.	C ₄	falsetto	2	3	3	
		head	2	2	2	
		chest	2	1	1	
4. W.V.	G ₃	falsetto	3	3	3	
		head	1.5	2	1.5	
		chest	1.5	1	1.5	
	C ₄	falsetto	2.5	2.5	3	3
		head	1	1	2	2
		chest	2.5	2.5	1	1

Kuvio 11: Hiranon (1970) mittaamat lihasten aktiivisuudet eri rekistereissä (C₄ = keski C) (Hirano 1970, 2).

Osiossa, jossa Hirano ym. (1970) tutkivat lihasaktiivisuuksien muutosta rekisterin muuttuessa laulamisen aikana, olivat tulokset äänihuulilihaksen suhteen myös samankaltaiset kuin ensimmäisessä osiossa. Rekisterin muuttuessa kevyemmästä raskaampaan lisääntyi äänihuulilihaksen aktiivisuus ja puolestaan rekisterin muuttuessa raskaammasta kevyempään tapahtui päinvastainen. (Hirano 1970)

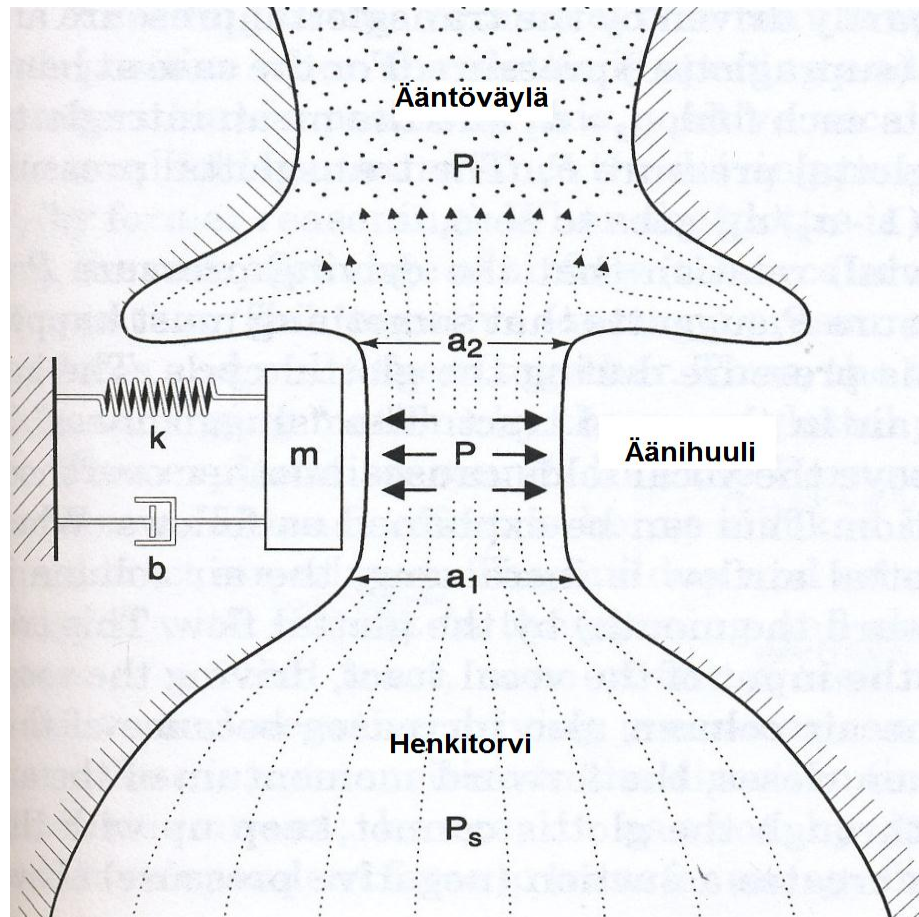
7.2 Sävelkorkeus

Yleisesti on ymmärretty, että sävelkorkeutta ihmisäänessä säätelee pääasiallisesti rengasrusto-kilpirustolihas, toissijaisesti kilpirusto-kannurustolihas (äänihuulilihas) ja kolmanneksi subglottaalinen paine (Titze, Jiaqi & Drucker 1988, 314). Jotta äänihuulilihaksen rooli sävelkorkeuden säätelyssä olisi helpompi ymmärtää, on syytä ensin tarkastella hieman sävelkorkeuteen vaikuttavia tekijöitä. Mikä aiheuttaa värähtelijän tajuuden muutoksen? Miksi kitaran kieltä kiristettäessä sen soiva sävelkorkeus nousee? Miksi sama tapahtuu, kun värähtelevän kielen pituutta lyhennetään painamalla sormella joltain nauhaväliltä?

7.2.1 Äänihuulet värähtelijänä ja sävelkorkeuteen vaikuttavat tekijät

Myös äänihuulet toimivat värähtelijänä osaksi samalla periaatteella, kuin kitaran kieli. Äänihuulet koostuvat kuitenkin useasta eri kerroksesta, joilla jokaisella on omanlaisensa värähtelyyn vaikuttavat mekaaniset ominaisuutensa (Hirano, Kakita 1985). Tämän lisäksi värähtelevän kielen ollessa kiinni molemmista päistään, äänihuulet ovat vielä lisäksi kiinni toiselta sivultaan (kaso kuvio 4, s. 12). Vaakatasossa siis vain yksi sivu on vapaa liikkumaan, mistä johtuen äänihuulien ominaisuuksia värähtelijänä ei voi verrata ainoastaan värähtelevän kielen ominaisuuksiin. (Titze 2011.) Kun äänirako aukeaa ja äänihuulet liikkuvat poispäin toisistaan kohti kolmatta kiinnityskohtaa, äänihuuli painuu kasaan. Koska äänihuuli on kimmoisaa kudosta, se pyrkii palautumaan alkuperäiseen muotoonsa. Syntyy siis takaisin äänirakoa päin suuntautuva voima ja liike. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että äänihuuli käyttäytyy myös osaksi kuin sivuttaissuunnassa oleva jousi. (Titze 2000, 93-94, 212-215.) Äänihuulten värähtelyä kuvataankin usein malleilla, joissa on käytetty mallin tarkoituksesta riippuen eriävää määrää massoja, jotka ovat kiinni äänihuulien kimmoisuutta kuvastavissa jousissa (katso kuvio 12). Kudok-

sen liikettä tai värähtelyä vaimentavat ominaisuudet on myös usein kuvattu malleissa. Kuviossa 12. niitä mallintaa eräänlainen mäntä, joka liikkuu suuren viskositeetin omaavaa nestettä sisältävässä sylinterissä. Massalla m tarkoitetaan värähtelevän kudoksen määrää.



Kuvio 12. Yhden massan äänihuulimalli. Jousi (k) kuvastaa kudoksen elastisia ominaisuuksia, mäntä (b) kudoksen viskositeettia ja massa m värähtelevän kudoksen määrää. (Titze 2000, 99)

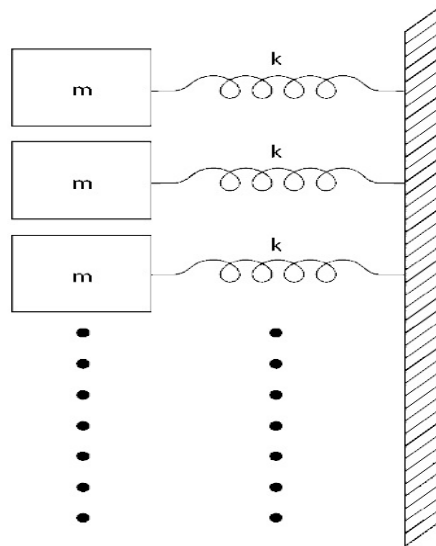
Koska äänihuuli käyttäytyy värähtelijänä osaksi, kuin värähtelevä kieli ja osaksi kuin vaakasuuntainen jousi, voi Titzen (2000, 213) mukaan äänihuulivärähtelyyn vaikuttavat tekijät arvioida värähtelevän kielen ja jousen perustaajuuksien yhtälöistä (katso kuvio 13.). Värähtelevän kielen perustaajuuden yhtälössä L on värähtelevän kielen pituus, σ on kielen jännitys ja ρ on tiheys. Värähtelevän jousen perustaajuuden yhtälössä k on

jousivakio, joka kuvastaa jousen jäykkyyttä ja m on massa¹. Näissä yhtälöissä jännitys σ ja jousivakio (jäykkyys) k ovat toisiinsa verrattavissa olevat suureet, sillä molemmat kuvaavat värähtelevän kudoksen elastisia muodonmuutoksen takaisin tasapainotilaan palauttavia ominaisuuksia. (Titze 2000, 212-214)

$$F_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad F_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}},$$

Kuvio 13. Värähtelevän kielen perustaajuuden yhtälö (vasemmalla) ja värähtelevän jousen perustaajuuden yhtälö (oikealla). (Titze 2011)

Näitä yhtälöitä tarkastelemalla voidaan päätellä, että äänihuulivärähtelyn taajuuteen eli sävelkorkeuteen vaikuttaa ensisijaisesti äänihuulten jännitys, jäykkyys ja pituus. Pituuden lisääntyminen vaikuttaa laskevasti ja jännityksen ja jäykkyyden lisääntyminen nostavasti. Äänihuulten massan merkitystä sävelkorkeuteen nähden pohdittaessa mennään usein harhaan siinä, että paksumpien äänihuulten ajatellaan tuottavan matalampi



Kuvio 14. Värähtelevän äänihuulikudoksen massan m ja jäykkyyden k lisääntyminen (Titze 2011).

¹ Massa kuvastaa materiaalin määrää, ei painoa (Titze 2000, 26).

ääni. Tämä ei kuitenkaan suoraan pidä paikkaansa, sillä äänihuulten paksuuntuessa myös äänihuulikudoksen jäykkyys värähtelevän kimmoisan kudoksen määrän muodossa lisääntyy. Tämän voi helposti todeta kuviosta 14., jossa jokaisen uuden massan myötä tulee myös lisää yksi uusi jousi. (Titze 2011)

Äänihuuliryhmän kohdalla tilanne on taas toinen, sillä sen aiheuttama lisääntynyt äänihuulikudos ei ole kytköksissä päätyseinään. Jos tämä ajatus sovelletaan kuvion 14. malliin, niin silloin uusi massa kiinnittyy vanhan massan kylkeen eikä päätyseinään jousen välityksellä. Tässä tapauksessa massan lisääntyminen laskisi sävelkorkeutta. (Titze 2011.)

7.2.2 Jännityksen ja jäykkyyden muuttaminen äänihuulissa

Miten sitten äänihuulien jäykkyyttä ja jännitystä voidaan muuttaa? Pääasiallisesti kahdella tavalla. Äänihuulien kaikkien kerroksien jännitystä voidaan lisätä venyttämällä äänihuulia. Fysiologisesti se tapahtuu lisäämällä rengasrusto-kilpirustolihasen aktiivisuutta. Silloin kilpiruston ja rengasruston etuosat lähenevät toisiaan, kilpiruston etuosa loittonee rengasruston takaosasta ja näissä kahdessa kiinni olevat äänihuulet venyvät. Myös subglottaalisen eli äänihuulten alapuolisen paineen kasvamisen aikaansaama sävelkorkeuden nousu perustuu siihen, että kudoksesta venyy enemmän suuremman paineen aiheuttaessa suuremman äänihuulivärähtelyn amplitudin. (Titze 2000, 214 & 231 - 232.)

Äänihuulia venyttävästä mekanismista tekee mielenkiintoisen se, että värähtelijän pituuden lisääntyminen sinänsä laskee sävelkorkeutta. Tämä ristiriita aiheuttaakin tiettyjä mielenkiintoisia vaatimuksia äänihuulikudokselle. Jotta sävelkorkeus kasvaisi äänihuulten venymisen ansiosta, pitäisi kudoksen jännityksen kasvun olla suhteessa huomattavasti paljon suurempi kuin äänihuulten pituuden kasvun. Jos äänihuulten pituus kasvaa suhteessa 2 : 1 täytyy kudoksen jännityksen kasvaa suhteessa 4 : 1, jotta sävelkorkeus pysyisi edes samana. Tämä voidaan todeta siitä, että yhtälössä 1. jännitys on neliöjuuren alla ja samoin yhtälössä 2. jäykkyys on neliöjuuren alla. Jos sävelkorkeus nousisi neljällä oktaavilla äänihuulten pituuden kaksinkertaistuessa, pitäisi äänihuulikudoksen

jännityksen nousta 1024 kertaiseksi. (Titze 2006.) Tämän pituuden aiheuttaman sävelkorkeuden laskun voi konkreettisesti todeta venyttämällä kuminauhaa samalla näppäilijän sitä kuin kitaran kieltä. Jos kuminauhan jännitys ei kasva riittävästi venytykseen nähden, voi jossain kohtaa venytyksen aikana sävelkorkeus jopa laskea.

Toinen vaihtoehto äänihuulien jännityksen nostamiselle on aktivoida niiden sisällä oleva lihas. Hiranon (1974, 89) mukaan äänihuulilihaksen aktivoituminen lisää tämän sisäistä jäykkyyttä. Jotta sävelkorkeus nousisi tämän johdosta, pitäisi riittävän suuren määrän lihaskudosta osallistua värähtelyyn niin, että äänihuulien värähtelevän osan kokonaisjäykkyys nousisi (Titze, Luschei & Hirano 1989, 213). Titzen ym. (1989, 214) mukaan näin tapahtuu todennäköisemmin voimakkaassa äänössä, kun äänihuulivärähtelyn amplitudi on suuri tai silloin, kun rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuus ja pinnan jäykkyys on suhteellisen alhainen. Tällainen tilanne on useimmiten silloin, kun ääntä tuotetaan rintarekisterissä. Silloin äänihuulet ovat paksummat, värähtelevät ylä- ja alareunoistaan eri vaiheessa, niiden pintakerros on löysempanä ja värähtely ulottuu lihasseen asti todennäköisemmin kuin ohennerekisterissä (katso luvusta: *7.1.1 Äänihuulivärähtely eri rekistereissä*).

Sanders ym. 1998 ovat arvioineet, että äänihuulilihaksen lihaskuidut liittyessään äänihuulten limakalvoon, saattavat myös mahdollisesti pystyä suoraan muuttamaan limakalvon jännitystä. Tämä vaatisi heidän mukaansa sen, että äänihuulilihasesta on mahdollista aktivoida erikseen sen eri osia. (Sanders ym. 1998.) Hiranon mukaan äänijänne on tiiviisti kytköksissä äänihuulilihasseen sulautuen useista kohdista sen kudokseen (Hirano 1974). Äänijänne on ihmisäänihuulissa merkittävä värähtelyyn osallistuva komponentti. Se kestää venytyksessä syntyviä suuriakin jännityksiä ja on korkeilla sävelkorkeuksilla äänihuulten jännitystä kannattava osa (Titze 2006a). Näin ollen voisi kuvitella, että äänihuulilihasella saattaisi olla mahdollista muuttaa myös suoraan äänijänteen jännitystä.

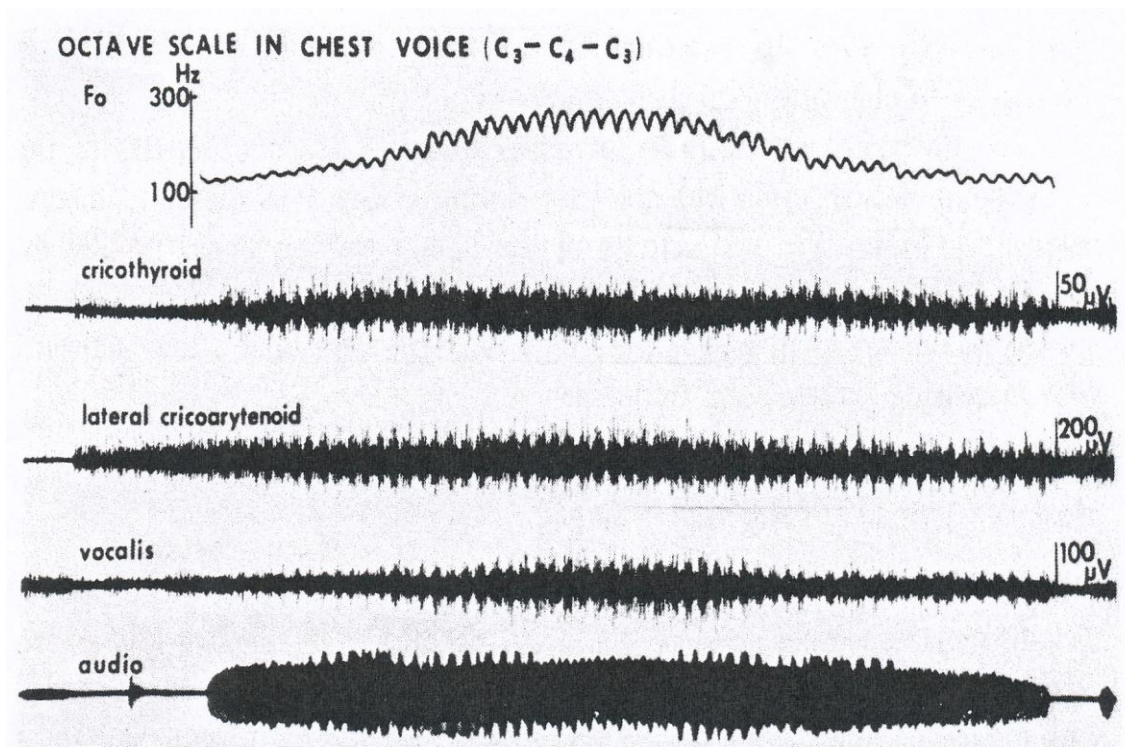
7.2.3 Tutkimuksia äänihuulilihaksen roolista sävelkorkeuden säätelyssä

Tässä osiossa käyn läpi joitakin tutkimuksia, joissa on selvitetty äänihuulilihaksen merkitystä sävelkorkeuden muuntelussa. Niin kuin aiemmin todettua, voi muuttamalla äänihuulilihaksen aktiivisuutta vaikuttaa äänihuulten sisimmän kerroksen jäykkyyteen. Tämä jäykkyyden kasvaminen vaikuttaa sävelkorkeuteen, jos lihas osallistuu värähtelyyn. Toisaalta, jos vain äänihuulten pinta värähtelee, voi äänihuulilihaksen aktiivisuus lyhentäessään äänihuulia laskea pinnan jännitystä ja näin ollen laskea sävelkorkeutta. Äänihuulilihaksen vaikutus on siis erittäin riippuvainen siitä, kuinka suuri osa äänihuulesta osallistuu värähtelyyn. (Titze 2000, 214-215.) Äänihuulilihaksen aktiivisuuden vaikutusta sävelkorkeuteen on tutkittu mm. mittaamalla lihaksen aktiivisuutta äännön aikana elektromyografialla (EMG), tutkimalla lihaksen sähköisen stimuloinnin vaikutusta sävelkorkeuteen ja mallintamalla äänihuulivärähtelyä matemaattisesti.

Hirano, Vennart & Ohala (1969) tutkivat elektromyografian avulla kurkunpään kolmen lihaksen aktiivisuuden muuttumista erilaisten ääntötehtävien aikana. Koehenkilöinä heillä oli yksi naispuolinen ammattilaulaja ja viisi miespuolista henkilöä, joista kaksi oli ammattilaulajia. Tutkittavat lihakset olivat äänihuulilihas, rengasrusto-kilpirustolihas ja äänirakoa sulkeva ulompi rengasrusto-kannurustolihas. Lauluääneen liittyviä äänen tuottotehtäviä oli mm. asteikkojen laulaminen sekä crescendon tuottaminen muuttomattomalla äänenkorkeudella. Kuviossa 15. on esimerkki tuloksista, jotka saatiin, kun basson äänialan omaava laulaja lauloi yhden oktaavin asteikon rintarekisterissä ensin alhaalta ylös äänestä C3 (n. 131 Hz) ääneen C4 (n. 262 Hz) ja sen jälkeen ylhäältä alas äänestä C4 ääneen C3. Kuviossa 15. näkyy ylimpänä sävelkorkeuden muutos ja sen alapuolella kolmen lihaksen (rengasrusto-kilpirustolihas (cricothyroid), ulomman rengasrusto-kannurustolihas (lateral cricoarytenoid) ja äänihuulilihaksen (vocalis)) aktiivisuuksien muutokset. Niiden alapuolella alimpana näkyy vielä äänen voimakkuuden muutos. Tuloksista voidaan nähdä, että tällä koehenkilöllä sävelkorkeuden noustessa rintarekisterissä lisääntyi kaikkien lihasten aktiivisuus. (Hirano ym. 1969.)

Muita tuloksia, joita nämä tutkijat saivat, oli että ohennerekisterissä äänihuulilihaksen aktiivisuus oli huomattavasti alhaisempi kuin rintarekisterissä. Sävelkorkeuden noustessa ohennerekisterissä nousi myös äänihuulilihaksen aktiivisuus, kun taas rengasrusto-

kilpirustolihasen aktiivisuus varsinkin korkeimmilla taajuuksilla ohennerekisterissä ei juuri muuttunut. Äänenvoimakkuuden (intensity) kasvamisen yhteydessä rintarekisterissä tapahtuvia lihasaktiivisuuksien muutoksia oli äänihuulilihasen ja ulomman rengasrusto-kannurustolihasen aktiivisuuksien lisääntyminen. Rengasrusto-kilpirustolihasen aktiivisuus pysyi samana tai laski hieman. Korkeammilla äänenkorkeuksilla äänenvoimakkuuden kasvaessa lisääntyi myös aina äänihuulilihasen aktiivisuus, kun taas rengasrusto-kilpirustolihasen aktiivisuus laski. Näin tapahtui sekä rintarekisterissä että ohennerekisterissä. (Hirano ym. 1969)



Kuvio 15. Lihasaktiivisuuksien muutokset sävelkorkeuden muuttuessa. (Hirano ym. 1969)

Hirano, Vennard & Ohala (1970) tutkivat elektromyografian avulla kurkunpään neljän lihasen aktiivisuutta sävelkorkeuden ja rekisterin muuttuessa. Koehenkilöinä oli neljä oletettavasti klassista laulajaa, joista kaksi oli sopraanoja, yksi tenori ja yksi basso. Lihasaktiivisuutta mitattiin muun muassa koehenkilöiden laulaessa nousevia ja laskevia asteikoita ja äännössä, joka vaihteli rintarekisterin ja ohenteen välillä. Tutkimustulokset osoittivat, että sävelkorkeuden noustessa järeämmillä rekistereillä, nousi myös aktiivisuus äänihuulilihasessa. Tämä tukee sitä oletusta, että äänihuulilihasen aktivoituminen ja jäykistyminen nostaa sävelkorkeutta rintarekisterissä. Koehenkilöiden siirtyessä

kevyempään rekisteriin havaittiin aina äänihuulilihaksen aktiivisuuden laskeminen, mikä tukee sitä teoriaa, että äänihuulilihaksella on oleellinen merkitys rekisterin säätelyssä.

Titze, Luchei & Hirano (1989) tutkivat äänihuulilihaksen merkitystä sävelkorkeuden säätelyssä. Tutkimuksessa mitattiin neljällä koehenkilöllä äänihuulilihaksen ja sen vastaavakuttajan rengasrusto-kannurustoliuksen (äänihuulia venyttävä lihas) aktiivisuutta erilaisilla äänen korkeuksilla ja äänen voimakkuuksilla. Koehenkilöt olivat miespuolisia ja kaksi heistä oli äänen käytön koulutusta saaneita laulajia ja kaksi muuta olivat henkilöitä, jotka eivät olleet ikinä saaneet äänenkäytön koulutusta. Titzen ym. (1989, 214) kaksiperus hypoteesia olivat seuraavat:

Silloin kun äänihuulivärähtelyn amplitudi on suuri, pitäisi äänihuulilihaksen jännityksen kasvaessa muutosten sävelkorkeudessa olla positiivisempia (sävelkorkeus kasvaa) kuin silloin, kun värähtelyn amplitudi on pieni.

Silloin kun rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuus (äänihuulia venyttävä lihas) on pieni, pitäisi äänihuulilihaksen jännityksen kasvaessa muutosten sävelkorkeudessa olla positiivisempia kuin silloin, kun rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuus on suuri.

Ensimmäinen hypoteesi sisältää ajatuksen siitä, että kun äänihuulivärähtelyn amplitudi (värähtelevän kudoksen vuoroin aukeavan ja sulkeutuvan liikkeen laajuus) on suuri, osallistuu todennäköisesti myös äänihuulten syvemmät kerrokset värähtelyyn. Silloin myös äänihuulilihaksen jäykkyys vaikuttaa enemmän äänihuulten värähtelevän osan kokonaisjäykkyyteen. Titze ym. (1989, 214) selittää toisen hypoteesin perusajatuksen niin, että rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuuden ollessa matalampi on äänihuulilihaksen helpompi lisätä äänihuulten värähtelevän osan kokonaisjännitystä, koska pinta-kerroksen jännitys on varsin matala. Suurilla rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuuksilla pinnan jännitys on puolestaan suuri ja siksi äänihuulilihaksen on hankala lisätä merkittävästi värähtelevän systeemin kokonaisjännitystä.

Kokeen ensimmäisessä osiossa koehenkilöiden äänihuulilihaksen aktiivisuutta mitattiin äännön aikana. Koehenkilöt tuottivat ääntä matalilla, keskikorkeilla ja korkeilla äänenkorkeuksilla. Tuotetut äänen voimakkuudet olivat hiljainen, keskivoimakas, voimakas ja joissain tapauksissa hiljainen/ilmava. Titzen ym. mukaan kaikkien koehenkilöiden koh-

dalla äänenkorkeuden noustessa rintarekisterissä oli taipumus sekä äänihuulilihaksen aktiivisuudella että myös sen vastavaikuttajan rengasrusto-kannurustoliuksen aktiivisuudella nousta. Kun taas sävelkorkeus nousi ohuemmassa rekisterissä tapahtuvassa äännössä, nousi sävelkorkeuden kanssa pääasiallisesti vain rengasrusto-kannurustoliuksen aktiivisuus. Heidän tuloksensa perustuivat eri äänenkorkeuksilla tuotettujen yksittäisten ääntöjen kohdalla tehtyihin mittauksiin. Tämä käytäntö erosi Hiranon ym. (1969) käytännöstä, jossa sävelkorkeutta muutettiin sävel kerrallaan asteikon mukaisesti yhden pitkän äännön aikana. Titzen ym. (1989) tuloksista näkyi, että kyseisiä äänenkorkeuksia on mahdollista tuottaa useilla eri lihasten aktivointimenetelmillä. Heidän tuloksensa eivät osoittaneet yhtä selkeitä ja johdonmukaisia lihasaktiivisuuksien muutoksia sävelkorkeuden suhteen kuin Hiranon ym. (1969 - 1970) tekemät kokeet. Näiden kahden tutkimuksen tulosten eroista voisi tehdä johtopäätöksen, että lihasaktiivisuudet muuttuvat tasaisemmin silloin, kun äänen korkeus muuttuu yhden pitkän äännön aikana.

Äänihuulilihaksen aktiivisuuden merkitystä sävelkorkeudessa on tutkittu myös stimuloimalla äänihuulilihasta äännön aikana sähköisesti. Normaalisessa äännössä koehenkilön muuttaessa sävelkorkeutta tahdonalaisesti aktivoituu samanaikaisesti useita eri lihaksia. Kun lihasta stimuloidaan sähköisesti, saadaan tarkempia tuloksia siitä, mikä on yksittäisen lihaksen merkitys sävelkorkeuden säätelyssä (Kempster, Larson & Kistler 1988, 222). Lihasten sähköisessä stimuloinnissa voidaan käyttää samanlaisia elektrodeja kuin elektromyografiassa. Tällöin lihakseen johdetaan elektrodien kautta pieni, mutta riittävä sähkövirta, joka saa lihaksen supistumaan. Tällaista menetelmää käyttivät mm. Titze, Luschei & Hirano (1989) kokeessa, jossa ensin mitattiin äännön aikana lihasten aktiivisuutta elektromyografialla ja sen jälkeen tutkittiin lihaksen sähköisen stimuloinnin vaikutusta sävelkorkeuteen liittämällä elektrodit sähköiseen stimulaattoriin.

Kempster, Larson & Kistler (1988) tutkivat äänihuulilihaksen ja rengasrusto-kannurustoliuksen vaikutusta sävelkorkeuteen stimuloimalla sähköisesti kyseisiä lihaksia äännön aikana. Heidän pyrkimyksensä oli selvittää kyseisten lihasten vaikutus sävelkorkeuteen sekä matalilla että korkeilla sävelkorkeuksilla. Koehenkilöinä heillä toimi yksi naispuolinen ja neljä miespuolista henkilöä. Kaikille koehenkilöille toistettiin kokeet useampana koekertana. Onnistuneiden lihasstimulointien kohdalla sävelkorkeus nousi

aina äänihuulilihasta stimuloitaessa. Korkeilla sävelkorkeuksilla kuitenkin kolmena seitsemästä kerrasta äänihuulilihaksen stimulointi aiheutti äännön keskeytymisen. Näissä tapauksissa koehenkilö pystyi ääntämään ainoastaan suurella uloshengitystyöllä äännön ollessa puristeisen kuuloinen. Kempster ym. (1988) toteavat yhteenvedossaan, että heidän tutkimuksissaan äänihuulilihaksen stimulointi vaikutti sävelkorkeuteen vähintään yhtä paljon kuin rengasrusto-kilpirustoliuksen stimulointi. He päättelivät tuloksistaan äänihuulilihaksen olevan merkittävä osatekijä sävelkorkeuden säätelymekanismeissa, ainakin heidän tutkimillaan sävelkorkeuksilla ja rekistereillä äännettäessä.

Tutkimusraportista jäi kuitenkin epäselväksi, missä rekisterissä ääntötehtävät suoritettiin. Koska yksittäisiä ääntösuorituksia, niiden sävelkorkeuksia ja ääntäjän sukupuolta ei ollut heidän tuloksissaan eritelty, on johtopäätösten tekeminen jossain määrin hankalaa. Se mikä tuloksista kuitenkin näkyy, on että äänihuulilihaksen aktivoimisella on mahdollista nostaa sävelkorkeutta ainakin matalimmilla sävelkorkeuksilla ja mahdollisesti myös korkeammilla sävelkorkeuksilla.

Titzen ym. (1989) suorittaman kokeen toisessa osiossa tutkittiin myös miten sävelkorkeus muuttuu äänihuulilihaksen sähköisen stimuloinnin johdosta. Koehenkilön tuottaessa tasaista äänenkorkeutta lisättiin äänihuulilihaksen aktiivisuutta edellä mainitulla tavalla. Sama toteutettiin eri äänenkorkeuksilla ja voimakkuuksilla. Tämä koe onnistui hyvin ainoastaan yhdellä neljästä heidän koehenkilöistään. Hänen ääntäessään matalilla ja keskimatalilla sävelkorkeuksilla ($G2=98\text{Hz}$ - $E3=164\text{Hz}$) äänihuulilihaksen aktivoiminen nosti sävelkorkeutta sekä hiljaisessa että kovassa äännössä. Keskikorkeilla sävelkorkeuksilla ($A3=220\text{Hz}$ - $E4=330\text{Hz}$) hiljaa äännettäessä äänihuulilihaksen aktivoiminen välillä nosti ja välillä laski sävelkorkeutta. Tämän oletettiin johtuvan värähtelyyn osallistuvan äänihuulilihaksen määrän vaihtelusta. Näillä korkeuksilla voimakkaan äänen tuoton aikana sävelkorkeus kuitenkin joka kerta kasvoi äänihuulilihaksen aktiivisuuden kasvaessa. Tämä tuki hypoteeseja, joiden mukaan äänihuulilihaksen aktivoitumisen sävelkorkeutta nostavan vaikutuksen pitäisi olla suurempi silloin, kun rengasrustokannurustoliuksen aktiivisuus on alhainen tai, kun äänihuulten värähtelyn amplitudi on suuri. Korkeimmilla sävelkorkeuksilla ($A4=440\text{ Hz}$) tämän kyseisen koehenkilön kaikki tulokset osoittivat laskevaa äänenkorkeutta kaikilla korkeuksilla äänihuulilihaksen aktivoituessa. (Titze ym. 1989.)

Lihaskäivisyyksien vaikutusta sävelkorkeuteen voidaan arvioida myös matemaattisesti mallintamalla. Tutkimusten ansiosta äänihuulikudoksen ominaisuuksista tiedetään sen verran, että on mahdollista laskennallisesti arvioida, miten lihaskäivisyydet muuttavat äänihuulten jännitystä ja sävelkorkeutta. Mallinnuksessa äänihuulten muotoa, sen eri kerrosten jännitystä, lihasten käivisyyttä, ääniraon ylä- ja alapuolista painetta ja muita värähtelyyn vaikuttavia ominaisuuksia kuvataan matemaattisen yhtälön avulla. Yhtälön avulla voidaan esimerkiksi muodostaa kuvaaja, josta nähdään miten jonkin lihaksen käivisyyden muutos vaikuttaa sävelkorkeuteen. Mallinnuksessa on tärkeää, että malli on niin realistinen, että se antaa tutkittavana olevasta ilmiöstä riittävän todenmukaisia tuloksia. Hiranon (1974) mukaan värähteleviä äänihuulia simuloivan mallin todenmukaisuuden tulisi riippua siitä, mitä mallilla pyritään saavuttamaan. Usein teoreettisissa laskennallisissa tutkimuksissa, joitain tekijöitä onkin jätetty tarkoituksella huomioimatta tai pidetty muuttumattomina laskennallisen monimutkaisuuden helpottamiseksi. Yleensä tällöin on kuitenkin aina perusteltu, miksi tämä toimenpide ei vaikuta merkittävästi tutkimuksen kohteena olevasta asiasta saataviin tuloksiin. Matemaattisessa mallintamisessa hyödynnetään mm. muissa kudosten ominaisuuksia selvittäneissä tutkimuksissa saatuja tuloksia. Esimerkiksi Titzen, Jiaqin & Druckerin (1988a) jakama yhtälö, joka on esitetty kuviossa 16., sisältää tekijät σ_{am} ja σ_p , joista ensimmäinen on äänihuulilihaksen maksimaalinen jännitys, joka on mahdollista saavuttaa lihaksen maksimaalisella käivisyydellä. Toinen tekijä on koko värähtelevän kudoksen passiivinen jännitys silloin, kun äänihuulilihas on passiivinen. Näiden tekijöiden arvot ovat Titze ym. saaneet mallinnustutkimukseensa aiempien tutkimusten mittaustuloksista. (Titze ym. 1988a)

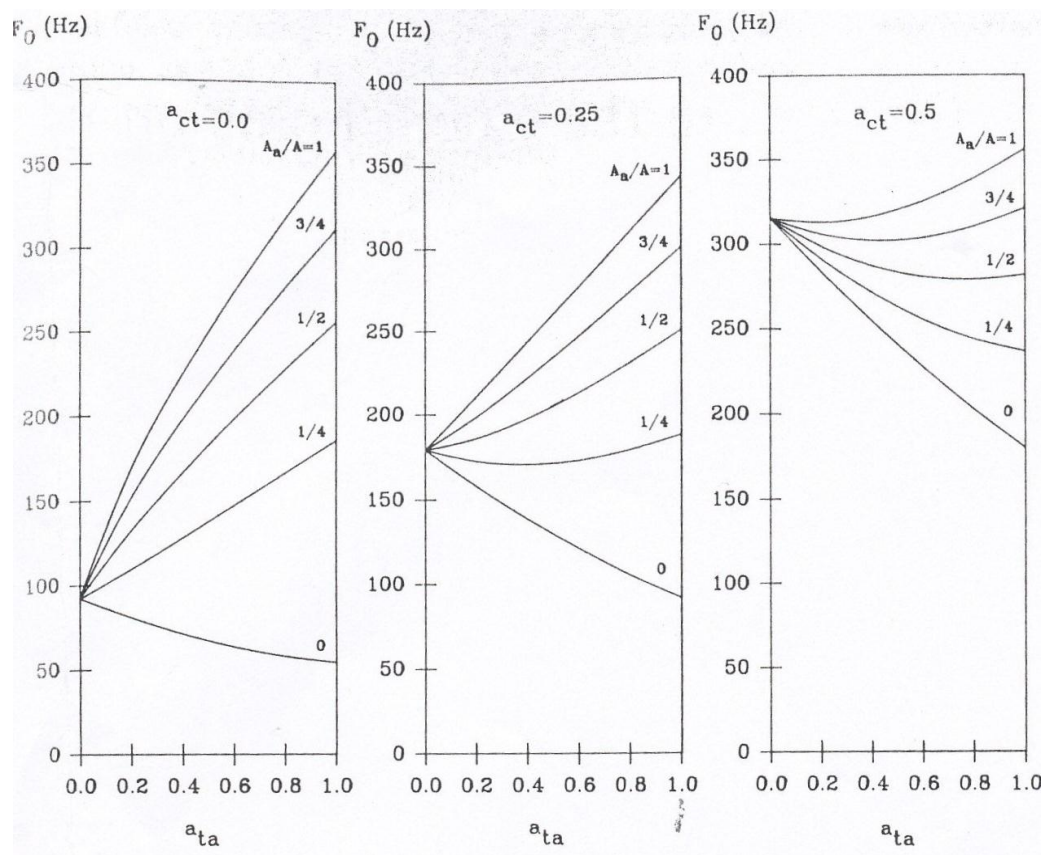
$$F_0 = F_{0p} \left(1 + \frac{A_a}{A} \frac{\sigma_{am}}{\sigma_p} a_{ta} \right)^{1/2}$$

Kuvio 16. Titzen (1988a) jakama äänihuulivärähtelyn perustaajuiden yhtälö.

Titzen ym. (1988a) laskennallisten kokeiden tarkoitus oli selvittää voiko yksinkertainen äänihuulimalli, jossa on eritelty äänihuulten pinta ja ydin (body-cover model), ennustaa

äänihuulilihaksen aktiivisuuden lisääntymistä seuraavat sävelkorkeuksien nousut sekä laskut. He jakoivat neljä yhtälöä, joiden yhdistelmästä he muodostivat kolme kuvaajaa, jotka on esitelty kuviossa 17. Yhtälöiden muodostamisessa hyödynnettiin tämän tutkimuksen yhteydessä ja aiemmissa tutkimuksissa kokeellisesti mittauksilla selvitettyjä kurkunpään geometrisia ja kudosten elastisia ominaisuuksia. Mittaustulokset saatiin koiraeläinten kurkunpäällä suoritetuista mittauksista. (Titze ym. 1988a)

Kuvion 17. kuvaajissa näkyy sävelkorkeus suhteessa äänihuulilihaksen aktiivisuuteen. Sävelkorkeus F_0 (Hz) on esitetty pystyakselilla ja äänihuulilihaksen aktiivisuus a_{ta} vaakakselilla. Äänihuulilihaksen kohdalla 0 merkitsee täysin passiivista ja 1.0 täysin aktiivista lihasta. Jokaisessa kuvaajassa olevat viisi eri käyrää kuvastavat tuloksia eri lihasmäärän osallistuessa värähtelyyn. Käyrän yhteydessä ilmoitettu suhdeluku A_a/A on siis värähtelyyn osallistuvan lihaksen poikkipinta-ala A_a suhteessa kaiken värähtelevän kudoksen poikkipinta-alaan A . Alin käyrä osoittaa sävelkorkeuden äänihuulilihaksen aktiiv-



Kuvio 17. Titzen ym. (1988a) laskennallisesti muodostamat kuvaajat äänihuulilihaksen aktiivisuuden suhteesta sävelkorkeuteen. (Titze 1988a)

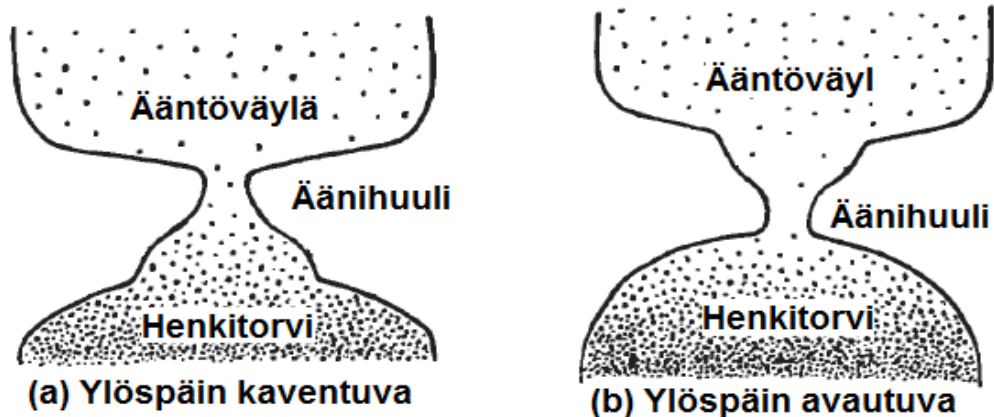
visuuden suhteen silloin, kun värähtely ei ulotu lainkaan lihakseen. Ylin käyrä osoittaa puolestaan saman silloin, kun valtaosa värähtelevästä kudoksesta on aktiivista lihaskudosta. Kolme eri kuvaajaa kuvastavat samaa tapahtumaa eri rengasrustokilpirustolihasen aktiivisuuksilla (act). Ensimmäisessä kuvaajassa kyseinen lihas on täysin passiivinen, toisessa kuvaajassa se on aktivoitunut 25-prosenttisesti ja kolmannessa kuvaajassa se on aktivoitunut 50-prosenttisesti. (Titze ym. 1988a)

Johtopäätöksiä, joita kuvaajista voidaan tehdä, on että jokaisessa kuvaajassa sävelkorkeus voi sekä nousta että laskea äänihuulilihasen aktiivisuuden kasvaessa. Kun suuri osa lihaksesta osallistuu värähtelyyn, sävelkorkeus nousee, ja kun ainoastaan äänihuulten pintakerros osallistuu värähtelyyn, sävelkorkeus laskee. Joillain äänihuulivärähtelyn amplitudin arvoilla tapahtuu äänihuulilihasen aktiivisuuden kasvaessa ainoastaan hyvin vähäisiä muutoksia sävelkorkeudessa. (Titze ym. 1988a)

Titzen ym. (1988a) matemaattinen malli on muodostettu kuvaamaan sävelkorkeuden muutosta tilanteessa, jossa äänihuulten katsotaan koostuvan yksinkertaistetusti pintakerroksesta ja ytimestä (äänihuulilihas). Malli ei sinänsä vastaa täysin oikeaa tilannetta. Ihmisäänihuulissa oleellinen värähtelijän osa on myös äänijänne, jota ei näissä laskelmissa ole tarkoituksenmukaisesti huomioitu. Äänijänne muodostuu kudoksesta, jonka jännitys kasvaa venytyksen johdosta huomattavasti nopeammin, kuin esimerkiksi äänihuulten pinnan jännitys (Titze 2006a). Ihmisäänihuulten kyvyn muodostaa ääniä laajalla taajuusalueella arvioidaan johtuvan osaksi juuri äänijänteen läsnäolosta. Esimerkiksi korkeilla sävelkorkeuksilla kudoksen jännityksen uskotaan kohdistuvan juuri äänijänteseen, jolloin pintakerros voi edelleen pysyä suhteellisen löysänä ja pitää yllä äänihuulten pinta-aaltoa. (Titze 2000, 291). Äänijänteen pois jättämisen johdosta Titzen ym. (1988a) laskelmat ovat ainoastaan karkea suuntaa antava malli, jonka avulla voidaan saada lisää ymmärrystä äänihuulivärähtelyn sävelkorkeutta säätelevästä monimutkaisesta mekanismista ja perustella tiettyjä tuloksia, joita on saatu kokeellisista mittauksista.

7.3 Äännön kynnyspaine

Äännön kynnyspaineella tarkoitetaan sitä keuhkojen painetta, joka tarvitaan äänihuulivärähtelyn käynnistämiseen. Titzen (1988b, 1539) on laskennallisten tutkimustensa perusteella todennut, että äännön kynnyspaineeseen vaikuttaa äänihuulikudoksen liikettä vaimentavat ominaisuudet, limakalvon aallon nopeus, ääniraon korkeus eli äänihuulten paksuus, ääntöä edeltävä² äänihuulten välinen etäisyys ja ääntöä edeltävä ääniraon muoto. Myös ääntöväylän ja äänihuulten välinen vuorovaikutus vaikuttaa äännön kynnyspaineeseen. Titzen (1988b, 1539) mukaan äännön kynnyspaine alenee silloin, kun kudoksen liikettä vaimentavat ominaisuudet ja pinta-aallon nopeus pienenevät, äänihuulten paksuus kasvaa ja äänihuulet lähenevät toisiaan. Äännön kynnyspaine alenee myös silloin, kun ääniraon ääntöä edeltävä muoto on enemmän ylöspäin aukeava kuin ylöspäin kaventuva (kuvio 18). Ääniraon muotoa pystyy muuttamaan esimerkiksi aktivoimalla äänihuulilihasta, jolloin äänihuulten alareunat lähenevät toisiaan (Hirano 1977, Yumoto 1995). Tällöin ääniraon muoto muuttuu kuvion 18 a muodosta kohti kuvion 18 b muotoa. Oikeastaan ääniraosta tulee pystyseinäisempi tai lievästi avautuva niin, että alareunat ovat hieman lähempänä toisiaan, kuin yläreunat (Titze 1988, 1546). Tämänkaltainen muoto saa aikaan pienemmän kynnyspaineen kuin kuvan 18 a muoto.



Kuvio 18: Ääniraon muoto (Titze 1988b).

² Viittaa hetkeen, joka on juuri ennen, kuin äänihuulivärähtely saa alkunsa.

Äänihuulten pinta-aallon nopeus on puolestaan kytköksissä äänihuulten ylä- ja alapintojen värähtelyn erivaiheisuuteen. Titzen (1988, 1550) mukaan, silloin kun tämä erivaiheisuus suurenee, laskee äänihuulten pinta-aallon nopeus. Toisin sanoen, mitä enemmän äänihuulten alareuna liikkuu yläreunan edellä, sitä alhaisempi on äännön kynnyspaine. Niin, kuin Hirano (1974, 91 - 92) on todennut, äänihuulilihaksen aktivoituminen jäykistää äänihuulten ytimen, paksuntaa äänihuulia ja saa niiden pintakerroksen löystymään. Paksummat äänihuulet ja löysempi limakalvo alentavat äännön kynnyspainetta. Luvussa 7.1.1. *Äänihuulivärähtely eri rekistereissä* esitin, että löysempi limakalvo aiheuttaa äänihuulivärähtelyyn suuremman äänihuulten ylä- ja alapintojen värähtelyn erivaiheisuuden.

7.4 Sekalaista

Äänihuulilihaksen aktivoitumiselle vaikutuksen alaisia tekijöitä ovat rekisteri, sävelkorkeus ja äännön kynnyspaine. Katson näiden kolmen olevan merkittävimmät kokonaisuudet kyseisen lihaksen aktiivisuuden vaikutuksen piirissä. Tässä äänihuulilihaksen roolia käsittelevässä viimeisessä osiossa tarkoitukseni on tuoda esiin vielä muutamia pienempiä ihmisäänen osa-alueita, jotka ovat myös osaksi kytköksissä tämän lihaksen aktiivisuuteen.

Äänen intensiteettiin (äänen voimakkuus) vaikuttavista monista asioista yksi on myös äänihuulilihaksen aktiivisuus. Se mekanismi, jonka kautta äänihuulilihaksen aktiivisuus siihen vaikuttaa, sisältyy kuitenkin osaksi rekisterin ja äännön kynnyspaineen alle. Tästä syystä en kirjoita siitä omaa kappaletta. Kuten rekisterin ja äännön kynnyspaineen purkamisesta selvisi, äänihuulilihaksen aktiivisuus paksuntaa äänihuulia, tuo niiden alareunoja lähemmäksi toisiaan ja saa äänihuulten limakalvon löystymään. Nämä asiat saavat aikaan sen, että ilmapirrasta siirtyy herkemmin energiaa äänihuulivärähtelyyn. Tästä seuraa taas se, että äänihuulivärähtelyn amplitudi kasvaa ja äänen voimakkuus sen ohessa. Yleensä rintarekisterissä tuotettu ääni mielletään voimakkaampana.

Äännön *taloudellisuus* ja *tehokkuus* saattavat käsitteinä olla hieman vaikeammin ymmärrettäviä, kuin äänen intensiteetti. Ne eivät varsinaisesti olekaan täysin yksiselittei-

siä. Titzen (2006b, 448 - 449) mukaan äännön taloudellisuuden voidaan ajatella olevan suuri silloin, kun saadaan mahdollisimman intensiivinen ääni aikaan mahdollisimman pienellä äänihuulivärähtelyn amplitudilla. Kun värähtelyn amplitudi on pieni, ei äänihuulivärähtelyn sulkeutumisvaiheessa synny niin suurta kudosta rasittavaa äänihuulien yhteentörmäystä. Taloudellisuudella tarkoitetaan tässä yhteydessä siis saavutetun lopputuloksen suhdetta "kuluihin". (Titze 2006b, 448 – 449.) Äännön tehokkuuden voidaan puolestaan määritellä olevan laulajan suusta säteilevän äänen tehon suhde aerodynaamiseen tehoon, jolla ääntä on tuotettu. (Titze 2006b, 456) Tässäkin tapauksessa on kyse lopputuloksen ja siihen käytetyn työn suhteesta. Laukkasen ym. (2008) tekemässä tutkimuksessa, jossa ääntä simuloitiin tietokoneen avulla, tutkittiin yhdessä osaluueessa äänihuulilihaksen merkitystä äännön taloudellisuuden ja tehokkuuden suhteen. Heidän tuloksensa osoittivat, että äänihuulilihaksen aktiivisuuden nostaminen suhteessa rengasrusto-kilpirustoliuksen aktiivisuuteen lisää äännön taloudellisuutta ja tehokkuutta silloin, kun ulkoisen rengasrusto-kannurustoliuksen aktiivisuutta alennetaan hieman. Ulkoisen rengasrusto-kannurustoliuksen ollessa äänirakoa sulkeva lihas tarkoittaa tämä sitä, että äänihuulilihaksen aktiivisuus lisää taloudellisuutta ja tehokkuutta silloin, kun ääniraon sulkua on hieman väljempi. Maksimaalinen äännön lopputulos syntyy silloin, kun äänihuulten yläreunojen sulkua avataan hieman ja äänihuulten alapintojen välistä sulkua lisätään aktiivimalla enemmän äänihuulilihasta. (Laukkanen, Titze, Hoffman & Finnegan 2008, 309).

Viimeinen käsittelemäni äänihuulilihaksen rooli äänenmuodostuksessa on teoreettinen ja liittyy kurkupään eteison telon kaventumiseen. Laukkasen (2009, 188) mukaan kurkupään eteison telon - varsinkin sen alimman, äänihuulista kurkunkansipoimuun ulottuvan putken – suhteellinen kaventaminen nostaa ääntöväylän positiivista reaktanssia laajalla taajuusalueella. Tämän kaventaminen tapahtuu suhteessa eteison telon yläpuoliseen tilaan, jota laajentamalla voi vastaavasti myös saada aikaan kyseisen vaikutuksen reaktanssissa. Kurkupään eteison telon kaventamisen seurauksena saattaa syntyä niin sanottu laulajan formantti, joka on ääntöväylän resonanssien yhteensulauma. Se näkyy ja kuuluu äänen spektrissä energiapiikkinä 2000-3000 Hz taajuusalueella. (Laukkanen 2009, 188.) Titzen (2008) mukaan ääntöväylä myös vahvistaa perusääntä ja kaikkia sen osasäveliä, jotka sijoittuvat sellaiselle taajuusalueelle, jossa vallitsee ääntöväylän positiivinen reaktanssi. Positiivinen reaktanssi on hänen mukaansa voimakkain aina juuri formanttitaajuuksien alapuolella. Formanttitaajuuksien kohdalla ja yläpuolei-

sessä läheisyydessä ääntöväylän reaktanssi putoaa yleensä jyrkästi alaspäin. (Titze 2008, 2735.) Tampereen yliopiston vokologian professori Anne-Maria Laukkanen toi käymissämme sähköpostikeskusteluissa esiin, että äänihuulilihas edesauttaa kurkunpään eteison telon kaventumista vetämällä kurkunkantta taakse päin. Tämä tuntuu loogiselta, sillä kilpiruston puolelta osa äänihuulilihaksen lihassoluista jatkuu aina kannurusto-kurkunkansisiteeseen ja kurkunkannen uloimpiin reunoihin (Zemlin 1997, 129).

8 Pohdinta

Äänihuulilihaksen aktivoimisella voidaan vaikuttaa äänihuulten muotoon ja sen eri kerrosten jäykkyyteen ja elastisuuteen. Näillä ominaisuuksilla on puolestaan rooli äänen rekisterin, sävelkorkeuden ja äännön kynnyspaineen säätelyssä. Osaksi näiden kolmen kautta äänihuulilihaksen aktiivisuus vaikuttaa myös äänen intensiteettiin, taloudellisuuteen ja tehokkuuteen. Koska äänihuulilihaksen lihassäikeet jatkuvat kilpiruston puolelta aina kurkunkanteen ja kannurusto-kurkunkansisiteeseen, kaventaa kyseisen lihaksen supistuminen vielä todennäköisesti kurkunpään eteison teloa. Tämän ontelon suhteellinen kaventuminen nostaa ääntöväylän reaktanssia, joka on avuksi äänihuulien värähtelylle ja siitä syntyvän äänen perustaajuuden ja sen osasävelten voimistumiselle.

Supistuessaan äänihuulilihas paksuntaa äänihuulia, tuo niiden alareunat lähemmäksi ääniraon keskustaa ja saa niiden pinnan jäykkyyden laskemaan. Nämä asetukset vievät ääntä kohti rintarekisteriä, jossa äänihuulet värähtelevät tiiviimmin yhteen koko pak-suudeltaan. Niiden ala- ja yläpinnat värähtelevät eri vaiheessa eli toisin sanoen alareuna liikkuu yläreunan edellä. Pinnan limakalvon löystyminen kasvattaa värähtelyn erivaiheisuutta. Tämän kaltaisen äänihuulivärähtelyn synnyttämä äänen yläsävelsarja aistitaan paksumman ja täyteläisemmän kuuloisena eli rintarekisterille tyypillisempänä. Rintarekisterissä äänihuulten pinnan osallistuessa pinta-aallon ylläpitämiseen ja värähtelyn ulottuessa aina äänihuulten ytimeen asti, säätelee sävelkorkeutta pääasiallisesti äänihuulilihas. Kyseisen lihaksen aktivoituessa sen jäykkyys ja samalla myös äänihuulten värähtelevän osan kokonaisjäykkyys kasvaa aiheuttaen nousun sävelkorkeudessa. Toisaalta osa tutkimuksista, joita olen käynyt tämän työni puitteissa läpi, on osoittanut äänihuulilihaksen aktiivisuuden kasvavan myös äänenkorkeuden noustessa korkeimmilla taajuuksilla ja ohennerekisterissä (Hirano ym. 1969).

Äännön kynnyspainetta, joka tarkoittaa äänihuulivärähtelyn aikaansaamiseen tarvittavaa subglottaalista painetta, voidaan alentaa aktivoimalla äänihuulilihasta. Äänihuulilihaksen aktiivisuus paksuntaa äänihuulia, tuo niiden alareunoja lähemmäksi ääniraon keskustaa ja laajentaa niiden ylä- ja alareunojen erivaiheista värähtelyä. Titze (1988b) on laskennallisesti todistanut, että tällaisten asetusten ansiosta siirtyy ilmavirrasta herkemmin energiaa äänihuulivärähtelyyn korvaamaan kudoksen liikettä vaimentavien ominaisuuksien aiheuttaman energiahäviön.

Olen kasannut tiedontäyteen kokonaisuuden äänihuulilihaksen roolista lauluäänen muodostuksessa. Tieto on peräisin ihmisääntä käsittelevistä tutkimus- ym. lehtiartikkeleista, oppikirjoista ja äänenkäytön oppaista. Nämä lähteet olen kokenut merkittäviksi, koska laajan tiedonhakuprosessini aikana olen huomannut niihin viitattavan useissa yhteyksissä. Osa lähteistä on uudempia julkaisuja ja osa hieman vanhempia. Esimerkiksi Minoru Hirano on tehnyt paljon merkittävää äänihuulten rakenteeseen ja äänihuulivärähtelyyn liittyvää tutkimusta 1960-luvun lopulta lähtien. Näin vanhan tutkimuksen tietosisällön paikkansapitävyyden voisi jossain määrin kyseenalaistaa. Näihin Hiranon tutkimuksiin sellaisenaan viitataan kuitenkin paljon muiden tutkimusten yhteydessä vielä tänäkin päivänä ja siksi koen, että oikea tapa oli käyttää lähteenä alkuperäistä tietoa.

Työni tavoitteena oli luoda kokonaisuus, josta voisi hyötyä laulopedagogiikan opiskelijat, laulajat ja muut henkilöt, jotka ovat kiinnostuneita ihmisäänen fysiologiasta. Koen onnistuneeni tässä tavoitteessa hyvin siinä mielessä, että uskon työni tietosisällön olevan mielenkiintoinen henkilölle, joka tuntee valmiiksi ihmisäänen fysiologiaa ja haluaa syventää tietämystään. Lisäksi olen tyytyväinen siitä, että olen työni tekemisen ohessa vahvistanut omaa tietämystäni tutkimuskohteenani olevasta asiasta.

Työn heikkoutena voi olla mahdollisesti liian laaja aiheajaus. Sen johdosta olen joutunut esittelemään työssäni useiden eri asioiden tietotaustaa ja käymään läpi paljon äänenmuodostuksen peruseriaatteita. Työni sisältämä tieto on runsauden takia puristettu paikoin niin tiiviiksi, että joidenkin lukijoiden sietokyky saattaa ylittyä. Työtä tehdessäni itselleni heräsi kysymys, olisiko parempi aiheajaus ollut esimerkiksi *äänihuulilihak-*

sen rooli sävelkorkeuden säätelyssä. Pitkän pohdinnan jälkeen tulin siihen tulokseen, että tavoitteet huomioon ottaen, oli laajempi tietosisältö kuitenkin oikea ratkaisu. Nyt äänifysiologiasta kiinnostunut henkilö voi saada kokonaisvaltaisemman kuvan äänihuulilihaksen merkityksestä äänenmuodostuksessa sen sijaan, että hän tuntisi siitä ainoastaan yhden osa-alueen. Nämä kaikki osa-alueet ovat loppujen lopuksi enemmän tai vähemmän kytköksissä toisiinsa äänihuulten muodon, jäykkyyden ja elastisuuden vaikutuksen alaisina. Koen, että tämän kokonaisuuden oppiminen lukijalle on hyödyllisempää kuin saada tietoa ainoastaan sen yhdestä osasta. Ripaus lukemisen helppoutta ja nopeutta on kenties vaihdettu hyödyllisempään lopputulokseen.

Opinnäytetyöni sisältämän tiedon paikkansapitävyyttä pohdittaessa on huomattava, että käsittelemäni aiheet ovat jatkuvana tutkimisen kohteena. Tieto, jota olen esitellyt, on monessa suhteessa teoreettista eikä edusta minkäänlaista absoluuttista totuutta. Esimerkiksi tutkimuksissa, joissa on mitattu lihasten aktiivisuutta sävelkorkeuden suhteen, on tutkimustuloksissa eri tutkimusten ja osaksi jopa samojen tutkimusten kohdalla jonkin verran ristiriitaisuuksia. Tämä kuvastaa sitä, että sävelkorkeuden säätelymekanismi on monimutkainen. Saman sävelkorkeuden voi saada aikaan useilla erilaisilla äänihuulilihaksen ja sen vastavaikuttajan rengasrusto-kilpirustolihaksen aktiivisuuksien yhdistelmillä. Vaikka äänihuulilihaksen katsotaan osallistuvan äänenkorkeuden säätelyyn aktiivisemmin rintarekisterin alueella matalammilla sävelkorkeuksilla, on Titze (1999) todennut kolumnissaan, että lahjakkaimmat laulajat eivät välttämättä joudu turvautumaan korkeillakaan taajuuksilla kevyempään mekanismiin. Hänen mukaansa limakalvon ollessa tarpeeksi paksu ja äänihuulilihaksen tarpeeksi voimakas, on äänihuulet mahdollista pitää värähtelemässä koko paksuudeltaan ja syvyydeltään myös ylemmillä sävelkorkeuksilla. Vaikka kaikki läpikäymieni tutkimusten tulokset eivät ole täysin yhteneviä, on kuitenkin selvää, että äänihuulilihaksella on merkittävä rooli sävelkorkeuden säätelyssä siitä huolimatta, että tämä rooli jää osaksi vielä epäselväksi.

Pelkkien koehenkilöillä suoritettujen mittausten ja havainnoimisen lisäksi on tärkeää, että ääntöä tutkitaan myös matemaattisin keinoin. Matemaattisissa malleissa pystytään kontrolloimaan tarkemmin eri muuttujia ja asettaa niiden arvoja tarkoituksenmukaisiksi toisin, kuin elävien ihmisten kohdalla, joilla lihasaktiivisuudet muuttuvat vuorovaikutuksessa toistensa ja muiden äännössä tapahtuvien muutosten kanssa. Titzen ym. (1989,

223) tarjoama teoreettinen selvitys sävelkorkeuden säätelymekanismin toiminnasta antaa hyvän pohjan ymmärrykselle. Ajatus siitä, että äänihuulten ytimessä sijaitsevan äänihuulilihaksen aktivoimisella voi nostaa sävelkorkeutta silloin, kun äänihuulivärähtely ulottuu lihaskerrokseen asti, on looginen ja helposti ymmärrettävä teoria. Sävelkorkeuden noustessa korkeammilla taajuuksilla, joilla äänihuulet värähtelevät ohuemmin ainoastaan yläreunoistaan yhteen, vastaa puolestaan rengasrusto-kilpirustoliuksen aikaansaama äänihuulien venyminen. (Titze 1989, 223.) Tämä teoriakaan ei kuitenkaan pysty perustelemaan kaikkia tutkijoiden tallentamia tapahtumia äänihuulissa sävelkorkeuden muuttuessa. Sonninen, Hurme & Laukkanen (1999, 333) havaitsivat äännön aikana ottamiensa röntgenkuvien perusteella, että kannurustojen ja kilpiruston välinen etäisyys pieneni ja näin ollen äänihuulten pituus lyheni, kun heidän koehenkilönsä nosti sävelkorkeutta toisen breikkikohtansa³ yläpuolella. He arvioivat sävelkorkeuden nousun aiheutuneen ääniraon värähtelevän osuuden lyhenemisestä. Heidän mukaansa tällainen tapahtuma saataisi olla mahdollista saavuttaa tuomalla äänihuulia voimakkaammin yhteen. He eivät kuitenkaan olleet varmoja siitä, mikä mekanismi sai aikaan sävelkorkeuden nousun ja toisaalta heidän kuvaamansa tapahtuma ei käsittääkseni selittäisi täysin kannurustojen ja kilpiruston etäisyyden lyhenemistä.

Äänen tutkimus tarjoaa jatkuvasti uutta tietoa ja selityksiä havainnoille sekä toisaalta myös uusia kysymyksiä tutkimuskohteena olevista asioista. Vaikka monta asiaa äänen toiminnasta on vielä selvittämättä, pystyy kuitenkin se tieto, joka meillä nyt jo on, kuvaamaan useita ihmisäänen osa-alueita ja näyttämään suuntaa siinä, miten ihmisääni tulisi kokonaisuutena hahmottaa. Uusi tieto auttaa äänenkäytön kouluttajia mahdollisesti löytämään tehokkaan tavan harjoittaa ääntä. Esimerkiksi Laukkanen ym. (2008) havaitsivat, että tuotettaessa ääntä puheäänen korkeudella puolisoljetulla äänteellä tai putkeen, aktivoituu äänihuulilihas. Koehenkilö kommentoi äänen tuntuvan resonovammalta ja kevyemmältä putkeen ääntämisen aikana ja sen jälkeen. Erilaisia putkia käytetään paljon hyödyksi äänihäiriötilojen hoitamisessa. (Laukkanen ym. 2008.) Voisiko putkesta siis olla hyötyä myös lauluäänen harjoittamisessa? Tässä työssä esitetyistä aineistosta ainakin käy ilmi, että äänihuulilihas on merkittävässä roolissa äänen tuotossa ja siitä syystä voisi kuvitella myös laulajan hyötyvän sen harjoittamisesta. Ai-

3 Tämä breikkikohta sijaitsee kyseisen ammattilaulajan kohdallaan sävelkorkeusalueella D#5 - F5 (F5 = 698 Hz)

nakin pop- & jazzlaulun puolella on opettajia, jotka käyttävät jonkin verran niin sanottua huulitäryä, joka toimii osaksi samalla periaatteella kuin putkeen ääntäminen. Molemmat näistä harjoitteista tarjoavat vastuksen äännössä syntyvälle ilmapirralle, minkä johdosta paine ääntöväylässä lisääntyy. Putkeen ääntämisen hyötyvaikutuksen uskotaan johtuvan osaksi tästä paineen kasvamisesta. Kapeikkoon ääntämisen vaikutuksia ihmisäänessä tutkitaan tällä hetkellä paljon äänitieteessä. Tämä edellä mainitsemani Laukkasen ym. (2008) toteuttama tutkimus selvitti kapeikkoon ääntämisen vaikutusta kurkunpään lihaksistoon. Vampola, Laukkanen, Horáček & Švec (2011, 314) havaitsivat myös putkeen ääntämisen seurauksena ääntöväylän ylemmän osan laajenevan suhteessa eteison teloon. Tämä muodonmuutos aiheuttaa ääntöväylän reaktanssin nousumisen laajalla taajuusalueella, minkä johdosta äänenmuodostaminen helpottuu. (Vampola ym. 2011.) Pop-/jazzlaulun puolella voi tosin ääntöväylän ylemmän osan avartamisesta olla sellainen vaikutus, että äänen värin näkökulmasta liikutaan kauemmaksi musiikinlajin edellyttämästä tyylinmukaisuudesta.

Seuraava mielenkiintoinen jatkotyö tälle opinnäytetyölleni voisi olla äänihuulilihaksen tietoisien harjoittamisen mahdollisuudet. Tämä aihe vaatii kuitenkin pohjalle vielä tällä hetkellä enemmän tieteellistä tutkimusta, jotta siitä saisi aikaan kattavan kirjallisuuskatsauksen. Toistaiseksi aiheesta kiinnostuneet laulajat voivat siis tyytyä harjoittelemaan puheäänien korkeudella huulitäryllä, suppeilla vokaaleilla ja mahdollisesti kokeilemaan eri paksuisten ja pituisten pillien vaikutusta omassa äänessämme.

Lähteet

Aalto, Anna-Liisa & Parviainen, Kati 1990. *Auta ääntäsi*. Helsinki: Otava

Erämetsä, Timo, Laakko, Esko 1998. *Lihaksen Rakenne ja Toiminta*. Teoksessa: *Li-hashuolto - Hieronta, kuntosaliharjoittelu, teippaus ja venyttely*. Juväslylä: Vk-Kustannus Oy, sivut 96-103.

Hirano, Minoru, Ohala, John & Vennard, William 1969. The Function of Laryngeal Muscles in Regulating Fundamental Frequency and Intensity of Phonation. *Journal of Speech and Hearing Research*, 16, sivut 616-628.

Hirano, Minoru, Vennard, William & Ohala, John 1970. Regulation of Register, Pitch and Intensity of Voice. *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 22, sivut 1-20.

Hirano, Minoru 1974. Morphological Structure of the Vocal Cord as a Vibrator and its Variations. *Folia Phoniatica et Logopaedica*, 26, sivut 89-94.

Hirano, Minoru 1977. Structure and vibratory Behavior of the Vocal Folds. *Toim. Sawashima, Masyuki & Cooper, Franklin S.: Dynamic Aspects of Speech Production*. Tokio: University of Tokyo Press, sivut 13-30.

Hirano, Minoru & Kakita, Yuki 1985. Cover-Body Theory of Vocal Fold Vibration. Teoksessa (toim.) Daniloff, Raymond G.: *Speech Science: recent advances*. Lontoo: Taylor & Francis, sivut 1-46.

Kempster, Gail B., Larson, Charles R. & Kistler, Michael K. 1988. Effects of Electrical Stimulation of Cricothyroid and Thyroarytenoid Muscles on Voice Fundamental Frequency. *Journal of Voice*, vol. 2, no. 3, sivut 221-229.

Laukkanen, Anne-Maria & Leino, Timo 2001. *Ihmeellinen Ihmisääni*. Helsinki: Gaudeamus.

Laukkanen, Anne-Maria, Titze, Ingo R., Hoffman, Henry, Finnegan, Eileen 2008. Effects of a Semioccluded Vocal Tract on Laryngeal Muscle Activity and Glottal Adduction in a Single Female Subject. *Folia Phoniatrica et Logopaedica*, 60, sivut 298 - 311

Laukkanen, Anne-Maria 2009. Äänilähteen ja -väylän vuorovaikutus. Teoksessa Aaltonen Olli ym. (toim.): Puhuva ihminen. Puhetieteiden perusteet. Helsinki: Otava, sivut 183 – 190.

Sanders, Ira, Rai Surinder, Han, Yingshi & Biller, Hugn F. 1998. Human Vocalis Contains Distinct Superior and Inferior Subcompartments: Possible Candidates for the Two Masses of Vocal Fold Vibration. *Annals of Otology, Rhinology and Laryngology* 107, sivut 826-833.

Sonninen, Aatto, Hurme, Pertti & Laukkanen, Anne-Maria 1999. The External Frame-function in the Control of Pitch, Register and Singing Mode: Radiographic Observations of a Female Singer. Vol. 13, no. 3, sivut 319 - 340

Titze, Ingo R., Jiang, Jiaqi & Drucker, David G. 1988a. Preliminaries to the Body-Cover Theory of Pitch Control. *Journal of Voice*, Vol. 1, No. 4, sivut 314-319.

Titze, Ingo R. 1988b. The Physics of Small-Amplitude Oscillation of the Vocal Folds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(4), sivut 1536-1552.

Titze, Ingo R, Luschei, Erich S. & Minoru, Hirano 1989. Role of the Thyroarytenoid Muscle in Regulation of Fundamental Frequency. *Journal of Voice*, Vol. 3, No. 3, sivut 213-224.

Titze, Ingo R. 1999. The Use of Low First Formant Vowels and Nasal to Train the Lighter Mechanism. *Journal of Singing*, vol. 55, No. 4, sivut 41-43

Titze, Ingo R. 2000. *Principles of Voice Production*. Iowa City: NCVS.

Titze, Ingo R. 2006a. The Miracle of Producing a Large Pitch Range. *Journal of Singing*, vol. 62, no.2, sivut 185-186.

Titze, Ingo R. 2006b. Voice Training and Therapy With a Semi-Occluded Vocal Tract: Rationale and Scientific Underpinnings. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, Vol 49, sivut 448-459.

Titze, Ingo R. 2008. Nonlinear source-filter coupling in phonation: Theory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 123(5), sivut 2733 - 2749.

Titze, Ingo R. 2009. How Are Harmonics Produced at the Voice Source? *Journal of Singing*, vol 65, no.5, sivut 575 - 576.

Titze, Ingo R. 2011. Vocal Fold Mass is Not a Usefull Quantity For Describing F0 in Vocalization. *Journal of Speech, Language and Hearing Research*, vol. 54, sivut 520-522.

Yumoto, Eiji, Kadota, Yoshimi, Kurokawa, Hironobu & Sasaki Yumi. Effects of Vocal Fold Tension and Thyroarytenoid Activity on the Infraglottic Aspect of Vocal Fold Vibration and Glottal Source Sound Quality 1995. *Teoksessa (toim.) Fujimura, Osamu & Hirano, Minoru: Vocal Fold Physiology: Voice Quality Control*. San Diego: Singular, sivut 127 - 145.

Zemlin Willard R. *Speech and hearing Science: Anatomy and Physiology*. Massachusetts: Allyn & Bacon.