

Helena Savolainen

ONKO LAULUNOPETTAJAN KORVILLE KORVAAJAA?

Lauluäänen fysiologisten ominaisuuksien ja kuulonvaraisten havaintojen akustisia vasteita

ONKO LAULUNOPETTAJAN KORVILLE KORVAAJAA?

Lauluäänen fysiologisten ominaisuuksien ja kuulonvaraisten havaintojen akustisia vasteita

Helena Savolainen
Opinnäytetyö
Syksy 2020
Musiikin tutkinto-ohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Musiikin tutkinto-ohjelma, musiikkipedagogin suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Helena Savolainen

Opinnäytetyön nimi: Onko laulunopettajan korville korvaajaa? Lauluäänen fysiologisten ominaisuuksien ja kuulonvaraisten havaintojen akustisia vasteita

Työn ohjaaja: Jouko Tötterström

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2020

Sivumäärä: 31

Tämän opinnäytetyö tarkoituksena oli selvittää fysiologisesti optimaalisesti tuotetun lauluäänen elementtejä ja sitä, mitä elementtejä hyvässä äänessä on akustisesti tarkasteltuna. Tarkoituksena oli pohtia, voisiko akustista analyysia käyttää tulevaisuudessa paremmin hyödyksi laulunopiskelun tukena. Työssä tarkasteltiin länsimaisen taidemusiikin laulutapoja. Työ on kuvaileva kirjallisuuskatsaus, johon on poimittu mielenkiintoa herättäneitä artikkeleita ja tietolähteitä tarkasteltavaksi. Aineisto on koottu Oulun yliopiston ja ammattikorkeakoulun kirjaston Oula-Finna-aineistosta ja täydennetty Google Scholar -hauilla.

Laulunopiskelijan ohjaaminen on riippunut opettajan kyvystä kuulla oppilaan laulusta elementtejä, jotka vaativat muuttamista. Opettajan omat kokemukset oppilaana ja laulajana olemisesta ovat aiemmin vaikuttaneet hyvin paljon opettajan tapaan opettaa. Laulunopetuksessa käytetty termistö on ollut laaja ja epämääräinen, ja mielikuviin perustuvaa opetusta on ollut paljon.

Fysiologisesti optimaalisesti tuotetun äänen peruselementit ovat sopivan äänenpaineen tuottava hengitys, rikkaan äänen tuottava kurkunpää sekä monilla eri tavoilla muokkautuva ääntöväylä. Näiden kolmen osan yhteistoiminta on ratkaisevan tärkeää optimaalisen äänentuoton kannalta. Oleellinen asia äänentuotossa on sopiva ilmanpaine ja ilman virtausnopeus ääniraossa ja ääntöväylässä. Äänihuulitasolla oleelliset asiat ovat äänenkorkeuden säätelyn toimivuus eri rekistereissä ja ääniraon sulkemisen voima.

Äänen kuunteluanalyyseissa tutkittavien muuttujien termistö on ollut vaihteleva. On pyritty selvittämään, mitkä ovat tärkeimmät äänenlaatua määrittelevät termit. Standardeja ei ole luotu. Akustisissa analyyseissa tutkimus on keskittynyt äänen spektrin tutkimiseen. Spektristä nähdään äänen yläsävelsarjat ja formanttien muodostuminen, joista pystytään päättelemään äänen tuottamista ja laatua. Toinen keskeinen tutkimuskohde on ollut vibrato. Tutkimuksen piiriin on tullut äänen ja vibraton taajuuden ja paineen huojunnat, jotka tuovat lisäinformaatiota äänen laadusta.

Äänen akustisen analyysin parametreille on löydetty kuuloaistimusvasteita. Tulevaisuudessa tarvitaan lisää tutkimuksia äänen fysiologisten elementtien yhdistämiseksi akustisen analyysin parametreihin. Äänen tutkimus on viime vuosikymmeninä tuonut paljon lisää työkaluja opettamiseen. Laulaminen on fysiologinen tapahtuma ja lauluääni fyysikaalinen ilmiö ja tämän tiedostaminen auttaa viemään opettamista konkreettiseen suuntaan. Akustisten parametrien avulla voisi pyrkiä kehittämään yhä parempaa mittaria, josta voisi tulla opettajan korvien apuri laulunopiskelussa.

Asiasanat: Lauluääni, äänifysiologia, akustinen analyysi, formanttianalyysi, vibrato, ooppera

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree Programme in Music, Option of Music Pedagogy

Author: Helena Savolainen
Title of thesis: Can Singing Teacher's Ears Be Replaced?
Supervisor: Jouko Tötterström
Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2020
Number of pages: 31

The purpose of this thesis was to find out the elements of a physiologically optimally produced singing voice and how they appear acoustically. The purpose was to consider whether acoustic analysis could be used more in the future to support singing learning. The work focused on western art music. This thesis is a descriptive literature review in which sources have been selected by the author's interest. The articles and sources have been compiled from the Oula-Finna database of the library of Oulu University of Applied Sciences and supplemented with Google Scholar searches.

The guidance of a singing student has depended on teacher's ability to hear elements from singing that require change. Teachers have tended to teach in the same way as they have been taught, and their own experiences as singers have also affected their teaching methods. The terminology used in vocal teaching has been broad.

The basic elements of a physiologically optimally produced sound are breathing that produces the appropriate sound pressure, vocal cords that produce a rich sound and a sound path that modifies the voice in many different ways. Co-operation of these three components is crucial for optimal sound production. One essential aspect in sound production is the appropriate air pressure and air flow rate both in the larynx and the sound path. At the vocal cords the essentials are the functionality of the pitch control in different registers and the power of closing the vocal fold.

Efforts have been made to identify the most important terms that define the sound quality in sound listening analyzes because the terminology has been so wide and variable. No standards have been created so far. In acoustic analyzes the research has focused on the study of the sound spectrum. The spectrum shows the overtones of the sound and formation of formants from which it is possible to deduce the production and quality of the sound. Another key area of research has been vibrato. Recent researches have included perturbations, such as jitter and shimmer both in basic sound and vibrato, which provides additional information on the sound quality.

Auditory responses have been found to the parameters of acoustic analysis. In the future more studies are needed to compare the physiological elements of sound with the parameters of acoustic analysis. The study of singing voice has brought many more tools for teaching in recent decades. Singing is a physiological process and singing voice is a physical phenomenon and awareness of this helps to make teaching more concrete. Acoustic parameters could be used to develop an application that could become an assistant to teacher's ears in singing.

Keywords: singing voice, vocal physiology, acoustic analysis, formant analysis, vibration, opera

SISÄLLYS

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 2 | KIRJALLISUUSKATSAUKSEN TOTEUTUS | 8 |
| 2.1 | Kriteerit aineiston valinnalle | 8 |
| 2.2 | Aineiston keruu | 8 |
| 3 | LAULAMISEN FYSIOLOGIA JA ÄÄNEN ANALYSOINTIMENETELMÄT | 10 |
| 3.1 | Lauluäänen peruselementit..... | 10 |
| 3.2 | Laulamisen fysiologia..... | 11 |
| 3.2.1 | Hengitys..... | 11 |
| 3.2.2 | Äänilähde..... | 12 |
| 3.2.3 | Ääntöväylä..... | 14 |
| 3.2.4 | Äänielimistön yhteistoiminta | 16 |
| 3.3 | Äänen mittausmenetelmät | 17 |
| 3.3.1 | Äänielimistön toimintaa mittaavat menetelmät..... | 18 |
| 3.3.2 | Kuunteluanalyysit..... | 19 |
| 3.3.3 | Akustiset analyysit | 22 |
| 3.4 | Laulunopettajan korva..... | 24 |
| 4 | ANALYYSI | 25 |
| 4.1 | Aineiston löytöjä | 25 |
| 4.2 | Aineiston pohjalta esiin nousseet haasteet | 26 |
| 5 | POHDINTA | 27 |
| | LÄHTEET..... | 30 |

1 JOHDANTO

Klassinen laulu on perustunut aiemmin vahvasti mestari-kisälliasetelmaan, jossa opettajalla on merkittävä rooli opiskelijan ohjaamisessa. Tämä on hyvin ymmärrettävää, sillä lauluinstrumenttiaan ei voi silmillä nähdä eikä itse laulaessa myöskään kuule ääntään samalla tavoin kuin ympärillä olevat kuulijat. Niinpä varsinkin lauluopintojen alkutaipaleella opettajan korville ja ohjaukselle on ollut paljon tarvetta. Taitavalta opettajalta on vaadittu hyvää audiokineesteettistä kykyä, jotta hän voisi ohjata oppilasta oikeaan suuntaan. Opettajan on täytynyt ”kuulla korvallaan”, mitä oppilaan kehossa tapahtuu. Lauluopintojen edetessä opiskelija on oppinut itsekin muun muassa kehotuntemustensa avulla kehittämään laulamistaan. Viime vuosina on yleisesti siirrytty pedagogiikassa yhä enemmän opiskelijälähtöiseen opetukseen. Sama trendi on nähtävillä laulunopetuksessakin.

Laulupedagogien antama opetus on perustunut pitkään, jopa viime vuosiin saakka, pedagogien omiin kokemuksiin laulunopiskelijana ja laulajana. Laulamisen käsittäminen ennen muuta taiteena on ollut edesauttamassa tällaisen periaatteen jatkumista. Laulunopetuksessa käytetty termistö on ollut kirjavaa, ja opetuksessa on käytetty paljon mielikuvia. Tähän on kuitenkin tiedostamisen lisääntyessä nähtävillä muutosta. Laulaminen perustuu fysiologiaan, ja laululla on tietyt akustiset lainalaisuudet. Laulun kuuleminen taas on aistitiedon käsittelyä ja neuropsykologiaa. Laulamista on tutkittu jo pitkään ja lauluelimistön toimintaa ainakin 1800-luvulta saakka laryngoskopian keksimisen myötä, joskin vielä 1900-luvun alussa vallalla oli käsitys ihmisen äänijänteistä, joiden oletettiin värähtelevän kielisoittimen tapaan (Hammar 1962, 45). Äänitutkimuksen saralla on vuosikymmeniä pohdittu laulun arviointia ja mittaamista akustisten analyysien avulla. Lauluäänen analysointia varten on myös pohdittu kehitettävään monimuuttujamallia, mutta mitään standardoitua lopputulosta ei ole saatu aikaiseksi.

Sain itse ensimmäisen kosketuksen laulun akustiseen mittaamiseen osallistuessani vuonna 2007 tutkimukseen, jossa oli tarkoitus selvittää amatööri- ja ammattilaislaulajien äänien eroa. Osallistuin siihen yhtenä tutkimushenkilönä, amatöörilaulajana, laulaen studio-olosuhteissa kaksi kansanlaulua, jotka kulkivat kutakuinkin äänen keskialueella. Asia unohtui minulla vuosikymmenen ajaksi, kunnes lauluopinnot aloitettuani muistin tutkimukseen osallistumiseni, ja aloin pohtia, mitä tällä tutkimuksella loppujen lopuksi haettiin. Monien seikkojen vuoksi en pystynyt lopulta käyttämään tutkimusaineistoa hyväkseni, mutta aihe oli jo temmannut mukaansa sen verran, että

päätin tutustua aiemmin kerättyyn tietoon aiheesta, ja opinnäytetyön aihe muotoutui tämän seurauksena. Aiemmat opintoni johtivat ajatuksieni suuntaa laulamisen fysiologiaan.

Tämän opinnäytetyön keskeisenä ajatuksena on, että laulaessa elimistöä käytettäisiin fysiologisesti mahdollisimman optimaalisella tavalla. Usein sanotaan, että huippulaulajat vaikuttavat suoriutuvan tehtävästään vaivattomasti, vaikka laulavatkin äänielimistölle erittäin vaativaa ohjelmistoa. Eräs minua ohjannut laulopedagogi sanoi useamman kerran: ”Det är lätt att sjunga rätt.” Kun laulaminen tuntuu hyvältä, se välittyy myös kuulijalle positiivisena tunteena. Kun laulaja käyttää ääntään fysiologisesti optimaalisella tavalla taitavasti, vapauttaa se energiaa tulkintaan, ja siksi laululla on mahdollisuus koskettaa kuulijaa eri tavalla. Toisaalta, jos lauluääntä tuotetaan äänielimistöä rasittavalla tavalla, voi laulu-ura loppua lyhyeen.

Minua kiehtoo se, miten tämä fysiologisesti optimaalisin tapa laulaa tulee esiin ääntä akustisesti analysoitaessa. Mitkä ovat optimaalisen laulutavan elementit? Onko olemassa fundamentaalisia parametreja, jotka yhdistämällä voisi saada kattavan analysointimenetelmän klassiselle lauluäänelle? Voisiko löytyä menetelmä, josta voisi tulevaisuudessa saada luotettavan mittarin laulunopiskelijalle itselleen tueksi kohti fysiologisesti optimaalisesti tuotettua länsimaisen taidemusiikin kriteerit täyttävää ääntä? Vastausta näihin kysymyksiin ei opinnäytetyön laajuuden rajoissa pysty saamaan. Päädyin siis kuvailevaan kirjallisuuskatsaukseen, jossa poimin tarkasteluun aiheesta tähän mennessä kirjoitettuja kirjoja ja tieteellisiä artikkeleita.

2 KIRJALLISUUSKATSAUKSEN TOTEUTUS

2.1 Kriteerit aineiston valinnalle

Tässä opinnäytetyössä keskityin länsimaisen klassisen taidemusiikin tyyliuuntiin, ooppera- ja liedlauluun, joten rajasin lähtökohtaisesti aineistostani pois muihin tyyliuuntiin keskittyneen aineiston. Mikäli jokin muuta musiikkityyliä käsittelevä artikkeli toi merkittävää lisäinformaatiota ja selkeyttä työhöni, käytin sitä lähdemateriaalina. Olen rajannut työni ulkopuolelle lasten laulamista koskevat artikkelit. Aineisto myös rajautui siten, että ulkopuolelle jäivät automaattisesti artikkelit, jotka eivät olleet vapaasti kokonaisuudessaan luettavissa.

Opinnäytetyöni on kuvaileva ja keskittyy laulamisen fysiologiaan ja akustiseen analyysiin. Systemaattiseen kirjallisuuskatsaukseen liittyvää kattavaa aineiston keruuta ei näin ollen ollut tarkoituskaan tehdä. Pyrin kuitenkin mahdollisimman monipuoliseen aiheen käsittelyyn. Pyrin löytämään tuoreimmat tehdyt tutkimukset ja päivitykset. Kuitenkin joidenkin perusasioiden faktatiedot pohjautuvat vanhempiin lähteisiin. Otin mukaan suomen-, ruotsin- ja englanninkielistä materiaalia. Tärkeimpinä kirjallisuuslähteinäni olivat Anne-Maria Laukkasen ja Timo Leinon Ihmeellinen ihmisääni -kirja sekä ruotsalaisen äänitutkimuksen uranuurtajan Johan Sundbergin kirja Röstlåra. Käytössäni oli myös Sobottan Atlas of Human Anatomy ja pari muuta anatomian ja fysiologian kirjaa, jotka eivät löydy lähdeluettelosta, koska en ole niihin varsinaisesti työssäni viitannut. Yksi mielenkiintoisista suomalaisista lähteistä oli Jaana Kuoppalan pro gradu -tutkielma, jonka otan mukaan tähän, vaikka laulajat, joiden ääntä tutkimuksessa analysoitiin, eivät olleet ooppera- eivätkä liedlaulajia, vaan ääninäytteet oli kerätty ympäri maailmaa antropologisia tarkoituksia varten.

2.2 Aineiston keruu

Alustavana työnä tutkin ihmisen äänielimistön toimintaa ja luin akustiikan ja äänen analyysimenetelmien yleisteoksia. Tämän aikana hahmottelin tulevan aineiston keruun hakusanoja. Aiheeseen liittyviä asiasanoja tarkistin Fintosta (Suomalainen asiasanasto- ja ontologiapalvelu, finto.fi).

Aiheen ollessa laaja päätin keskittyä aineiston keruussani kahteen tietokantaan. Tein hakuja Oulun yliopiston kirjaston Oula-Finna- sekä Google Scholar -tietokannan kautta. Oula-Finna-tietokannasta hakiessani käytin Fintosta löytämiäni asiasanoja. Alla mainittujen hakusanojen suomenkielisiä vasteita käyttäen tutustuin myös Theseuksesta löytyneisiin aiempiin opinnäytetöihin.

Hakuprosessissa kokeilin asiasanoista yhdistettyjä erilaisia hakulausekkeita. Asiasanoja, joita lopulta hakulausekkeissa käytin, olivat singing, singing voice, opera, vibration, resonance, acoustic analysis, voice analysis and modeling, multi frame analysis. Google Scholarilla hakiessani käytin monipuolisemmin jo löytämissäni artikkeleissa olleita avainsanoja, kuten jitter, shimmer ja harmonics to noise -ratio. Erilaisilla hakulausekkeilla etsiessä Oula-Finna-hakutuloksia tuli 50–100. Google Scholar -tietokannalla hakiessani hakutuloksia tuli useimmiten lukematon määrä. Tästä syystä keskityin alussa hakemaan aineistoa kirjaston tietokannasta ja täydensin hakuja tämän jälkeen Google Scholarista.

3 LAULAMISEN FYSIOLOGIA JA ÄÄNEN ANALYSOINTIMENETELMÄT

3.1 Lauluäänen peruselementit

Ääni on väliaineessa etenevää aaltoliikettä, jonka saa aikaan jollakin tapaa värähtelevä äänilähde. Ilmassa ääni on pitkittäistä aaltoliikettä, joka on käytännössä ilmanpaineen vaihtelua. Äänen fysikaaliset ominaisuudet ovat äänenvoimakkuus ja taajuus eli äänenkorkeus. Äänenvoimakkuus eli äänenpainetaso ilmaistaan yleensä desibeleinä, ja se on riippuvainen itse äänilähteen tuottamasta äänenpaineen tehosta ja mittauspisteen etäisyydestä äänilähteeseen.

Äänet voidaan musiikillisesti jakaa kahteen osaan: soinnillisiin ja soinnittomiin. Soinnillisista äänistä on erotettavissa äänen- tai sävelkorkeus ja soinnittomat äänet ovat hälyääniä, joista sävelkorkeuden erottaminen ei onnistu. Ihmisäänessä soinnittomia ääniä ovat soinnittomat konsonantit (esimerkiksi t, k ja p), jotka muodostetaan muualla kuin äänihuulissa. (Sundberg 2001, 21.) Lauluääntä tutkiessa keskitytään yleensä tutkimaan äänen soinnillista osaa, virtaavaa ääntä, joka on riippuvainen lauluelimistön kokonaistoiminnasta.

Soinnillisella äänellä on sävelkorkeus, perustaajuus (F0). Taajuus kertoo sen, kuinka monta värähtelyä, toisin sanoen kuinka monta aaltoa tietyssä paikassa kulkee sekunnissa (n/s, yksikkö hertsi = Hz). Lähes kaikissa äänissä, myös ihmisäänessä, on perustaajuuden lisäksi harmoninen yläsävelistö, jossa sävelet ovat perustaajuuden kerrannaislukuja (esimerkiksi jos perustaajuus on 440 Hz, ovat tästä seuraavat yläsävelet 880 Hz, 1320 Hz, 1760 Hz ja niin edelleen). Yläsävelistön eri äänesten voimakkuuden erot tuovat äänelle ominaisvärinsä. Näiden perusteella voidaan erottaa muun muassa ihmisäänet toisistaan. Laulajille yläsävelistö on erittäin oleellinen kantavan äänen synty miseksi. Matalille klassisille lauluäänille on ominaista niin sanotun laulajan formantin muodostuminen ääneen. Tästä aiheesta kirjoitan myöhemmin lisää.

Lauluäänistä puhuttaessa ei voi ohittaa käsitettä rekisteri. Eri sävelkorkeuksilla äänenmuodostus poikkeaa jonkin verran toisistaan, ja näin on syntynyt rekisteri-käsite. Klassisessa laulussa pyritään äänenmuodostukseen, joka kuulostaa tasaiselta ja jossa rekisterinvaihdokset tapahtuvat pehmeästi rekisteristä toiseen. Miehillä rekisterit jaetaan esimerkiksi rintarekisteriin ja falsettirekisteriin. Naisilla rekistereitä ovat rintarekisteri, keskirekisteri ja ylempi rekisteri. (Sundberg

2001, 70.) Nämä rekisterijaot eivät ole kattavia, ja rekistereistä on olemassa hyvin erilaisia teorioita. Yllä mainituiden rekistereiden vaihdoksissa tapahtuu äänentuotossa äänihuulitasolla muutoksia.

3.2 Laulamisen fysiologia

Äänielimistö voidaan teknisen tarkastelun helpottamiseksi jakaa kolmeen osaan: hengityselimistö, kurkunpää sekä ääntöväylä. Äänielimistön osat eivät ole itsenäisesti toimivia yksiköitä, vaan vaikuttavat toinen toisiinsa dynaamisessa äänentuoton prosessissa. Äänielimistöllä on muitakin tehtäviä kuin äänentuotto; esimerkiksi hengityselimistöllä on elintärkeä kaasujenvaihtotehtävä. Pyrkimyksenäni on tuoda esiin tärkeimpiä asioita, jotka ovat tulleet kirjallisuudesta esiin liittyen fysiologisesti optimaaliseen äänentuottoon.

Äänielimistön kolmea eri osaa voidaan tarkastella teknisesti seuraavasti: Hengityselimistö toimii kompressorina, jonka tehtävänä on säädellä ilmanpainetta, jonka avulla ääni tuotetaan. Äänihuulet toimivat oskillaattorina, jonka tehtävänä on tuottaa akustinen signaali, ääni. Kun kompressorin tuottama ilmavirta kohtaa toisiaan lähentyvät äänihuulet, alkavat äänihuulet värähdellä ja vaikuttaa siten ilmavirran etenemiseen tuoden siihen jaksoittaisuutta, jonka ihmiskorva lopulta aistii äänenä. Tämä ilmavirtaus etenee ääntöväylään, joka toimii filterinä tai resonaattorina. Filterin läpi kuljettuaan kuulemamme ääni saa lopullisen muotonsa esimerkiksi vokaalin muodossa. Resonaattorin tehtävänä on myös vahvistaa äänen tiettyjä osasäveliä, jotta äänen kantokyky paranisi ja jotta ääni soisi täyteläisesti. (Sundberg 2001, 19–24.)

3.2.1 Hengitys

Hengitys tuo äänen syntymiselle oleellisen ilmanpaineen vaihtelun. Hengityksen katsotaan yleisesti olevan erittäin merkittävä osa laulamisen prosessin onnistumista ja tavoitellun tasaisesti virtaavan äänen syntymistä. Hengityksellä on myös vaikutusta kurkunpään toimintaan. Laulamisen kannalta hengityksen säätelyllä on ratkaiseva vaikutus kurkunpään alaiseen paineeseen. Paineella taas on vaikutus kurkunpään toimintaan ja tuotetun äänen volyyymiin sekä pieni vaikutus äänenkorkeuteen.

Optimaalisena tapana hengittää pidetään niin sanottua syvähengitystä. Se ei tarkoita keuhkojen täyttämistä äärimmilleen, vaan hengitystä, jossa pallea pääsee laskeutumaan alas ja ulommat kylkivälilihakset nostavat kylkiluita ja tekevät tilaa rintakehälle. Uloshengitysilihakset ovat

rentoutuneita valmiita aloittamaan elastisen uloshengitysprosessin, ja sisäänhengityslihakilla on mahdollisuus hidastaa omaa rentoutumistaan. Tässä tilanteessa kaikki hengityslihakset (sisään- ja uloshengityslihakset) pääsevät tarvittaessa osallistumaan ilmanpaineen säätelyyn uloshengityksessä, ja siten ilmanpaineen optimaalinen säätely on mahdollista. Syvähengitys tuo myös kapasiteettia äänen volyymin kasvattamiselle ilmanpaineen noston myötä. Tällä hengitystavalla on myös todettu olevan suotuisia vaikutuksia äänihuulten värähtelyolosuhteisiin. (Laukkanen & Leino 2001, 29.)

Oopperalaulajien oletetaan tarvitsevan laadukasta syvähengitystä pystyäkseen laulamaan vaativaa ohjelmistoa. Kuitenkin ammattioopperalaulajilla on mitattu hyvin erilaisia hengitystapoja. Tutkimuksilla ei ole voitu osoittaa erilaisten hengitystapojen yhteyttä äänenlaatuun (Laukkanen & Leino 2001, 30). Laulamisen yhteydessä puhutaan usein hengitystuesta. Hengitystuki tai tuki ovat yhä termeinä ristiriitaisia ajatuksia herättäviä laulajien keskuudessa. Oleellista hengityksessä on sen kyky tuottaa ja ylläpitää sopivaa ilmanpainetta.

3.2.2 Äänilähde

Kurkunpäässä olevat äänihuulet toimivat laulamissa oskillaattorina eli äänilähteenä. Äänihuulten värähtely saa aikaan jaksoittaisen ilmanpaineen vaihtelun, joka kuullaan äänenä. Äänihuulivärähtely on kaksivaiheinen siten, että äänihuulten alapinnat eroavat toisistaan ennen yläpintoja äänihuulten avautumisvaiheessa ja sulkeutumisvaiheessa äänihuulten alapinnat menevät yhteen ennen yläpintoja. (Laukkanen & Leino 2001, 37.) Tämän seurauksena ilmanpaine vaihtelee siten, että äänihuulivärähtely pääsee jatkumaan. Äänihuulivärähtelyn tapa muuttuu sävelkorkeuden noustessa. Falsettirekisterissä äänirako ei sulkeudu kokonaan (Sundberg 2001, 84).

Kurkunpään tasolla äänihuulivärähtelyssä ainoa aktiivinen, lihastyötä vaativa vaihe on äänihuulten lähentäminen toisiaan kohden. Äänihuulia toisiaan kohden lähentävät lihakset ovat adduktoreita. Näitä ovat suora kannurustolihas, ristikkäinen kannurustolihas ja tärkeimpänä rengasrusto-kannurustolihas. Adduktorit osallistuvat äänentuottoon tuomalla äänihuulia toisiaan kohti mahdollistaen värähtelyn. Äänihuulivärähtely päättyy, kun äänirako avautuu äänihuulten abduktori- eli loitontajalihaksen, takaisen rengasrusto-kannurustolihasen toimesta. (Laukkanen & Leino 2001, 35–37.)

Äänihuulivärähtely alkaa siis adduktoreiden lähentäessä äänihuulia toisiinsa. Adduktorivoimalla voidaan säädellä äänen laatua asteikolla vuotoinen – puristeinen. Adduktorivoiman sanotaan olevan ainoa lihastyötä vaativa vaihe äänihuulten lähentämiseksi. Äänihuulten lähentämiseen vaikuttaa kuitenkin myös rekisterin valinta. Alla kuvatut sävelkorkeuteen vaikuttavat muutokset kurkunpään lihastyössä liittyvät oleellisella tavalla myös rekisterin valintaan. Tuo lihastyö muuttaa äänihuulten kalvojen ominaisuuksia vaikuttaen äänihuulten lähentymiseen ja vuorovaikutukseen. Näillä kahdella tekijällä, adduktorivoimalla ja rekisterin valinnalla, on vaikutus äänihuuliraosta virtaavan ilmavirran voimakkuuteen. (Herbst 2017.)

Äänilähteitä on äänihuulten lisäksi äänielimistössä muitakin ja niiden avulla tuotetaan pääosin soinnittomat äänet (kuten k ja t), joita ei tässä yhteydessä nyt käsitellä. Äänihuulilla tuotetulla soinnillisella äänellä on kolme ominaisuutta, jotka ovat mielenkiintoisia analysoinnin kannalta: fonaatiotaajuus, fonaatiovoima ja sointiominaisuudet.

Sävelkorkeutta eli fonaatiotaajuutta (edellä esitelty F0) kontrolloidaan äänihuulten pituutta ja siten jäykkyyttä muuttamalla. Jäykkä kappale värähtelee nopeammin kuin veltto ja siten äänihuulia venyttämällä värähtelytaajuus ja sitä myötä kuultu sävelkorkeus nousee. Sävelkorkeutta nostaa myös värähtelevän massan pieneneminen. Kun ääniraon sulkua tehostetaan niin, että vain osa äänihuulista pääsee värähtelemään, sävelkorkeus nousee. Tämä mekanismi on käytössä korkeimmilla sävelkorkeuksilla, kun äänihuulten absoluuttinen pituus ei voi enää muuttua. (Laukkanen & Leino 2001, 42–43.) Matalimmilla sävelkorkeuksilla sävelkorkeuden säätelyyn osallistuu tyroarytenoideuslihas, joka on äänihuulten sisäinen lihas. Korkeammilla sävelkorkeuksilla sävelkorkeuden nostamisesta vastaa pääasiallisesti cricotyreoideuslihas, eli rengasrusto-kilpirustolihas. (am Zehnhoff-Dinnesen ym. 2020, 75.)

Fonaatiovoima tulee ilmanpaineesta, joka keuhkoilla on tarjota. Kurkunpään alapuolisen paineen kasvu johtaa lähtökohtaisesti äänen voimakkuuden kasvuun. Äänen kantavuuteen vaikuttavat muutkin seikat, joista selitetään hieman alempana enemmän. Paineen kasvu kasvattaa äänen taajuuden amplitudia (värähdyslaajuus), ja mitä voimakkaampi amplitudi on, sitä voimakkaampi ääni on. Sointiominaisuuksiin vaikuttavat itse äänihuulien rakenne sekä olosuhteet, jotka vallitsevat kurkunpäässä äänen syntyessä. Syntyvällä äänellä on perustaajuuden lisäksi harmoninen yläsävelistö, joka saa aikaan äänen yksilöllisen värin. Sointiin vaikuttavat jokaisen yksilölliset anatomiset ominaisuudet. Sointiin vaikuttaa myös se, miten ilmavirta pääsee vaihtelemaan äänihuuliraosta kulkiessaan. Jos ilmanpaine äänihuulien alapuolella on korkea ja äänihuulten

adduktoreiden voima iso, tulee ilmapvirtauksen pulssiampplitudista matala. Ilmapvirtauksen laatu vaikuttaa siis perustaajuuden amplitudiin eli äänen voimakkuuteen, mutta myös ratkaisevasti yläsävelistön voimakkuuksiin. (Sundberg 2001, 102.) Kun adduktiovoima on iso, pulssiampplitudista tulee siis matala, äänihuulisulusta pitkä, kurkunpään alaisesta ilmanpaineesta iso, äänenvoimakkuudesta pieni (sama, 106). Optimaalisen virtaavassa fonaatiossa pulssiampplitudista tulee korkea, äänihuulisulkuvaiheesta pitkä, äänenvoimakkuudesta korkea. Iso äänenvoimakkuus johtuu yläsävelistön vahvuuden lisääntymisestä ja siten äänen kantavuuden paranemisesta.

Kurkunpään tasolla ääneen vaikuttaa äänihuulikudoksen kimmoisuus (Laukkanen & Leino 2001, 35). Äänihuulivärähtely itsessään on ilmanpaineenvaihtelun ja lihaskudoksen kimmoisuuden tuottama prosessi. Oleellista kurkunpään toiminnassa fysiologisesti optimaalisen äänenkäytön kannalta on siis elastinen, joustava ja rento äänentuotto.

3.2.3 Ääntöväylä

Äänen kulkureittiä kurkunpäästä huuliin ja sieraimiin saakka kutsutaan ääntöväyläksi. Siihen kuuluvat kurkunpään eteisoncelo, nielu ja suu- ja nenäontelo. Ääntöväylä vahvistaa äänihuulissa syntyneen äänen osääneksiä siten, että kuultava ääni saa lopullisen muotonsa. Vokaalit ja kunkin äänen lopullinen ominaisväri muodostuvat tuolloin. Äänen muodostumiseen vaikuttavat niin sanotut artikulaatioelimet: kurkunpää, kieli, kitalaki, alaleuka ja huulet. Ääntöväylällä ja artikulaatioelimillä on myös tärkeä rooli soinnittomien äänteiden eli konsonanttien muodostamisessa. Tässä yhteydessä käsitellään kuitenkin pelkästään soinnillisia ääniä eli sitä, mikä lopulta erottaa lauluäänet toisistaan. (Laukkanen & Leino 2001, 61–65.)

Ääntöväylä vahvistaa äänihuulissa syntyvän äänen osääneksiä. Se, minkä taajuiset osäänekset vahvistuvat, riippuu ääntöväylän pituudesta ja muodosta. Ääntöväyläasetuksiksi kutsutaan ääntöväylän muokkaamista halutun äänen aikaansaamiseksi. Ääntöväylän vahvistamia osääneksiä eli resonanssitaajuuksia kutsutaan formanteiksi. Formantit eivät ole yksittäisten osäänesten voimistumia, vaan tietyille taajuusalueelle osuvien osäänesten voimistumisen mahdollistajia. Formanttien muodostamisella erotellaan toisistaan muun muassa vokaalit. Formantteja tutkittaessa on keskitytty viiteen ensimmäiseen formanttiin, koska niillä on kuulemisen kannalta suurin merkitys. Formanteista käytetään lyhennettyjä termejä F1–F5. Äänen perustaajuus merkitään tuolloin F0, kuten aiemmin on todettu.

Ääntöväyläasetuksin voidaan säädellä äänenlaatua ja äänen voimakkuutta. Ääntöväylän lyhentyessä äänen resonanssi- eli formanttitaajuudet nousevat. Ääntöväylän pituutta voidaan kasvattaa ja siten formanttitaajuuksia nostaa kurkunpäästä laskemalla, viemällä kieltä taaksepäin suussa ja työntämällä huulia eteenpäin. Tällöin ääni kuulostaa yleisesti ottaen tummalta. Ääntöväyläasetuksia muuttamalla vaikutetaan myös eri formanttitaajuuksiin. Suun aukaiseminen nostaa F1:n taajuutta ja kielen vieminen eteenpäin nostaa F2:n taajuutta. Väljien vokaalien F1 on siis korkeammalla kuin suppeiden vokaalien ja etuvokaaleiden F2 on korkeammalla kuin takavokaaleiden. (Laukkanen ja Leino 2001, 79–82.)

Kolmas formantti F3 on erityisen herkkä suun kohdalle, joka muodostuu alaetuhampaiden ja kielenkärjen välille. Jos kielen kärkeä vedetään taaksepäin ja tilavuus tässä kohdassa kasvaa, laskee F3:n taajuusalue. F4 on riippuvainen ääntöväylän pituudesta ja ääntöväylän mittasuhteista etenkin kurkunpään ontelossa ja sen läheisyydessä. F4:n taajuusaluetta voidaan muuttaa kurkunpään läpileikkauspinta-alaa muuttamalla. (Sundberg 2001, 132.)

Kurkunpään pystysuuntainen asento vaikuttaa äänen syntymiseen. Normaalisissa puheissa kurkunpään asento vaihtelee. Esimerkiksi i-vokaalia lausuesssa kurkunpää on korkeammalla kuin u-vokaalia lausuesssa. Laulopedagogit hakevat sopivaa kurkunpään asentoa ohjatessaan oppilaita optimaaliseen äänenkäyttöön. Kurkunpään nouseminen ei vain lyhennä ääntöväylää, vaan aiheuttaa myös nielun kaventumisen. Kurkunpään asento vaikuttaa formanttitaajuuksiin ei tavalla. Kun kurkunpää lasketaan, laskee F4 jonkin verran enemmän kuin F3. Tämä aiheuttaa näiden formanttien lähentymisen toisiinsa. (Sundberg 2001, 145.)

Ääntöväylän muokkautuva osa on vielä pehmeä kitalaki, joka nousee sisään hengittäessä. Laulopedagogit kehottavat oppilaitaan usein ”hämmentymään” tai ”haistamaan jotain tuoksua” sisäänhengityksessä saadakseen tämän kunnolla aikaan. Laulajien kasvoniilmeitä katsoessa nähdään usein aktiivisuutta nenän ja poskipäiden seudussa. Pehmeä kitalaki nousee sieraimien levittämisen ja poskipäiden kohottamisen seurauksena, vaikkakin itse kohottamisesta huolehtivat omat lihaksensa. Sieraimien levittämisen ja poskipäiden kohottamisen seurauksena on osoitettu pehmeän kitalaen nousevan ja nielun ja kurkunpään laajenevan. (Aura ym. 2018.)

Sundbergin teorian mukaan laulajan formantin muodostamiseen kuuluvat olennaisena laaja nielu-ilmiö ja kurkunpään laskeutuminen, ääniraon alainen resonanssi ja impedanssin sopivuus. Korkeilla säveltaajuuksilla, jotka ilmenevät sopraanoäänillä, laulajan formanttia ei enää muodostu,

vaan osäänekset vahvistuvat laajemmalla taajuusalueella. Tämä tuo mukanaan pohdinnan, tarvitseeko sopraanojen korkeilla äänillä tavoitella samoilla keinoilla äänen sointia kuin matalilla äänillä (Weiss, Brown & Moris 2001). Impedanssiin vaikuttaa suotuisasti sopivan kapea tila äänihuulten yläpuolella (Laukkanen & Leino 2001, 88).

3.2.4 Äänelimistön yhteistoiminta

Hengityselimistön, kurkunpään ja ääntöväylän yhteistoiminta on oleellista optimaalisen äänentuottamisen kannalta. Jos hengitysprosessi ei ole elastinen, vaikuttaa se kurkunpään toimintaan. Yleinen käsitys on se, että hengityksen ollessa muuta kuin edellä kuvattua syvähengitystä kurkunpää joutuu ottamaan suuremman roolin äänentuoton kontrolloinnista, ja se johtaa lihasjäykkyyksiin ja äänenlaadun heikkenemiseen. Jo aiemmin on mainittu, että äänihuulten adduktorilihasten liiallinen toiminta heikentää äänen kantavuutta. Mikäli ääni on jo lähtökohtaisesti heikompilaatuinen, joko liian paineinen tai vuotoinen, ei ääntöväyläasetuksilla voida tilannetta enää parantaa.

Niin sanotun trakeaalisen vedon katsotaan kuuluvan oleellisena osana laulamisen prosessiin. Kurkunpäässä on omat lihaksensa kurkunpään laskemista varten. Trakeaalisen vedon katsotaan syntyvän hengityselimistön yhteistoiminnasta. Laulajan hengittäessä sisään pallea laskeutuu ja laskien samalla myös kurkunpään trakeaaliseen vetoon. Palleen hitaampi nouseminen muiden hengityselimistön myös kontrolloidessa uloshengitystä saa aikaan sen, että myös kurkunpää pystytään pitämään alhaalla. (Herbst 2017.)

Artikulaatioelimistön toiminta vaikuttaa myös kurkunpäähän. Eri lihasten toiminnot ja elimien asennot vaikuttavat luonnollisesti toisiinsa pään ja kaulan alueella. Esimerkiksi kielen toiminta vaikuttaa kurkunpäähän ja sitä kautta äännön syntymiseen.

Syntyvällä äänellä on myös akustinen ja mekaaninen vuorovaikutus, johon vaikuttaa ääntöväylän pituus ja läpimitta. Pituus ja läpimitta vaikuttavat ääntöväylän vastukseen eli impedanssiin. ”Äänivirran” ollessa kyseessä impedanssi tarkoittaa suhdetta tuotetun ilmanpaineen ja ilmavirtauksen nopeuden välillä. Impedanssi vaikuttaa äänihuulista lähtevään ilmavirtauspulssiin, ja tätä kutsutaan akustiseksi interaktioksi. Jos impedanssi on liian suuri, ilmavirtauspulssit menettävät tehoaan ja äänen voimakkuus vähenee. Ääntöväylän impedanssi vaikuttaa myös äänihuulivärähtelyyn. Sitä kutsutaan mekaaniseksi interaktioksi. Eri kohtiin ääntöväylää tehdyillä

kapeikoilla voi olla vaikutusta impedanssiin. Tätä voidaan käyttää hyväksi äänen voimakkuuden lisäämiseksi. (Laukkanen & Leino 2001, 87–88.)

Tässä yhteydessä otan esiin lauluäänen vibraton, jonka syntymekanismi on monimutkainen. Vibrato on äänessä esiintyä nopea värähtely, jolle voidaan määrittää nopeus eli käytännössä taajuus (Hz) ja laajuus eli voimakkuus. Vibraton syntyyn vaikuttavat ääniraon alaisen paineen muutokset, ääniraon alaisen paineen hallinta ja ääntöväylän liikkeet (am Zehnhoff-Dinnesen ym. 2020, 81). Selkeää ja tarkkaa kuvaa vibraton synnystä ei ole kirjallisuudessa. Jossain yhteydessä oli maininta, että kurkunpään jäykkyys vaikuttaisi vibratoon. Mielenkiintoinen ilmiö on, että hengityselimistöllä on resonanssitaajuus, joka vastaa vibraton normaalia taajuutta (Sundberg 2001, 216). Vibraton nopeus vaihtelee laulajakohtaisesti, mutta länsimaisessa taidemusiikissa vibratoa, joka on hitaampi kuin 5,5 Hz, on pidetty epämiellyttävänä, ja kun vibraton taajuus ylittää 7,5 Hz, on ääntä pidetty hermostuneena (sama, 211). Vibraton taajuuden oletetaan olevan enemmän fysiologisesti kuin tyyllisesti määrittävä seikka muiden vibraton ominaisuuksien ollessa säädeltävissä (Manfredi ym. 2015). Vibraton voidaankin ajatella olevan fysiologisesta näkökulmasta vapaasti virtaavan äänen kruunu.

3.3 Äänen mittausmenetelmät

Kun siirrytään laulamisen ja äänentuoton fysiologiasta äänen mittausmenetelmiin, nousee kysymykseksi, mitä halutaan mitata. Lauluäänen tutkiminen on ollut hyvin sekalaista johtuen varmasti osittain laulumusiikin monimuotoisuudesta ja osittain siitä, että alalla ei ole sovittuja standardeja.

Termistö, jota laulamisen yhteydessä käytetään, on kirjava ja laaja. Tarkasteltuja ominaisuuksia ovat muiden muassa säveltasot, ääniala, sointuvuus, voimakkuuden vaihtelu, artikulaation selkeys, vuotoisuus, puristeisuus, narina, karheus, säveltason epätasaisuus, alukkeiden laatu, resonoivuus, kokonaislaatu, avoimuus, nasaalisuus, väri, selkeys, vibrato, sointitasapaino, resonanssi, hengityksen hallinta, äänen tasaisuus, kiristyneisyys ja sijoitus. (Kuoppala 2017.)

Eräs suomalainen tutkimus kartoitti laulunopettajien yleisimmin käyttämiä laulopedagogisia käsitteitä ja mielikuvia, jotta niille voisi tulevaisuudessa etsiä akustisia ja fysiologisia vasteita. Käytetyimpiä käsitteitä olivat hengitystuki, nielutila, inhalare la voce, äänen kärki, ydin, fokus ja resonanssi (Aura, Laukkanen & Ojala 2018). Näistä hengitystuki, nielutila ja resonanssi lienee

selkeitä käsitteitä. Inhalare la voce tulee italian kielestä ja tarkoittaa äänen sisään hengittämistä. Sillä pyritään kuvaamaan hengitystukea. Äänen kärjellä, ytimellä ja fokuksella tarkoitetaan luultavasti tasapainoista äänen tuottoa siten, että äänihuulisululla ja ääntöväylän vaikutuksella on sopiva suhde eli impedanssi on optimaalinen.

Lauluäänen ongelmien tutkimiseen on kehitetty erilaisia mittareita, jotka perustuvat väittämiin lauluäänen toiminnasta ja sen aiheuttamista tuntemuksista (esimerkiksi äänen väsyminen). Näiden ongelmien kautta aihetta lähestyttäessä voitaisiin saada arvokasta tietoa siitä, mitkä seikat eivät kuulu fysiologisesti optimaaliseen äänenkäyttöön, ja sitä kautta laajentaa tietämystä ja näkökulmaa. Ennen äänen kuuntelua ja akustiikkaa koskevien tutkimusmetodien tarkastelua käyn läpi äänielimistön toimintaa muulla tavalla mittaavia menetelmiä.

3.3.1 Äänielimistön toimintaa mittaavat menetelmät

Äänielimistön toimintaa voidaan tutkia monenlaisilla kuvantamis- ja mittausmenetelmillä. Käytössä ovat muiden muassa laryngoskopia, magneettikuvausmenetelmät ja elektromyografia (EMG). Nämä ovatkin olleet välttämättömiä välineitä äänen fysiologiaa tutkiessa. Tavoitteenani tässä työssä on keskittyä sellaisiin menetelmiin, joita voisi käyttää hyödyksi kehitettäessä mittaria laulunopiskelijan oman kehityksen seuraamiseen. Tämä tarkoittaa käytännössä akustisia menetelmiä, joiden pohjalle tarvitaan myös opettajan korvia eli kuulonvaraisten analyysimenetelmien läpikäyntiä. Seuraavaksi esittelen kuitenkin vielä mittausmenetelmän, jotta virtaavan äänentuoton prosessi ja merkitys tulisi vielä selkeämmäksi.

Äänen laatuun merkittäväällä tavalla vaikuttavaa ilmavirtausta ja sen vaihtelua voidaan mitata esimerkiksi virtausglottogramilla, joka ilmaisee, minkä verran ilmaa kullakin hetkellä ääniraosta kulkee. Se näyttää ääniraon sulkuajan, ilmavirtauksen muutoksen nopeuden ja ilmavirtaushuiput ja ilmaisee äänihuulivärähtelyn laatua. Virtausglottogrammin aaltomuodosta voidaan päätellä, sulkeutuvatko äänihuulet pulssien välissä ja kuinka nopeasti ne avautuvat tai sulkeutuvat. Esimerkiksi kun äänentuotto on hyperfunktionaalista ja paine suhteettoman suuri, virtausglottogrammin aallon amplitudi laskee. Kun taas paine on optimaalinen muihin olosuhteisiin nähden, aallon amplitudi kasvaa. Virtausglottogramista voi käydä myös ilmi, jos ääni on vuotava. (Sundberg 2001, 98–99.)

Virtausglottogrammia vastaava versio on elektrogloggografi (EGG), jossa äänihuulivärähtelyn laatua mitataan sähköisesti. Ääniraon sulkeutuminen näkyy EGG-signaalissa varsin luotettavasti. Sen sijaan ääniraon avautumisen alku- ja loppuhetken määrittäminen ei ole EGG-signaalissa varmaa. (Laukkanen ja Leino 2001, 152.)

Yllä mainitut mittausmenetelmät linkittyvät jo aiemmin esitettyyn adduktorilihasten toimintaan, joka säätelee ääniraon sulkua. Lisäksi ääniraon sulkeutumisen tapa on eri rekistereissä erilainen ja tämä vaikuttaa luonnollisesti virtausimpulsseihin. Kuten jo aiemmin todettiin, myös impedanssi vaikuttaa äänihuulien toimintaan ja siten myös virtausglottogrammin ja elektrogloggografian tuloksiin.

3.3.2 Kuunteluanalyysit

Kuunteluanalyysillä tarkoitetaan mitä tahansa analyysia, joka perustuu äänen kuunteluun. Jokaisella äänen kuuntelijalla on subjektiivinen näkemyksensä äänestä ja näin ollen kuunteluanalyysista tulee luotettavampi, jos analysointiin osallistuu useampia kuuntelijoita. Kuuntelemiseen perustuvat äänen tutkimusmenetelmät ovat usein monimuuttuja-analyyseja, joissa tarkastellaan useita äänen osa-alueita. Kuunteluanalyyseille ei ole vielä olemassa standardeja. Seuraavaksi esittelen kaksi erilaista kuunteluanalyysiä. Näiden poimintojen perusteella voi jo todeta, että kuunteluanalyysiin valittavat elementit on syytä valita tarkkaan ja ottaa mahdollisuuksien mukaan tarkasteltavaksi elementit, jotka ovat yksiselitteisiä.

Oatesin (2006) tutkimuksessa pyrittiin löytämään kattavaa arviointiskaala laululle. Skaalaan kuuluivat seuraavat tarkasteltavat elementit: yleiskuva, vibrato, resonanssitasapaino, äänen pyöreys, äänenkorkeus, hengityksen hallinta, tasaisuus koko äänialalla, jännitteisyys. Hengityksen hallinta -elementti poistettiin arviointiskaalasta, koska sen korrelaatio äänen tasaisuuteen ja vibratoon oli korkea. Palautteissa ääninäytteiden arvioijat myös sanoivat, että hengityksen hallintaa oli hankala arvioida pelkästään kuulonvaraisesti ja että termi oli epätarkka. Myöhemmin tarkasteltavat elementit vähentyivät viiteen: sopiva vibrato (appropriate vibrato), äänen pyöreys tai äänensävy (ring), sävelpuhtaus (pitch accuracy), tasaisuus koko äänialalla (evenness throughout the range) ja jännitteisyys (strain). Tutkimukseen osallistuneet ääninäytteitä arvioineet laulun ammattilaiset olivat sitä mieltä, että käytetyt parametrit olivat yksiselitteisiä ja toivat esille kaikki aspektit, joita on tarpeellistakin arvioida, kun pyritään saamaan mahdollisimman hyvä arvio lauluäänestä.

Kuoppala (2017) kehitti pro gradu -tutkielmassaan oman 22-tekijäisen analyysipohjan, jonka teoreettisena kehyksenä oli hänen tutkimansa aiemmin Laverin ja Trudgillin kehittämä malli. Nostan tämän esimerkiksi systemaattisesta äänen analysointimallista, joka ottaa huomioon myös äänen muokattavuuden, koska se on pedagogisessa mielessä kiinnostava. Mallissa erotellaan äänestä ne osat, jotka ovat pysyviä (äänen piirteet), mitkä lähes pysyviä ja vaativat pitkää harjoittelua muuttuakseen (äänen säädöt), mitkä ovat keskipitkiä ja mahdollista helpommin säätää (äänen sävy) sekä ne, mitkä ovat hetkellisiä (artikulaatio). Kuoppalalla oli omat perustelunsa tekijöiden sijoittamiselle kuhunkin sarakkeeseen. Osa tekijöistä sopi lähes pysyvään sekä keskipitkään sarakkeeseen yhtä lailla (kuva 1).

| Ääni Aika Säädettävyyys | Äänen piirteet pysyvä ei säädettävissä, ei opittavissa | Äänen säädöt lähes pysyvä | Äänen sävy keskipitkä mahdollista säätää, opittavissa | Artikulaatio lyhyt |
|-------------------------------|---|------------------------------|--|-----------------------|
| <i>Demografiset tekijät</i> | | | | |
| Ikä | x | | | |
| Sukupuoli | x | | | |
| Äänityyppi | x | | | |
| <i>Valinta</i> | | | | |
| Sävelkorkeus | | | x | |
| Voimakkuus | | | x | |
| Sijointus | Nasaalinen | | x | |
| | Kurkussa | | x | |
| | Takana | | x | |
| Selkeys | | | x | |
| Alukkeet | | | | x |
| <i>Ominaisuus</i> | | | | |
| Kiinteys | | x | | |
| Karheus | | x | | |
| Puristeisuus | | x | x | |
| Paineisuus | | x | x | |
| Metallisuus | | x | x | |
| <i>Taito</i> | | | | |
| Sointi | | x | x | |
| Sävelpuhtaus | | x | x | |
| Tasaisuus | | x | x | |
| Vibrato | | x | x | |
| Tuki | | x | x | |
| <i>Kokonaisvaikutelma</i> | | | | |
| Taito | | x | | |
| Laatu | | x | | |

KUVA 1. Lauluäänen ominaisuudet Kuoppalan valitsemana Laverin ja Trudgillin mallin mukaan. (Kuoppala 2017, 28)

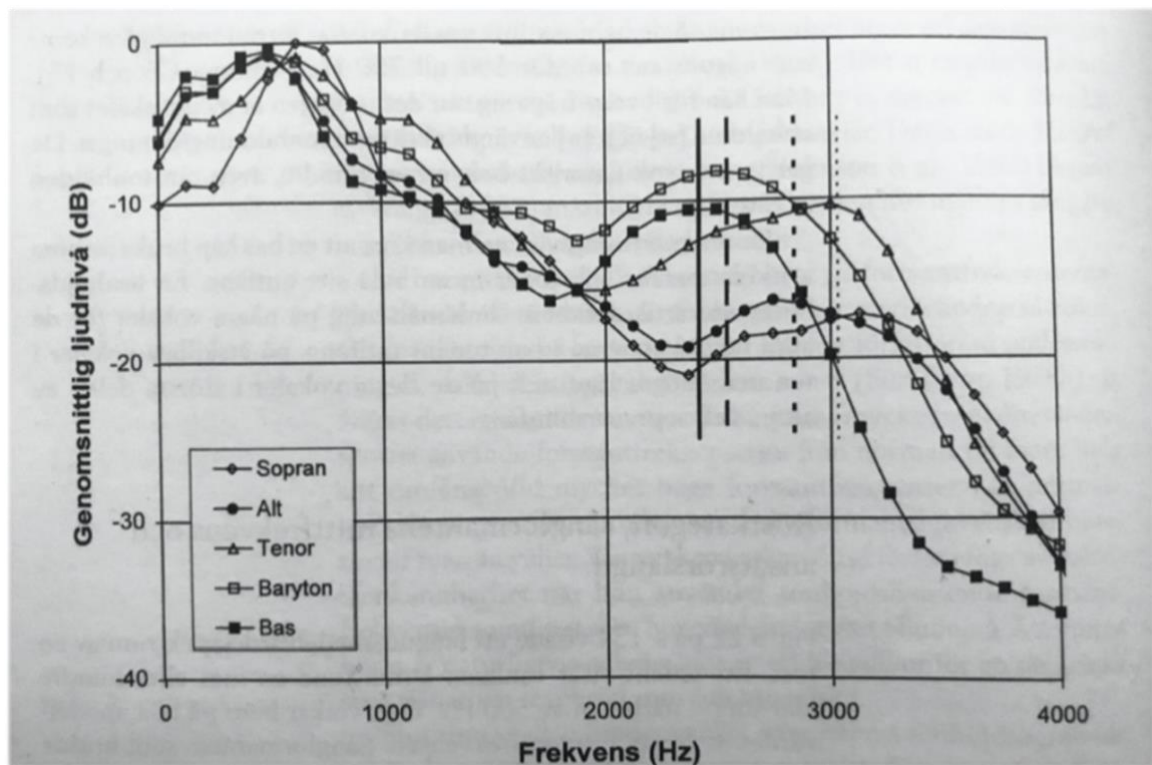
3.3.3 Akustiset analyysit

Lauluääni on kompleksista ääntä, jossa on runsas yläsävelistö. Tämä yläsävelistö voidaan mallintaa matemaattisen Fourier-analyysin avulla kuvaajaksi, joka havainnollistaa kullakin ajanhetkellä tuotetun äänen perustaajuuden ja yläsävelet sekä niiden voimakkuuksien suhteet. Fourier-analyysin avulla äänestä voidaan muodostaa kaksiulotteinen magnitudispektri, kolmiulotteinen spektrogrammi tai sonogrammi. Magnitudispektri, josta käytetään tässä työssä jatkossa nimitystä spektri, kuvaa yksittäisen lyhyen soivan äänen yläsävelrakennetta. Kolmiulotteisessa spektrogrammissa on joukko perättäisiä spektrejä, joten sillä voi analysoida ajassa tapahtuvia muutoksia. Sonogrammi puolestaan on kaksiulotteinen kuvaaja, jossa kolmantena ”ulottuvuutena” on kuvaajassa oleva väri tai sen intensiteetti. Sonogrammi soveltuu siis myös pidempien ääninäytteiden kuvaajaksi. (Lassfolk 2013.)

Keskiarvospektri voidaan laskea useina ajanhetkinä saaduista yksittäisspektreistä (Laukkanen & Leino 2001, 170). Keskiarvospekttriä käytetään puheentutkimuksessa. Yksittäisen ihmisen puheen keskiarvospektri ei muutu tietyn ajan jälkeen, joten puheessa esiintyvää yläsävelistöä voidaan pitää ihmisen pysyvänä ominaisuutena, persoonallisena äänenä. Spektristä on tullut merkittävä työkalu äänen tutkimisessa. Spektrin avulla tutkitaan käytännössä jo aiemmin mainittuja ääntöväylän resonanssitaajuuksia eli formantteja.

Osasävelistö vaikuttaa huomattavalla tavalla siihen, kuinka kantava ääni on ja mikä on äänen sävy tai sointi. Sointi määräytyy äänienergian jakautumisesta eri taajuusalueille. Energian jakautumisen laskemiselle on erilaisia tapoja. Jakautumista voidaan määrittää laskemalla keskimääräinen äänenpainetason ero taajuusalueiden välillä (esimerkiksi 0–2 000 Hz ja 2 000–4 000 Hz). Tätä eroa kuvataan kaltevuudella (slope). Aineistossa tuli myös toistuvasti esiin termi singing power ratio (SPR), joka ilmaisee edellä mainittujen taajuusalueiden korkeimpien huippujen eron desibeleinä. Silmämääräisesti äänienergian jakautumista voi tarkastella keskiarvospektrin muodosta.

Ääntä akustisesti tutkiessa on havaittu, että koulutetun klassisen laulajan ääneen muodostuu ns. laulajan formantti, joka ilmenee yläsävelistön voimistumisena n. 3 kHz:n alueella. Tämän ominaisuuden avulla äänestä tulee orkesterin yli kantava. Laulajan formantti on löydetty kaikilta muilta äänityypeiltä sopraanoja lukuun ottamatta. Laulajan formantin ajatellaan muodostuvan 2–3 (F3, F4 ja F5) formanttialueen yhteensulautumisen seurauksena. Sopraanoilla yläsävelistössä ei ole ollut nähtävillä samanlaista yhteensulautumista (kuva 2).



KUVA 2. Keskiarvospektri eri äänityypeille. Laulajan formantti on nähtävillä kaikissa kategorioissa lukuun ottamatta sopraanoa, jonka spektrissä on kaksi huippua. Formantti on voimakkaampi miesäänissä ja formantin huippu nähdään eri äänityypeillä eri kohdassa. (Sundberg 2001, 166)

Äänen häiriö (perturbaatio) on äänessä luontaisesti esiintyvää epäsäännöllistä perustaajuuden huojuntaa (jitter) ja äänenpainetason huojuntaa (shimmer). Terveesti tuotetussa äänessä näitä on vähäisessä määrin. Mikäli huojuntaa on kuultavissa määrin, on aistimus ihmiskorvaan yleensä särähtelyä tai rahinaa (Laukkanen ja Leino 2001, 106). Äänestä voidaan laskea vielä signaali-kohinasuhde (signal to noise ratio), jota äänen tutkimuksessa voidaan kutsua termillä harmonics to noise ratio, H/N-suhde (Kuoppala 2017). Kun H/N-suhde on iso, on ääni kirkas. Mitä enemmän noise- eli häly-komponenttia äänessä on, sitä vuotoisempi tai käheämpi se on.

Äänen vibratosta voidaan akustisesti määrittää nopeus ja laajuus. Nopeus tarkoittaa käytännössä taajuutta ja laajuus vibraton voimakkuutta, kuten aiemmin on jo todettu. Vibratosta voidaan mitata, kuinka nopeasti äännön alkamisen jälkeen vibrato syntyy ja kuuluuko vibrato äänessä äännön loppuun saakka. Vibraton laatua voidaan tarkastella myös sen säännöllisyyttä mittaamalla. Tämä tapahtuu mittaamalla vibratosta edellä esitellyt huojuntaparametrit, jitter ja shimmer. (Manfredi ym. 2015.)

3.4 Laulunopettajan korva

Ihmiskorva voi normaalisti kuulla äänen taajuusalueella 16–20 000 Hz. Ikääntyessä korkeimpien äänien kuulokyky heikkenee. Korva ei ole tasavertaisen herkkä kaikille taajuuksille. Äänialue 2 000–5 000 Hz on sellainen, minkä ihminen voi kuulla jopa 0 desibelin alapuolella. Äänen absoluuttinen voimakkuus ei siis aina kerro sen kuuluvuudesta ihmiskorvalle. Esimerkiksi taajuudeltaan 1 000 Hz:n ääni soitettuna 20 desibelin voimakkuudella vastaa taajuudeltaan 63 Hz:n ääntä, joka soitetaan 60 desibelin voimakkuudella. (am Zehnhoff-Dinnessen 2020, 53–54.)

Lauluäänistä korkeimpia ovat yleisessä tiedon mukaan sopraanon C6, jota korkeampia harvemmin kuulee. Koloratuurisopraanot laulavat tätäkin korkeammalle, mutta koloratuurisopraanoiden korkeimmatkin äänet jäävät vielä ihmisen herkkimmän kuuloalueen alapuolelle, sillä esimerkiksi sävelen G6:n taajuus on n. 1570 Hz. Puheäänien korkeus on tästä huomattavasti matalammalla. Tästäkin näkökulmasta ajatellen yläsävelistöllä on tärkeä merkitys äänen kuulemisen ja kuuntelukokemuksen kannalta. Ei liene sattumaa, että tärkeät yläsävelistön formanttialueet osuvat ihmisen tarkimman kuulon alueelle.

Opettajan omat kokemukset laulajana ja kuuntelijana vaikuttavat siihen, mitä hän lauluäänessä kuulee. Laulaja ei välttämättä itse kuule omasta laulunäytteestään, onko hengitystuki ollut mukana (Sonninen ym. 2004). Lauluääni voi kuulostaa tuelta, vaikka laulaja olisi pyrkinyt laulamaan ilman tukea. Niin kuin jokaisella laulajalla on oma yksilöllinen äänensä, niin myös opettajalla ainutlaatuinen tapa kuunnella. Omat lauluhihanteet vaikuttavat siihen, mikä äänessä miellyttää. Jotain tiettyä ominaisuutta kuunnellessa saattavat muut ominaisuudet olla vaikuttamassa tiedostamattomasti. Esimerkiksi vibraton laatua kuunnellessa voi kuunteluun olla vaikuttamassa lauluun valittu tempo ja laulajan ääniala.

4 ANALYYSI

4.1 Aineiston löytöjä

Tilastoanalyysia on hyödynnetty vähän musiikkitieteessä, eikä lauluäänen tutkimiseen ole kehitetty juurikaan monimuuttujamalleja. Jaana Kuoppalan pro gradussa (2017) on verrattu kuunteluanalyysin ja akustisen analyysin tuloksia toisiinsa tilastoanalyysilla. Tämä oli ainoa löytämäni työ, jossa tilastollisilla menetelmillä etsittiin ja löydettiin korrelaatio akustisten tekijöiden ja kuunteluanalyysin ominaisuuksien välille. Kuvassa 1 esiteltyjä kuunteluanalyysin ominaisuuksia Kuoppala oli yhdistänyt faktorianalyysilla kuudeksi faktoriksi, joita hän käytti alkuperäisten ominaisuuksien lisänä verratessaan kuunteluanalyysin tuloksia akustiseen analyysiin. Työssä Kuoppalan lopullisissa tilastollisissa malleissa perustaajuutta selitti luonnollisesti sävelkorkeus, äänenpainetasoa metallisuus, äänenpainetason eroa (singing power ratio) nasaalisuus, perustaajuuden huojuntaa sointi ja voimafaktori (jota määrittivät alkuperäisistä ominaisuuksista sävelkorkeus, voimakkuus, nasaalisuus, alukkeet, paineisuus ja metallisuus), äänenpainetason huojuntaa sävelkorkeus ja selkeys sekä H/N-suhdetta tukifaktori (jota määrittivät selkeys, alukkeet, kiinteys, vibrato ja tuki).

Tutkimuksissa on aiemmin todettu useita eroavaisuuksia ammattilaislaulajien ja ei-laulajien välillä. Näitä ovat hengityskapasiteetin erot, erot perustaajuuden huojunnassa (jitterissä), tarkemmin määrittelemättömät fysiologiset erot, äänienergian jakaantumisen (singing power ratio) ja äänialan laajuuden erot (Dhanshree, Rohit & Rajashekar 2018). Vertailemalla näitä amatöörien ja ammattilaisten eroja sekä fysiologisten että akustisten tekijöiden osalta voidaan edelleen etsiä optimaalisen äänenkäytön mallia ja analysointimenetelmää.

Vibrato on ollut toinen keskeinen lauluäänen tutkimuskohde formanttien lisäksi. Viimeisimmäksi mielenkiinto on kohdistunut vibraton ominaisuuksista niin sanottuihin häiriötekijöihin, vibratotaajuuden ja -laajuuden huojuntoihin. Länsimaisten oopperalaulajien vibratossa esiintyy merkittävästi vähemmän huojuntaa kuin jazz-laulajien vibratossa (Manfredi ym. 2015). Tämä tukee aiempiakin havaintoja siitä, että taitavien oopperalaulajien vibrato on hyvin säännöllistä. Liedlaulun vibrato eroaa oopperalaulun vibratosta laajuudeltaan, mutta ei nopeudeltaan. Liedissä vibrato syttyy hitaammin kuin oopperassa (Johnson-Read ym. 2015). Tämä tukee ajatusta, että vibraton

nopeus on fysiologinen ominaisuus. Sen sijaan taitava laulaja pystyy säätelemään vibraton laajuutta ja syttymistä.

Eräessä suppeassa tutkimuksessa, jossa analysoitiin kiinalaisten oopperalaulajien laulunäytteitä keskiarvospektrein, kävi ilmi, että laulajien vibraton nopeus oli merkittävästi matalampi kuin länsimaisessa oopperalaulussa yleensä, n. 3,5 Hz. Laulajan formanttia ei perinteiseen tapaan muodostunut. Yhdessä ääninäytteessä laulajan formantin kaltainen spektrihuippu muodostui n. 3 300 Hz:n kohdalle eli huomattavasti korkeammalle kuin länsimaisen oopperan mieslaulajilla. Aikaisemmin on havaittu, että kiinalaisilla oopperalaulajilla kurkunpää on laulaessa ylempänä kuin länsimaisilla oopperalaulajilla. (Sundberg ym. 2012.)

4.2 Aineiston pohjalta esiin nousseet haasteet

Systemaattinen katsausartikkeli analysoi tutkimuksia, joissa lauluääntä oli mitattu akustisin analyysimenetelmin (Dhanshree ym. 2018). Artikkelissa todetaan, että lauluäänen tutkimuskenttä on laaja, eikä ole olemassa standardoituja, virallisia kriteerejä lauluäänen analysointiin. Syitä on monia. Yksi on se, että laulamisen genre vaikuttaa tuotettuun lauluääneen. Toisekseen analyysimenetelmiä on useita erilaisia. Tutkimuskentältä puuttuvat standardoidut normaalin lauluäänen kriteerit. Tarvitaan metodologisesti tarkempia tutkimuksia laulajan äänen akustista analyysia varten ja tiukempia kriteerejä äänen analysointiin.

Pettersonin (2013) opinnäytetyössään haastattelema tunnettu laulupedagogi Ritva Eerola on käyttänyt visuaalista palautetta (spektrogrammi) työssään laulunopettajana, ja hänen kokemuksiansa mukaan spektrogrammin käyttäminen ei korvaa palautetta opettajalta. Visuaalisen palautteen käyttö vaatii akustiikan tuntemusta. Esimerkiksi nasaalisuus näkyy akustisessa signaalissa samoilla alueilla kuin laulajan formantti (tosin laajemmalla alueella), ja tämä voi ohjata opiskelijaa harhaan. Eerolan mukaan spektri saattaa myös näyttää kauniilta ja optimaaliselta, vaikka ääni olisi tuotettu paineella ilman kunnollista hengityksen tukea. Spektrin tulkitsemisen rinnalla tulisi hänen mukaansa olla myös kuulohavainnon tulkinta ja kehon tuntemukset laulaessa. Akustiikan tuntemus ei ole Eerolan mukaan laulupedagogien keskuudessa sillä tasolla, että visuaalisen palautteen käyttö edes voisi yleistyä laulunopetuksessa. (Petterson 2013.)

5 POHDINTA

Länsimaisen taidemusiikin laulutapaa on tutkittu viime aikoina monipuolisesti ja aineistoa löytyy asiasta kiinnostuneelle paljon. Oma pyrkimyksenäni oli selvittää laulun fysiologian, kuulohavaintojen ja lauluäänen akustiikan yhtymäkohtia. Mahdollisuutta katsausartikkelin tekemiseen ei ollut ja kirjallisuuskatsauksestani tuli siten kuvaileva. Aineistonhakuprosessi on isossa roolissa siinä, mitkä asiat lopulta nousevat analyysissä esiin. Usein tutkimukset keskittyvät tiettyyn suppeaan alueeseen, mikä onkin yksityiskohtaisen tiedon löytämiseksi järkevää. Näistä tutkimuksista poimin muutamia mielenkiintoisia tarkasteluun. Laajamittaisia katsausartikkeleita ei omassa hakuprosessissani juurikaan löytynyt enkä päässyt katsausartikkeleita vertailemaan.

Laulamisen ihanteet ovat ajan saatossa jonkin verran muuttuneet. Kuitenkin oopperalauluperinne on pitkä niin länsimaissa kuin Kiinassakin. Näiden kulttuurien äänenkäytön erot mahdollistaisivat vertailevan tutkimuksen tekemistä. Pop-jazz-laulua on viime vuosina tutkittu runsaasti. Tässäkin on mahdollisuus vertailevaan tutkimukseen. Erilaisia äänenkäyttötapojen fysiologiaa vertaillen ja niitä akustisesti tutkien voitaisiin selvittää ja tarkentaa, miten fysiologiset tekijät korreloivat akustisiin parametreihin. Länsimaiselle klassiselle laululle löytyy ominaisuuksia, joille voisi asettaa standardit fysiologisesta näkökulmasta.

Vaikka hengitys on keskeisessä roolissa äänentuotonprosessissa, en kuitenkaan katsonut tarpeelliseksi esimerkiksi hengitysilhasten yksityiskohtaisempaa kuvailua tässä työssä. Seikat, jotka nousivat esiin äänen akustisessa analysoinnissa, liittyivät suurelta osin kurkunpään ja ääntöväylän toimintaan. Ei tule kuitenkaan unohtaa, että kurkunpään optimaalisen toiminnan edellytyksenä on hyvin säädelty hengitys. Luulen, että esimerkiksi vibraton syntymekanismien tarkemman selvittämisen jälkeen ymmärrämme äänelimistön yhteistoimintaakin enemmän.

Pedagogisesta näkökulmasta analyyseissa käy ilmi eritasoisia äänen ominaisuuksia: muuttumattomat, hetkelliset, helposti muutettavat ja pitkän prosessin muuttuakseen vaativat ominaisuudet. Monet ominaisuuksista osaamme laittaa suoraan oikeaan kategoriaan. Osa on kuitenkin hankalampi sijoittaa, etenkin helposti muutettavien ja pitkän prosessin muuttuakseen tarvitsevien ominaisuuksien välillä. Tämä oli mielestäni mielenkiintoinen näkökulma äänen ominaisuuksiin ja auttaa hahmottamaan äänenmuodostuksen opettelu prosessia.

Tässä opinnäytetyössä on tullut esiin äänen tutkimisen kannalta kolme vaihetta: fysiologia, kuulohavainto ja akustinen analyysi. Eräässä tutkimuksessa verrattiin kuulohavaintoja ja akustisen analyysin tuloksiin tilastanalyysin avulla. Mikäli tilastanalyysia jatkossa päädytään äänentutkimuksessa käyttämään, tulisi vertailuun ottaa myös fysiologiset tekijät.

Opinnäytetyön tekoprosessin aikana käsitykseni länsimaisen klassisen laulumusiikin alan laajasta termistöstä, vaihtelevista käytännöistä ja epätarkkuuksista vahvistui. Alalla ei ole yhteisesti sovittuja standardeja, vaikkakin vaikuttaa siltä, että viime aikoina tietoisuus on lisääntynyt ja laulun analysoinnin periaatteisiin on tullut selkeyttä. Spektrianalyysi akustisessa analyysissa on kansainvälisissä tutkimuksissa laajasti käytetty menetelmä. Laulun akustinen tutkimus onkin keskittynyt spektrin tutkimiseen. Lukuisia tutkimuksia löytyy myös vibratosta. Viime aikoina myös muista akustisesti tutkittavista ilmiöistä, kuten huojunnasta, on tehty julkaisuja.

Opinnäytetyötä laatiessani havahtuin siihen seikkaan, että ainakaan minun opintojeni aikana akustiikan opetusta ei laulunopiskelijoille ollut juuri ollenkaan. Vaikka käytössämme ei olisikaan laulamista analysoivia laitteita, on akustiikan lainalaisuuksien tuntemisesta hyötyä asioiden ymmärtämisessä. Osalle oppilaista mielikuviin perustuva opetus voi tuoda oivalluksia, mutta mielikuvat voivat olla toisaalta harhaanjohtavia. Tästä syystä asioiden konkretisointi akustiikan, fysiikan ja fysiologian käsitteiden avulla on tärkeää. Vaikka puhutaan taiteesta, on laulu kuitenkin myös fyysikaalinen ilmiö ja laulaminen on fysiologinen tapahtuma. Fysikaalisten ja fysiologisten seikkojen ymmärtäminen ei auta pelkästään laulajaa itseään vaan myös opettajaa ohjaamaan oppilaitaan selkeämmin laulamisen tiellä.

Lopulta tullaan kysymykseen, voisiko yllä esiteltyjen asioiden ja pohdintojen perusteella vetää johtopäätöksiä siitä, onko mahdollista löytää äänen akustiikasta konkreettisia työkaluja laulunopiskelijalle. Äänen analysointiin on kehitetty erilaisia mittareita ja sovelluksiakin jo löytyy, joilla laulajat ja laulunopettajat voivat tarkistaa äänen akustisia parametreja. Uskoisin, että tulevaisuudessa olisi mahdollista nykyteknologian avulla pystyä kehittämään mittaria vielä pidemmälle ja paremmaksi. Tällainen olisi mittari, joka pystyy ottamaan huomioon useampia parametreja ja yhdistelemään näitä. Näihin voisivat kuulua äänen spektrin lisäksi vibraton laatu, äänen perustaajuuden ja voimakkuuden huojunta, vibraton huojunta ja H/N-suhde. Tätä ennen tulisi tehdä lisää tutkimusta fysiologisten tekijöiden akustisista vasteista. Tekoälyä on kehitetty muun muassa äänihäiriöiden diagnostiikkaan (Linder ym. 2008). Mielenkiintoinen ajatus on, voisiko tällaista tekoälyä eli neuroverkkoa (neural network) kehittää myös lauluäänen analysointia varten.

Analyysimenetelmiä kehitettäessä tulisi pitää mielessä ihmiskorvan kuulokyky ja herkkyysalueet. Mahdollisen kehitettävän mittarin pitäisi pystyä palvelemaan tehtävässään ihmisen korvan apuna tai korvaajana.

LÄHTEET

Aura, Maarit, Geneid, Ahmed, Bjørkøy, Kåre, Rantanen, Marita & Laukkanen, Anne-Maria 2018. The Nasal Musculature as a Control Panel for Singing – Why Classical Singers Use a Special Facial Expression? *Journal of Voice* 33 (4), 510–515.

Aura, Maarit, Laukkanen, Anne-Maria & Ojala, Juha 2018. Laulunopettajien yleisimmin käyttämät laulopedagogiset käsitteet. *Ainedidaktiikka 2*: 38–70. Tampereen yliopisto, Oulun yliopisto. Hakupäivä 16.11.2020. <https://journal.fi/ainedidaktiikka/article/view/73222>.

Dhanshree, R. Gunjawate, Rohit, Ravi & Rajashekhar, Bellur 2018. Acoustic Analysis of Voice in Singers: A Systematic Review. *Journal of Speech, Language and Hearing Research* 61, 40–51.

Hammar, Rauha 1962. *Laulufysiologian täydennetyt perusteet*. Hämeenlinna: Karisto.

Herbst Christian T. 2017. A Review of Singing Voice Subsystem Interactions – Toward an Extended Physiological Model of "Support". *Journal of Voice* 31 (2), 249.e13–249.e19.

Johnson-Read, Lynette, Chmiel, Anthony, Schubert, Emery & Wolfe, Joe 2015. Performing Lieder: Expert Perspectives and Comparison of Vibrato and Singer's Formant With Opera Singers. *Journal of Voice* 29 (5), 645.e15–645.e32.

Kuoppala, Jaana 2017. *Lauluäänen laatu ja ominaisuudet kolmen analyysimenetelmän valossa*. Helsingin yliopisto. Musiikkitiede. Pro gradu -tutkielma.

Lassfolk, Kai 2013. *Fourier-muunnos ja spektrianalyysikuvaajien tulkinta musiikintutkimuksessa, osa 1. Musiikin suunta*. Nro 1.

Laukkanen, Anne-Maria & Leino, Timo 2001. *Ilmeellinen ihmisääni*. Helsinki: Gaudeamus.

Linder, Roland, Albers, Andreas E., Hess, Markus, Pöpl, Siegfried J. & Schönweiler, Rainer 2008. Artificial Neural Network-based Classification to Screen Dysphonia Using Psychoacoustic Scaling of Acoustic Voice Features. *Journal of Voice* 22 (2), 155–163.

Manfredi, Claudia, Barbagallo, Davide, Baracca, Giovanna, Orlandi, Silvia, Bandini, Andrea & Dejonckere, Philippe H. 2015. Automatic Assessment of Acoustic Parameters of the Singing Voice: Application to Professional Western Operatic and Jazz Singers. *Journal of Voice* 29 (4), 517.e1–517.e19.

Oates, Jennifer M., Bain, Belinda, Davis, Pamela, Chapman, Janice & Kenny, Dianna 2006. Development of an Auditory-Perceptual Rating Instrument for the Operatic Singing Voice. *Journal of Voice* 20 (1) 71-81.

Pettersson, Liisi 2013. Teknologiaa laulutunnille? – Visuaalisen palautteen ohjelmat työvälteenä klassisen laulun opetuksessa. Turun ammattikorkeakoulu. Musiikin koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 15.9.2020. <https://www.theseus.fi/handle/10024/60185>.

Sonninen Aatto, Laukkanen Anne-Maria, Karma, K & Hurme, P 2004. Evaluation of Support in Singing. *Journal of Voice*. 19 (2), 223–237.

Sundberg, Johan 2001. Röstlära. Fakta om rösten i tal och sång. Laajennettu laitos. Tukholma: Proprius Förlag.

Sundberg, Johan, Gu, Lide, Huang, Qiang & Huang, Ping 2012. Acoustical Study of Classical Peking Opera Singing. *Journal of Voice*. 26 (2), 137–143.

Weiss, Rudolf, Brown, W.S. Jr. & Moris, Jack 2001. Singer's Formant in Sopranos: Fact or fiction? *Journal of Voice*. 15 (4), 457–468.

am Zehnhoff-Dinnesen, Antoinette, Wiskirski-Woźnica, Bożena, Neumann, Katrin & Nawka, Tadeus (toim.) 2020. *Phoniatrics I*. Berlin, Germany: Springer-Verlag GmbH.