# Amatöörikuoromusiikin puhtauden mittaaminen

Erkki Nurmi

Tutkielma

Syksy 2006

Musiikkikasvatuksen osasto

Sibelius-Akatemia

**SIBELIUS-AKATEMIA** **Tutkielma**

| **Työn nimi** | **Sivumäärä** |
|---|---|
| Amatöörikuoromusiikin puhtauden mittaaminen | 87+7 |
| **Laatijan nimi** | **Lukukausi** |
| Erkki Nurmi | Syksy 2006 |
| **Koulutusohjelma** | **Suuntutumisvaihtoehto** |
| Musiikkikasvatus | |


**Tiivistelmä**

Tutkimuksessa pyrittiin kehittämään ja testaamaan diskreettiin Fourier-muunnokseen perustuvaa menetelmää amatöörikuoron puhtauden mittausta varten. Kehitettyä menetelmää testattiin moniäänisellä signaaleilla. Ensisijainen tutkimustehtävä oli tutkia, mitä mittausten perusteella voidaan sanoa mittarista; miten hyvin mittari siis toimi puhtauden mittauksessa. Toinen tutkimustehtävä oli tutkia, mitä voidaan sanoa kuoron yleisestä puhtaudesta mittausten perusteella.

Menetelmän testimateriaaliksi äänitettiin Wiipurilaisen Osakunnan Laulajien harjoituksia ja konsertteja. Näistä valitut näytteet kuuntelutettiin Tuuli Lindebergillä, joka haastattelussa kommentoi näytteiden puhtautta. Tuulin kommenttien perusteella valittiin näytteistä katkelmat joihin mittausmetodia sovellettiin.

Fourier-muunnokseen perustuva menetelmä osoittautui melko lailla rajoittuneeksi puhtauden mittauksessa. Menetelmä oli myös liian kehittymätön, mikä teki mittaamisesta hyvin hidasta. Eniten mittaustulosten tulkintaa haittasi kuoron stemmojen sisäinen hajaannus.

Kuoron puhtaudesta havaittiin, että stemmojen sisäinen hajaannus näytti olevan vallitseva olotila, enemmän sääntö kuin poikkeus. Muista puhtauteen liittyvistä asioista ei voitu vetää yleisiä johtopäätöksiä.



**Hakusanat**

amatöörikuorot, puhtaus, signaalinkäsittely, Fourier-muunnos, spektrianalyysi


**Muita tietoja**

**Sisällys**

## 1 Johdanto ja tutkimusongelmat

Säestyksetön kuoro on virityksen ja puhtauden suhteen ainutlaatuinen kokoonpano, sillä lauluääni on yksi harvoista instrumenteista, joiden viritys on täysin vapaa. Tämän vuoksi kuoron puhtauden teorioissa ei voida tukeutua viritysjärjestelmiin, sillä kuoro ei noudata mitään varsinaista järjestelmää. Vireen vapaus aiheuttaa laulajana ajoittain leijumisen tunteen – kuin olisi osa laskuvarjohyppääjien muodostelmajoukkuetta, jossa kaikki yhdessä muodostavat kokonaisuuden, jonka osat voivat tukeutua vain toisiinsa. Siksi juuri kuoron puhtaus on kiinnostava aihe.

Kuoron puhtaus on aina ollut hieman mysteeri itselleni, sillä korvani on varsin kehittymätön kuulemaan puhtausasioita. Tästä sain kimmokkeen tutkia kuoron puhtautta teknisillä mittauksilla.

Tekniset mittaukset kuitenkin tarvitsevat mittarin. Olemassa olevat kyllin tarkat mittausohjelmat lähtevät kuitenkin siitä oletuksesta, että jokainen stemma (ellei jopa jokainen laulaja) on äänitetty eri raidalle, toisin sanoen tutkittavan materiaalin tulee olla yksiäänistä. Tämä olisi kuitenkin vaatinut kuoron viemistä studioon, jolloin tilanne ei olisi ollut luonnollinen eivätkä tulokset olisi kertoneet niinkään kuoron arkitodellisuudesta. Fourier-muunnoksella moniäänisestä signaalista voitaisiin saada tarvittavat tiedot ulos, mutta olemassa olevat ohjelmat eivät vaikuttaneet soveliailta tämän kaltaiseen käyttöön. Niinpä päätin Sampsa laineen kanssa tehdä oman Fourier-muunnokseen perustuvan mittausohjelman ja testata sen toimivuutta Wiipurilaisen Osakunnan Laulajien harjoituksista ja konserteista nauhoitetuilla näytteillä.

Ensimmäinen tutkimusongelma tässä tutkimuksessa onkin ”voidaanko Fourier-muunnokseen perustuvaa analyysitekniikkaa käyttää kuoron puhtauden mittaamiseen?” Tarkoituksena on tässä testata mittaria erilaisilla näytteillä ja tarkastella mittarin antamia tuloksia.

Toinen tutkimusongelma on ”jos menetelmää voidaan käyttää, mitä sen avulla voidaan sanoa WiOLin puhtaudesta äänitetyissä näytteissä?” Tämä tutkimusongelma on vahvasti alisteinen ensimmäiselle.

Tutkimukseen tarvittavia taustamateriaali liittyy puhtauteen, kuuloaistiin ja signaalinkäsittelyyn.

## 2 Tutkimuksen tausta

Oman taustani selvittäminen on tämänkaltaisessa tutkimuksessa hyvin tärkeää, sillä sen kautta määrittyy oma näkemykseni puhtaudesta, aiheen valinnan perusteet sekä näkökulma josta ilmiöitä katson. On tarpeellista selvittää taustani kuorolaisena sekä miten päädyin tutkimaan kuoropuhtautta tällä menetelmällä.

### 2.1 Oma kuorotaustani

Ennen opintojeni aloittamista Sibelius-Akatemissa olin laulanut kuoroissa melko vähän. Lukioajan olin mukana lukion kuorossa, välillä säestäjänä ja välillä kuorolaisena aina kulloisenkin tarpeen mukaan. Lauloimme lähinnä koulun musiikin kirjoista löytyviä kappaleita säestyksen kanssa. Kuorossa oli hyvin vähän miehiä, joskus jopa neljä mutta välillä vain kaksi. Koulun musiikin kirjoista löytyvä materiaali oli hyvin yksinkertaista, tavallisesti melodian alle oli kirjoitettu yksi tai kaksi lisä-ääntä. Kuorossa ei käytetty tavanomaisia nimityksiä stemmoille (sopraano, altto, tenori, basso), vaan puhuttiin vain melodiasta, kakkosäänestä ja kolmosäänestä. Miehet olivat hajautettuina eri stemmoihin naisten sekaan, mikä tarkoitti että joissain tapauksissa todellinen stemmojen määrä olikin kaksinkertainen kirjoitettuun nähden, sille miehet lauloivat omalta äänialaltaan, eli oktaavia alempaa kuin naiset. Tuolloin en tosin edes tiennyt, että miesten ääni soi oktaavia alempaa. Tämä ratkaisu toimi yllättävän hyvin, vaikka se muuttikin sointujen käännöksiä ja koko sovituksen luonnetta.

Lukioaikaan olin myös mukana Pohjois-Kymen musiikkiopiston
Jevgeni Onegin -oopperassa kuorolaisena. En olisi varmaankaan koskaan päässyt mukaan oopperakuoroon ellei heillä olisi ollut huutava pula mieskuorolaisista. Mukaan pääsin nuotinlukutaidon perusteella. Laulukokemuksella tai sen puutteella ei ollut paljoa merkitystä. Tämä ooppera oli varsinainen haaste amatöörikuorolaisille, mutta puolentoista vuoden harjoittelun tuloksena saatiin aikaan varsin kelvollinen esitys.

Muutettuani Helsinkiin opiskelemaan syksyllä 1996 päätin hakeutua mukaan kuorotoimintaan. Olin hetken aikaa mukana Akateemisessa Laulussa, mutta kuoro oli liian suuri minun makuuni. Talvella 1996–1997 Sibelius-Akatemian oopperakoulutus teki Mozartin Taikahuilun, jonka kuoroon pääsin. Kuorossa tutustuin Sampsa Laineeseen, joka houkutteli minut mukaan Wiipurilaisen Osakunnan Laulajiin (WiOL). Aloitin WiOLissa helmikuussa 1997 ja olen edelleen mukana. Lauloin alussa ykkösbassoa, mutta nykyisin laulan kakkosbassoa ja olen toiminut kuoron varajohtajana vuodesta 1999.

Ensimmäisen kuoronjohtokokemukseni sain siviilipalvelusvuotenani 1997–1998 Tampereen Yliopiston näyttelijäntyön laitoksessa. Johdin Tšaikovskin kuorokappaleen ”Taru” Tšehovin näytelmässä ”Lokki”, jossa toimin pianistikapellimestarina.

Tämän jälkeen olen toiminut WiOLin jokakesäisen kirkkovenekiertueen (Wene-WiOLin) taiteellisena johtajana yhdessä Tiina Tähkän kanssa vuodesta 2002. Wene-WiOL on itsenäinen kuoro, sillä on omat harjoitukset, ohjelmisto, johtajat ja talous. Jokainen kiertue on oma kokonaisuutensa, joten kuorolla ei ole virallisesti pysyviä jäseniä, vaan jokaisena vuonna projekti rakennetaan uudestaan. Tavallisesti harjoituksia on kerran kuussa vuodenvaihteesta alkaen, ja projekti huipentuu viikon mittaiseen kirkkoveneillä tehtävään kiertueeseen heinäkuun lopussa. Tavallisesti kiertue käsittää 3-4 kirkkokonserttia sekä mahdollisesti viihdekonsertin. Taiteellisia johtajia on kaksi, ja he ovat tasa-arvoisia; kumpikin johtaa noin puolet sekä kirkko- että viihdekonsertin kestoajasta.

WiOLin varajohtajana olen johtanut paljon kuoron pienempiä esiintymisiä, esimerkiksi elokuiset Art Goes Kapakka -tapahtuman konsertit. Olen myös johtanut kuoron harjoituksia johtajan ollessa estynyt. WiOLia johti tämän tutkimuksen aineiston äänityksen aikaan Päivi Kiiski ja syksystä 2005 alkaen johtajana on toiminut Jutta Seppinen.

Suhdettani kuorolaulun puhtausasioihin hallitsee pianistin taustani. Pääinstrumenttini on aina ollut piano, enkä ole koskaan soittanut puhaltimia tai jousisoittimia. Tästä johtuen sävelkorvani ei olekaan puhtauden suhteen kovin kehittynyt. Minulla ei myöskään ole absoluuttista sävelkorvaa. Pidän kuitenkin sävelkorvaani muutoin melko hyvänä; olenhan suorittanut Säveltapailu A:n arvosanalla 5/5. Kuulen kyllä puhtauden ja epäpuhtauden, mutta osaan vain harvoin sanoa, mikä stemma on epäpuhdas ja mihin suuntaan. Tämä pätee myös omaan laulamiseeni. Usein tiedän laulavani epäpuhtaasti, mutten tiedä olenko ylä- vai alavireinen. Pianistina kiinnitän myös paljon enemmän huomiota vertikaalisiin kuin horisontaalisiin asioihin. Tarkoitan tällä sitä, että varsinkin omassa laulamisessani kiinnitän huomiota yhtä aikaa soivien sävelten keskinäisiin suhteisiin mutten niinkään peräkkäisiin intervalleihin. Usein huomaan, että viritän itseäni jatkuvasti suhteessa sopraanoon eli tiedän mikä basson ja sopraanon välinen intervalli on ja viritän jokaisen laulamani sävelen uudestaan sopraanon mukaan. Tämä johtaa siihen, että erikseen tarkasteltuna oman stemmani puhtaus saattaa heitellä paljonkin. Uskoisin, että esimerkiksi viulisti tai huilisti kiinnittäisi huomiota puhtauteen aivan eri näkökulmasta. Minulla on paljon teoreettista tietoa sävelien ”oikeista sijainneista” äänenkorkeuden suhteen, mutta korvani kehittymättömyydestä johtuen en osaa juurikaan soveltaa tätä tietoa käytännön kuorotoimintaan. Tämä olikin suurin yksittäinen tekijä tutkimusaiheen valinnassa. Pyrin tässä tutkimuksessa kompensoimaan kehittymätöntä puhtauskorvaani mittaamalla puhtautta teknisesti.

### 2.2 Ohjelmointi Sampsa Laineen kanssa

Tutustuin WiOLin myötä tekniikan tohtori Sampsa Laineeseen. Huomasimme jossain vaiheessa olevamme molemmat kiinnostuneita puhdasvireisyydestä, ja matemaattisina luonteina keskustelimme paljon lukusuhteistoista ja viritysjärjestelmistä. Meillä ei kuitenkaan kummallakaan ollut selkeää kuulokuvaa siitä, miltä todella puhtaasti viritetty musiikki kuulostaa.

Ryhdyimme syksyllä 2002 tekemään projektia, jossa tarkoitus oli saada aikaan ohjelma, jolla midi-tiedostoja pystyisi virittämään halutun viritysjärjestelmän mukaisiksi. Kirjoitimme ohjelmaa Java-ohjelmointikielellä, sillä se sisälsi paljon valmiita funktioita midi-tiedostojen käsittelyyn, ja Javalla tehtynä ohjelmamme olisi melko vapaasti siirrettävissä alustalta toiselle. Sitä voisi siis ehkä käyttää jopa matkapuhelimissa ilman suurempia muutoksia. Teimme projektia ihan oman kiinnostuksemme vuoksi vapaalla ajallamme, ja ohjelma saatiinkin tehtyä, mutta huomasimme että puhdasvireisyys onkin kaikkea muuta kuin yksinkertainen asia. Ajatuksemme oli määritellä taulukko, jossa olisi annetun sävellajin mukaan jokaiselle sävelelle yksi oikea korkeus, mutta huomasimme pian, että sellainen ei ole mahdollista kuin äärimmäisen yksinkertaisissa tapauksissa. Kappale ”Ukko-Nooa” esimerkiksi voidaan esittää tällä tavalla, mikäli se on soinnutettu käyttäen vain I, IV ja V asteen sointuja, mutta vähänkin monimutkaisemman kappaleen kanssa tulee ongelmia. Viritysjärjestelmistä toki löytyy monimutkaisempiakin versioita, mutta huomasimme että mitään näistä ei voida juurikaan soveltaa kuoroympäristöön, sillä kuoroa ei täysin vapaaviritteisenä instrumenttina voida varsinaisesti ”virittää”, joten viritysjärjestelmät soveltuvat kuorolle hyvin huonosti. Vireen ja puhtauden osalta kuoro ”elää hetkessä”, eli jokainen sävel, riippumatta siitä miten monta kertaa kyseinen sävel on jo laulettu, viritetään aina uudestaan vastaamaan mahdollisimman hyvin sillä hetkellä vallitsevaan todellisuuteen.

Koska meillä molemmilla kiinnostus puhtausasioihin oli kuorolähtöistä, projekti lopahti kesken. Ohjelmasta saatiin aikaan toimiva versio, joka kuitenkin rajoittui yhden sävelkorkeustaulukon käyttöön yhdessä kappaleessa. Projekti kuitenkin herätti kiinnostuksen kysymykseen: ”Mitä kuoro sitten todella laulaa, mikäli se ei laula säveliä jonkin viritysjärjestelmän mukaisille paikoille?” Tästä alkoi suoraan tässä tutkimuksessa käytetyn ohjelman kehitystyö syksyllä 2003.

## 3 Aiemmat tutkimukset

Aiempia tutkimuksia tarkastellessani keskityn tutkimuksiin, joissa on joko käytetty Fourier-muunnosta äänen ominaisuuksien analysointiin tai mitattu äänisignaalista taajuuksia jonkin toisen tietoteknisen menetelmän avulla.

Jaan Ross (1990) on tutkinut 1980-luvun tietokoneilla tietynlaisten, äänenkorkeudeltaan liukuvien sävelten äänenkorkeuden vaihtelua vatjalaisissa kansanlauluissa. Hän on tutkinut äänenkorkeuksia yksiäänisestä signaalista, mutta mainitsee menetelmästä vain, että ”vastaukset tallennettiin tietokoneen massamuistiin yllä selostettua välineistöä käyttäen ja syötettiin taajuudet tunnistavaan ohjelmaan” (Ross 1990). Ohjelman käyttämää mittaustapaa ei kuvata tämän tarkemmin.

Pekka Mikael Laine ja Kai Lassfolk (2001) ovat tutkineet jousisoittimien äänen laadun arviointia spektrianalyysin avulla. Heidän tutkimuksensa tarkoituksena on ollut mm. selvittää eri soitinyksilöiden äänen laadun eroja lyhyen aikavälin Fourier-muunnoksien avulla tutkien vapaiden kielin ääniä ja niiden yläsävelsarjoja. (Laine & Lassfolk 2001). Heidän mittausmenetelmänsä on hyvin samankaltainen kuin tätä tutkimusta varten kehitetty, joskin he tutkivat ääninäytteiden kolmiulotteisia spektrogrammeja visuaalisesti, kun taas tässä tutkimuksessa pyritään saamaan Fourier-muunnosten tuottamasta datasta erotettua selkeitä lukuarvoja eri äänien taajuuksille.

Alain de Cheveigné (1993) on tutkinut tapoja erotella yhtäaikaisia ääniä ja mitata näiden perusäänesten taajuutta. Hän rajaa tutkimuksensa puheen tutkimiseen. Hänen aineistonsa koostuu näytteistä, joissa kaksi ihmistä puhuu yhtäaikaa. De Cheveigné esittää metodin, jolla nämä puhujat pystytään erottamaan toisistaan ja voidaan mitata kummankin puheäänen perusäänen korkeus. Menetelmä perustuu äänien erottelemiseen ja niiden tutkimiseen erikseen, jolloin signaali on aluksi moniääninen, mutta analyysiä varten se hajotetaan ikään kuin yksiäänisiksi signaaleiksi. Tutkimuksessa esitetty menetelmä on monimutkainen, ja sen käyttäminen vaatisi laajaa signaalinkäsittelyn tuntemusta. (de Cheveigné 1993.)

Judith C. Brown ja Bin Zhang (1991) ovat tutkineet taajuuksien mittaamista musiikkisignaaleista autokorrelaation avulla. Heidän tutkimuksensa keskittyy yksiäänisiin signaaleihin. He mittaavat taajuuksia viululla, pianolla ja huilulla soitetuista asteikoista ja tarkastelevat mittaustulosten paikkansapitävyyttä kahdella hieman erityyppisellä autokorrelaatiomenetelmällä. He toteavat autokorrelaation erinomaiseksi menetelmäksi taajuuksien mittaamiseksi yksiäänisistä musiikkisignaaleista.

Manuel Davy, Simon Godsill ja Jérôme Idier (2006) tutkivat useiden musiikin parametrien, mm. taajuuden mittaamista Bayes-analyysin avulla. Bayes-analyysi tutkii todennäköisyyksiä huomioiden kvantitatiivisen aineiston lisäksi myös aiemman tiedon aiheesta. Tutkijat pitävät Bayes-analyysiä luontevana lähtökohtana musiikkisignaalien tutkimisessa, sillä musiikkisignaaleista on paljon etukäteistietoa. Toisin sanoen musiikkisignaaleissa ennustettavuuden määrä on suuri monissa eri parametreissa. Tutkimuksessa aineistona on enintään neliäänisiä soitinmusiikkisignaaleja. (Davy, Godsill & Idier 2006.)

Anssi Klapuri on väitellyt Tampereen teknillisestä yliopistosta aiheenaan musiikin automaattinen nuotintaminen. Hän jakoi ongelman kahteen osaan: rytmin ja sävelkorkeuden tunnistamiseen. Rytmin tunnistaminen onnistui hyvin, samoin kuin yksittäisten sointujen sävelten tunnistus, mutta kokonaista kappaletta ei pystytty luotettavasti nuotintamaan. Lyömäsoittimet peittivät usein sävelkulut, eikä ohjelma onnistunut muodostamaan osista kokonaisuutta. (Korteila 2004.)

## 4 Puhtaudesta

Puhtaus yleisenä käsitteenä liittyy lähinnä hygieniaan. Siinä yhteydessä puhtaus ilmenee lian, ts. epäpuhtauden vähyytenä. Mielestäni musiikissa puhtaus on samankaltainen ilmiö, eli se määrittyy epäpuhtauden kautta. Kun puhutaan nimenomaan sävelkorkeudellisista asioista, epäpuhtaudesta puhutaan yleisessä kielessä ”epävireisyytenä” tai laulamisena tai soittamisena ”nuotin vierestä”. Mielestäni ilmaus ”nuotin vierestä” on hämmästyttävän totuudenmukainen kuvaus epäpuhtaudesta laulumusiikissa.

Mutta missä on tämä ”nuotti” jonka vierestä epäpuhtaasti laulava laulaja laulaa? Mikä on siis puhtauden ideaali, sävelen oikea paikka kussakin tilanteessa? Tällaisia ideaaleja on olemassa useita, eikä mikään niistä ole aina ja kaikkialla oikea vastaus. Otan tässä tutkimuksessa huomioon ne kolme järjestelmää, jotka Fougstedt (1950), Tolonen (1958) ja Alldahl (1990) huomioivat puhuessaan kuorolaulun puhtaudesta: ns. puhtaan virityksen, pythagoralaisen virityksen sekä tasavireisyyden. Puhdas viritys on Fougstedtin käyttämä termi, samaa järjestelmää Tolonen kutsuu nimellä yläsävelinen järjestelmä ja Alldahl käyttää termiä ”ren stämning”. Fougstedt kutsuu vain puhdasta viritystä luonnonpuhtaaksi, kun taas Tolonen pitää sekä puhdasta (yläsävelistä) että pythagoralaista viritystä luonnonpuhtaina. (Fougstedt 1950, 25–39; Tolonen 1958, 47–53; Alldahl 1990, 10–16.)

### 4.1 Osaäänessarja

Kaikki tonaalinen musiikki perustuu pohjimmiltaan osaäänessarjaan. Osaäänessarjaa kutsutaan myös osasävelsarjaksi tai yläsävelsarjaksi. Kaikilla musiikillisilla äänillä, joita voidaan kutsua nimellä ”sävel” on osaäänessarja. Jouko Tolonen (1969) toteaa, että ”sävel koostuu aina useammista värähdysluvuiltaan toisiinsa nähden kokonaislukusuhteisista ääneksistä eli periodisista osaääneksistä” (Tolonen 1969, 75). Osaäänessarjasta kuullaan varsinaisena sävelkorkeutena ainoastaan sen alin äänes, jota kutsun perusääneksesksi. Perusääneksestä käytetään myös termiä ”F(0)” (Ross 1990). Yhden sävelen osaäänessarjasta nähdään osa kuviossa 1.


KUVIO 1. Suuren C-sävelen osaäänessarja.

Käytän tässä tutkimuksessa useimmiten nimitystä ”osaäänessarja” sillä muut vaihtoehdot saattaisivat olla harhaanjohtavia. Yläsävelsarjasta puhuttaessa yläsävelsarjaan ei usein mielletä kuuluvaksi ensimmäistä osaäänestä, jolloin sävelen ensimmäinen yläsävel onkin toinen osaäänes (Backus 1969, 96). Osasävel -termi taas saattaa tuottaa moniäänisestä signaalista puhuttaessa mielikuvan minkä tahansa tyyppisestä osasta koko äänimaisemaa, esimerkiksi ykkösalton sävelestä jollain hetkellä.

Sarjan osaäänekset ovat taajuudeltaan alimman ääneksen monikertoja. Jos esimerkiksi perusäänes on 110Hz, seuraavat osaäänekset ovat 220Hz, 330Hz, 440Hz jne. Näin ollen osaääneksen taajuus sarjan sisällä on suoraan verrannollinen osaääneksen järjestysnumeroon. Osaäänesten taajuuksien suhdelukuja laskiessa voidaan siis tarkastella pelkkiä järjestysnumeroita, esimerkiksi viidennen ja kolmannen osaääneksen taajuuksien suhde on 5 : 3.

### 4.2 Intervallien suhde osaäänessarjaan

Kuvion 1 osaäänessarjasta saadaan suoraan tietynlaiset prototyypit eri intervalleille. Sarjan alkupäässä intervallien yhteys osaäänessarjaan on hyvin yksiselitteinen, ja yhteys hämärtyy sarjassa edettäessä. Oktaavista kaikki ovat yksimielisiä, oktaavi vastaa siis taajuuksien suhdetta 2:1 (mm. Blackwood 1985, 6), eli oktaavissa ylemmän sävelen taajuus on kaksi kertaa alemman sävelen taajuus. Oktaavilla on intervallien joukossa erityisasema: oktaavin päässä toisistaan olevia säveliä kutsutaan samalla nimellä. Oktaavin päässä toisistaan olevat sävelet ovat siis hyvin samankaltaisia, niillä on sama ”sävelyys”. Oktaavin erityisasema ilmenee niin monella tasolla musiikissa, että koko ilmiötä on joskus vaikea havaita. Esimerkiksi minkä tahansa soinnun tulkitaan pysyvän samana vaikka sävelten oktaavialaa vaihdeltaisiin, kunhan alin sävel ei vaihdu. Absoluuttisen sävelkorvan olemusta on selitetty muun muassa äänenkorkeuden kaksikomponenttiteorialla, jonka mukaan sävelkorkeuden havainto jaettaisiin kahteen tekijään: korkeuteen (joka vastaa absoluuttista sävelkorkeutta) sekä sävelyyteen (esim. ”c-mäisyys”) (Pola 2004). Tämäkin viittaa oktaavin erityisasemaan intervallien joukossa. Tolonen (1969) puolestaan kiistää, että oktaavilla olisi erityisasemaa intervallina, sen sijaan hän tulkitsee oktaavin ”yksinkertaisesti priimin liuentumamuodoksi” (Tolonen 1969, 138–139).

Myös kvintin ja kvartin suhteen ollaan yksimielisiä: kvintin puhtain muoto on sävelten taajuuksien suhteena 3:2 ja kvartin 4:3. Pythagoralaisessa virityksessä kaikki muut intervallit rakennetaan oktaavin, kvintin ja kvartin avulla. Tämän voi ajatella niin, että pythagoralainen viritys käyttää osaäänessarjasta vain neljän ensimmäisen osaääneksen keskinäisiä suhteita. (Tolonen 1969, 10–11).

Tersseissä ja seksteissä on jo eroja. Osaäänessarjassa suuri ja pieni terssi saavat suhdeluvut 5:4 ja 6:5 ja niiden käänteisintervallit pieni ja suuri seksti 8:5 ja 5:3. Näitä intervalleja käytetään puhtaassa virityksessä, mutta pythagoralaisessa virityksessä suuri ja pieni terssi ovat 81:64 ja 32:27. Tämä saadaan siten, että otetaan esim. $c^1$:ltä neljä puhtaan kvintin kokoista askelta ylöspäin, jolloin tullaan $e^3$:lle. Näin saadun $e^3$:n korkeus suhteessa $c^1$:hen saadaan seuraavasti: koska $g^1$:n suhde $c^1$:hen on 3:2, $g^1$:n taajuus on 1,5 kertaa $c^1$:n taajuus. Koska $d^2$:n taajuus on myös 1,5 kertaa $g^1$:n taajuus, $d^2$ on 1,5 * 1,5 = 2,25 kertaa $c^1$:n taajuus. Otetaan tästä vielä kaksi kvinttiä ylöspäin, jolloin $e^3$:n taajuus on 1,5 * 1,5 * 1,5 * 1,5 = $1{,}5^4$ = 5.0625 kertaa $c^1$:n taajuus. Sama onnistuu helpommin päässälaskuna, kun käytetään kertoimena intervallien suhdeluvusta saatua murtolukua eli $(3/2)^4 = 3^4/2^4 = 81 / 16$. Nostetaan $c^1$:tä kahdella oktaavilla, jolloin kerrotaan nimittäjä neljällä (oktaavin suhdeluku on 2:1, jolloin kaksi oktaavia on $(2/1)^2 = 2^2 = 4$) ja saadaan terssille $e^3$ - $c^3$ suhdeluvuksi 81/(16*4) = 81/64. Tästä huomataan, että puhuttaessa intervallien suhdeluvuista täytyy ottaa huomioon sävelasteikon logaritmisuus, josta seuraa että pinottaessa intervalleja päällekkäin kyse ei olekaan yhteenlaskusta vaan kertolaskusta. Samoin kun jostakin intervallista vähennetään toinen intervalli, kyse ei ole vähennyslaskusta vaan jakolaskusta. Laskettaessa esimerkiksi mikä on kvintin käänteisintervalli tulee oktaavista vähentää kvintti, jolloin saadaan (2/1) / (3/2) = 2 / (3/2) = 2 * (2/3) = 4/3. Pythagoralaisen järjestelmän pieni ja suuri seksti saadaan pythagoralaisten terssien käänteisintervalleina. Pythagoralainen pieni seksti on (2/1) / (81/64) = 128/81 ja suuri seksti (2/1) / (96/81) = 162/96 = 27/16.

Pythagoralainen järjestelmä ei tunne puhtaan virityksen terssejä 5/4 ja 6/5. Tämä voidaan todistaa tekijöihinjaon avulla. Kaikki pythagoralaisen järjestelmän intervallit rakentuvat oktaaveista, kvinteistä ja kvarteista. Näiden intervallien suhdeluvut voidaan jakaa tekijöihin siten, että tekijöinä on vain lukuja yksi, kaksi ja kolme sillä oktaavi on $\frac{2}{1}$, kvintti $\frac{3}{2}$ ja kvartti $\frac{4}{3} = \frac{2*2}{3}$. Tällöin myös kaikki näistä intervalleista muodostetut uudet intervallit voidaan jakaa samoihin tekijöihin, esimerkiksi pytagoralainen suuri terssi on $\frac{81}{64} = \frac{3*3*3*3}{2*2*2*2*2*2}$. Kokonaislukuja tekijöihin jaettaessa kaikki tekijät ovat alkulukuja ja tekijöihin jaon voi tehdä vain yhdellä tavalla, joten alkulukua viisi ei voida saada suhdeluvustoon mukaan käyttäen ainoastaan luvuista kaksi ja kolme muodostuvia suhteita. Näin ollen terssejä 5/4 ja 6/5 ei voida muodostaa pinoamalla oktaaveja, kvinttejä ja kvartteja päällekkäin, pinottiin niitä miten paljon hyvänsä.

Pohjimmiltaan ainoa ero pythagoralaisessa ja puhtaassa virityksessä on se, että pythagoralainen käyttää alkulukuja kaksi ja kolme, kun taas puhdas viritys käyttää alkulukuja kaksi, kolme ja viisi.

Puhtaalla viritysjärjestelmällä on selkeä yhteys Zarlinolaiseen viritykseen. Tolosen (1969) mukaan viidennen osasääneksen ottaminen mukaan säveljärjestelmään oli enimmäkseen Gioseffo Zarlinon (1517-1590) ansiota, sillä hän esitteli vakuuttavasti ja kokoavasti säveljärjestelmän, jossa vanhemmasta, pythagoralaisesta järjestelmästä poiketen suhteet 5:4 ja 6:5 tulkittiin konsonansseiksi. Ajatuksena tämä oli lähtöisin jo antiikista Ptolemaiokselta. Zarlino siis katkaisi osaäänessarjan ennen seitsemättä osaäänestä. Tämä järjestelmä on länsimaissa edelleen käytössä. (Tolonen 1969, 13-15)

Sekunneissa ja septimeissä vaihtoehtojen määrä lisääntyy entisestään. Pythagoralainen suuri sekunti saadaan kahden päällekkäisen kvintin avulla, ja se on 9:8. Puhtaassa virityksessä suurelle sekunnille on kaksi vaihtoehtoista laajuutta: 9:8 ja 10:9. Pythagoralaisesta suuresta sekunnista puhutaan puhtaassa virityksessä vahvana kokosävelaskeleena, ja 10:9 on heikko kokosävelaskel. Pythagoralainen pieni septimi on pythagoralaisen suuren sekunnin käänteisintervalli, eli 16:9. Puhdas viritys tuntee tämän lisäksi heikon kokosävelaskeleen käänteisintervallin, jonka suhdeluku on 9:5. Osaäänessarjasta löytyvä intervalli 7:4 eli ns. luonnonseptimi (ks. kuvio 1) näyttää pieneltä septimiltä, mutta se ei ole yleisessä käytössä, sillä se olisi pieneksi septimiksi erittäin vajaa ja soveltuisi hyvin huonosti 12-säveliseen oktaaviin (Tolonen 1969). Intervallina se sijoittuisi suuren sekstin ja pienen septimin välimaastoon. Myöskään yhdennestätoista osasävelestä johdetut intervallit eivät toimi 12-sävelisessä oktaavissa kovinkaan hyvin. Yhdestoista osasävel puolestaan sijoittuisi kvartin ja tritonuksen välimaastoon.

Pythagoralaisessa virityksessä pieni sekunti saadaan kvartin ja pythagoralaisen suuren terssin erona, ja se on (4/3) / (81/64) = 256/243. Puhtaassa virityksessä pieni sekunti saadaan kvartin ja puhdasvireisen suuren terssin erosta, joka on (4/3) / (5/4) = 16/15. Vastaavasti suuri septimi on pythagoralaisessa virityksessä (2/1) / (256/243) = 243/128 ja puhtaassa virityksessä (2/1) / (16/15) = 15/8. Pythagoralaista puolisävelaskelta kutsutaan myös heikoksi puolisävelaskeleksi ja puhtaan virityksen mukaista vahvaksi puolisävelaskeleksi.

Ylinouseva kvartti koostuu pythagoralaisessa järjestelmässä kolmesta vahvasta kokosävelaskeleesta. Sen suhdeluku on siis $(9/8)^3$ = 729/512. Vähennetty kvintti on tämän käänteisintervalli, (2/1) / (729/512) = 1024/729. Puhtaassa virityksessä taas ylinouseva kvartti on 45/32 ja vähennetty kvintti 64/45.

### 4.3 Tasavireisyys kuoromusiikissa

Tasavireisessä viritysjärjestelmässä oktaavi jaetaan kahteentoista yhtä suureen puolisävelaskeleeseen. Tällöin ainoastaan oktaavi pysyy täysin kokonaislukusuhteisena (2:1). Muita tasavireisen järjestelmän intervalleja ei voida kuvata murtolukusuhteilla, vaan jokainen puolisävelaskel on kooltaan $\sqrt[12]{2}$. Kaikki muut intervallit saadaan rakennettua näistä puolisävelaskelista, jolloin esimerkiksi suuri terssi on neljä puolisävelaskelta, eli $\left(\sqrt[12]{2}\right)^4 = \sqrt[3]{2}$.

Yhdyn Tolosen (1958) näkemykseen siitä, että kuoron kyseessä ollessa tasavireistä järjestelmää ei voida pitää kuoron virittämisen lähtökohtana. Jotta voitaisiin puhua puhtaudesta, intervallien sävelsuhteiden täytyy olla lähtöisin osaäänessarjasta. Tolosen mukaan lähtökohtana voidaan pitää tilanteesta riippuen joko puhdasvireistä tai pythagoralaista järjestelmää siten, että pythagoralaista käytetään useimmiten melodisissa sävelkuluissa ja puhdasvireistä pystysuorissa soinnullisissa tilanteissa. Tasavireinen järjestelmä taas on matemaattinen, likiarvoille perustuva järjestelmä, jota on vaikea toteuttaa kuorolaulussa. (Tolonen 1958, 51–52.)

Myös eriäviä näkemyksiä on esitetty. Barbour (1951) pitää tasavireistä järjestelmää ainoana puhtauden lähtökohtana kuoromusiikissa. Hän perustelee näkemystään tasavireisen järjestelmän asemalla ainoana standardin aseman saavuttaneena järjestelmänä. Hän myös toteaa, että termi ”a cappella” tarkoitti alunperin itsenäisen säestyksen puutetta eikä suinkaan täyttä säestyksettömyyttä. Tällöin kuoro joka tapauksessa virittäisi itsensä säestyssoitinten virityksen mukaiseksi. (Barbour 1951, 199–201.)

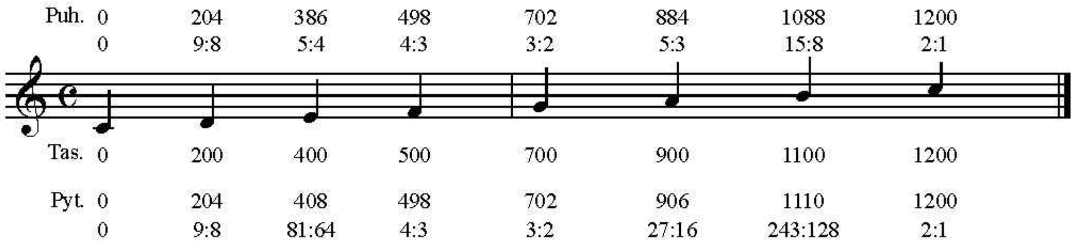
Minusta tasavireisyyden valitseminen puhtauden lähtökohdaksi vaikuttaa harkitsemattomalta ratkaisulta. Se voi olla perusteltavissa, mikäli musiikki on valtavan epäpuhdasta, jolloin on melko samantekevää mihin järjestelmään sitä verrataan. Tällöin epäpuhtaus olisi jo niin suurta, että puhuttaisiin jo vääristä äänistä eli korkeudellinen epätarkkuus olisi vähintään puolisävelaskeleen suuruista. Kuitenkin tällöinkin voidaan aivan yhtä hyvin verrata laulettuja säveliä puhdasvireisiin tai pythagoralaisiin sävelkorkeuksiin. Tasavireisyys on jo historiallisestikin kompromissiratkaisu, jolla saadaan yksi viritys toimimaan kiinteävireisillä soittimilla toimimaan kaikissa sävellajeissa. Säestyksetön kuoro ei kuitenkaan varsinaisesti noudata mitään viritysjärjestelmää sillä kuoroa ei voi virittää, vaan kuoro virittyy jokaisen laulajan säätäessä virettään jatkuvasti muuttuvan kuulokuvan mukaisesti. Tällöin on järkevää tarkastella puhtautta aidosti puhtaiden intervallien eli puhdasvireisten ja pythagoralaisten kautta.

### 4.4 Senttiluvut

Tasavireisten sävelkorkeuksien vertailussa pythagoralaisiin senttiluvut (c) ovat havainnollisia. Tässä ilmaisutavassa tasavireinen puolisävelaskel jaetaan sataan senttiin (100c). Näin ollen oktaavi on 1200c ja kaikki muut tasavireiset intervallit ovat pyöreitä satalukuja. Senttilukujen etu on siinä, että niillä laskettaessa intervalleja voidaan yhdistellä yhteen- ja vähennyslaskun avulla toisin kuin suhdeluvuissa. Esimerkiksi voidaan ottaa puhdasvireinen kvintti, joka on 702c. Kahdesta päällekkäisestä puhtaasta kvintistä saadaan 702c + 702c = 1404c, joka on suuri nooni. Vähennetään tästä oktaavi, ja saadaan 1404c - 1200c = 204c, joka on vahva kokosävelaskel (9:8). Senttilukujen huono puoli taas piilee siinä, että ne näyttävät hämäävästi siltä kuin tasavireiset intervallit olisivat pyöreinä satalukuina jollain tavalla ”puhtaampia” kuin puhdasvireiset tai pythagoralaiset. Esimerkiksi tasavireinen suuri terssi eli 400c näyttää paljon pyöreämmältä luvulta kuin puhdasvireinen suuri terssi eli 386c. Monissa tapauksissa on myös perusteltua käyttää intervallien suhdelukuja intervalleja yhdistettäessä. Senttiluvut sopivat kuitenkin oivallisesti taajuuksien mittaamiseen silloin, kun tarkoitus on saada selville kuinka paljon jokin sävel poikkeaa toisesta sävelestä eli silloin kun mitataan epäpuhtautta.

### 4.5 Diatoninen asteikko ja soinnut

Tähän mennessä läpikäydyistä intervalleista pystytään muodostamaan diatoninen asteikko kaikissa kolmessa järjestelmässä. Kuviossa 2 nähdään C-duuriasteikko, joka sisältää senttiluvut perussäveleen nähden kaikissa kolmessa viritysjärjestelmässä sekä puhdasvireisen ja pythagoralaisen virityksen mukaiset suhdeluvut.




KUVIO 2. C-duuriasteikko eri viritysjärjestelmissä. Puh. = puhdasvireinen, Tas. = tasavireinen ja Pyt. = pythagoralainen järjestelmä. (Alldahlin 1990, 15 ja 95 mukaan).

Kuviosta 2 huomataan, että senttilukujen käyttö mahdollistaa järjestelmien keskinäisen vertailun. Tarkasteltaessa asteikon perussävelestä lähteviä intervalleja havaitaan, että duuriasteikon neljännen ja viidennen sävelen korkeudesta sekä puhdasvireinen että pythagoralainen järjestelmä ovat yksimielisiä (498c ja 702c perussävelestä). Tasavireinenkin järjestelmä poikkeaa näistä arvoista vain kahdella sentillä. Tämänsuuruisen poikkeaman Tolonen (1958, 53) sanoo olevan lähellä korvan pienintä erotuskykyä, joten kuoromusiikissa tasavireinenkin kvintti on melkoisen puhdas.

Kuoromusiikin puhtaudesta puhuttaessa kiinnitetään erityisen paljon huomiota tersseihin. Tämä selittyy osittain sillä, että pienen ja suuren terssin kohdalla järjestelmien väliset erot ovat huomattavia. Pythagoralainen suuri terssi on 408c eli kahdeksan senttiä tasavireistä korkeampi eli laajempi. Puhdasvireinen taas on 386c eli neljätoista senttiä tasavireistä matalampi eli suppeampi. Fougstedt (1950, 39) ja Tolonen (1958, 54) kuvaavat pythagoralaista suurta terssiä duurisoinnuissa ”teräväksi”, ”voimakkaaksi” ja ”jännittäväksi” ja puhdasvireistä ”levolliseksi” ja ”rauhoittavaksi”. He toteavat, että kumpikin vaihtoehto voi olla ”oikea”, ja että on kuoronjohtajan vastuulla tehdä valinta näiden välillä. Tolonen toteaa kuitenkin, että mikäli duurisoinnussa terssi lauletaan korkeudeltaan näiden kahden välimaastoon eli välille 386c–408c, se ”tyydyttää meitä paremmin, kuin jos se joutuu tämän heilahdusvälin ulkopuolelle”. Tässä tapauksessa terssiä ei koeta niinkään epäpuhtaana, vaan ennemminkin neutraalina ja luonteettomana. Tämä johtuu siitä, että korvan toleranssi epäpuhtaudelle on tersseissä huomattavasti suurempi kuin vaikkapa kvintissä. (Tolonen 1958, 54.)

Pieni terssi määrittyy sekä pythagoralaisessa että puhtaassa virityksessä kvintin ja suuren terssin erotuksen kautta. Kenties juuri tästä syystä, eli alisteisuudesta suurelle terssille, johtuen pieni terssi ei ole saanut osakseen samankaltaisia luonnehdintoja kuin suuri terssi. Pythagoralainen pieni terssi on laajuudeltaan 294c ja puhdasvireinen 316c. Kuoronjohtajilta kuulee usein kehotuksia laulaa mollisoinnun terssi hieman korkeaksi, mikä selittyy sillä, että puhdasvireinen pieni terssi on 16c korkeampi kuin tasavireinen. Tämänsuuruinen ero on jo merkittävä.

Tässä tutkimuksessa keskityn tarkastelemaan vain kaikkein yksinkertaisimpia musiikillisia tilanteita, joten tätä syvällisempi viritysjärjestelmien analyysi ei ole tarpeen. Käytän sointupuhtauden mittaamisessa vertailukohtana duuri- ja mollisointuja pythagoralaisen ja puhdasvireisen järjestelmän mukaisissa muodoissaan, joita pidän näiden sointujen täysin puhtaina muotoina. Niissä melodisissa kuluissa, joita tässä tutkimuksessa käytetyllä menetelmällä pystytään mittaamaan, vertaan sävelkorkeuksia kuviossa 2 esitettyihin pudasvireisen ja pythagoralaisen diatonisen asteikon mukaisiin sävelkorkeuksiin. Monimutkaisemmissa tilanteissa kuten kromatiikassa ja modulaatioissa pyrin tekemään havaintoja sävelkorkeuksista vertaamatta niitä mihinkään tiettyyn ideaaliin, sillä tällaisissa tilanteissa vaihtoehtojen määrä kasvaa huomattavasti eikä yhtä oikeaa toimintatapaa ole useinkaan määriteltävissä.

Duuri- ja mollisoinnuista puhuttaessa on syytä huomata, että kuviossa 2 esiintyvä puhdasvireinen asteikko sisältää epäpuhtaan kvintin d–a, jonka laajuus on 680c. Tämän johdosta näillä sävelkorkeuksilla toteutettu duurin toisen asteen sointu on huomattavan epäpuhdas. Tolonen (1958, 52) tarjoaa ratkaisuksi kahta vaihtoehtoista sävelkorkeutta duuriasteikon toiselle sävelelle: 204c ja 182c. Fougstedt (1950, 36–39) puolestaan mieluummin nostaa soinnun muita säveliä soinnun puhdistamiseksi, sillä mikäli asteikon toinen sävel lauletaan toisen asteen soinnussa matalaksi, sointuyhdistelmä II–V aiheuttaa sävellajin laskemisen tai pakottaa nostamaan asteikon toista säveltä sointujen vaihtuessa.

Tämä duuriasteikon toisen sävelen ongelma olkoon yhtenä esimerkkinä ongelmista, joihin ajaudutaan pyrittäessä toteuttamaan orjallisesti jotakin tiettyä viritysjärjestelmää kuoromusiikissa. Puhtauden ideaali kuoromusiikissa on aina tapauskohtainen, ja monesti oikeita vaihtoehtoja on useita, jolloin puhtaus kytkeytyy tulkintaan: haetaanko vaikkapa erityisen voimakasta tai levollista sävyä. Puhtauden suhteen joudutaan myös usein tekemään kompromisseja tilanteissa, joissa on mahdotonta pitää kaikkia sointuja puhtaina sekä estää sävellajia laskemasta. Tolonen (1958) kehottavaakin kuoronjohtajia tekemään kappaleista ns. puhtausanalyysin, jossa jokaiseen säveleen merkitään haluttu sävelkorkeus. Tämä huomattavan matemaattinen tekniikka edellyttääkin kuoronjohtajalta perinpohjaista viritysjärjestelmien tuntemusta, eikä vielä takaa että toteutus paranisi lainkaan, mutta se on apuväline tarkkakorvaiselle kuoronjohtajalle ongelmapaikkojen etsimiseen ja ratkaisumallien hakemiseen. (Tolonen 1958.)

## 5 Kuuleminen

Puhtaudesta puhuttaessa täytyy ottaa huomioon myös tiettyjä kuuloon liittyviä tekijöitä. Olisi helppo ajatella kuuloaistia biologisena mikrofonina, joka vastaanottaa ilman värähtelyt ja välittää tiedon suoraan ihmisen tajuntaan, jolloin akustinen, fysikaalinen todellisuus vastaisi täysin kuuloaistin kautta havaittua todellisuutta. Mikäli näin olisi, musiikin puhtauden mittaaminen tietokoneella olisi hyvin suoraviivaista tutkimusta, sillä mittaustuloksista nähtävä todellisuus olisi samanlainen kuin kuuloaistin havaitsema todellisuus. Näin ei kuitenkaan ole, vaan korvan vastaanottamasta ilman värähtelystä on kuuloaistimukseen todella pitkä matka, jonka aikana informaatiota tulkitaan ja muunnetaan moneen kertaan. Tämä ilmiö kuuluu suurelta osin aivotutkimuksen piiriin, joten kuuloaistimuksen syntyä ei voida tässä tutkimuksessa kokonaisuudessaan selvittää, mutta muutamia sävelien havaitsemiseen liittyviä tekijöitä on syytä ottaa huomioon.

### 5.1 Osaäänesten kuulumattomuus

Kenties olennaisin ero musiikkiin liittyvässä kuulohavainnossa ja akustisessa todellisuudessa liittyy osaäänessarjaan. Kaikilla luonnossa esiintyvillä tiettynä sävelkorkeutena havaittavilla äänillä on osaäänessarja, mutta kuulemme ainoastaan yhden sävelkorkeuden, joka vastaa ensimmäistä osaäänestä eli perusäänestä. Tässä on kyse aivoissa automaattisesti tapahtuvasta informaation tulkinnasta, josta tietoisuutemme on täysin tietämätön. Perusäänes kuullaan jopa silloin kun se on sävelen osaäänessarjasta poistettu. Näin tapahtuu kun kuulemme esimerkiksi matalan miesäänen laulavan puhelimen tai matkaradion kautta, sillä niissä olevat kaiuttimet eivät kykene toistamaan matalia perusääneksiä. (Tolonen 1969, 90; Beament 2001, 46.)

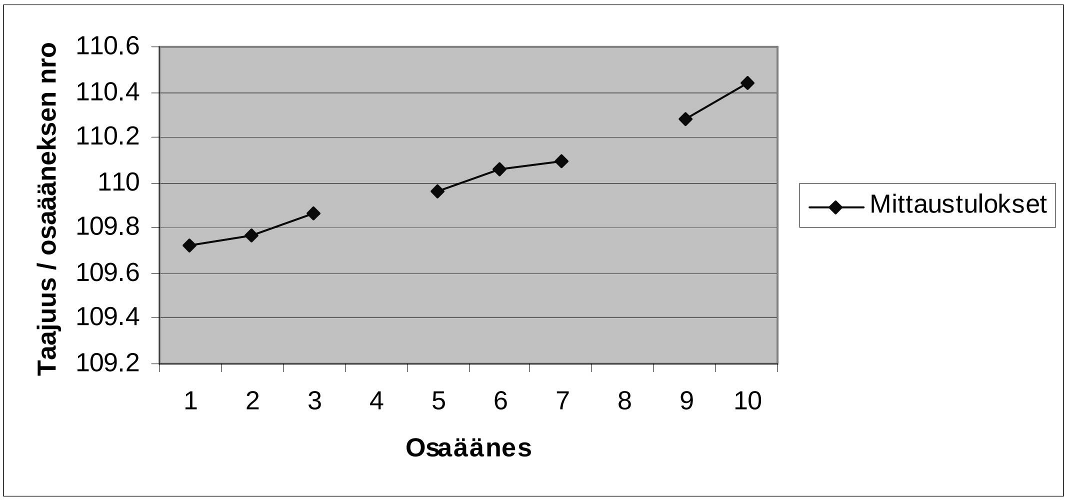
Teoreettisesti katsottuna osaäänessarjassa perusäänes on voimakkain, ja äänesten teho heikkenee tasaisesti sarjaa ylöspäin mentäessä. Todellisuudessa osaäänesten keskinäinen balanssi vaihtelee suuresti. Tolosen (1969, 89–90) mukaan voimakkain osaäänes on yleensä jokin neljästä ensimmäisestä osaääneksestä, mutta joissain soittimissa voimakkain voi olla jopa seitsemäs tai kahdeksas osaäänes. Lauluäänessä näyttäisi tämän tutkimuksen perusteella olevan hyvin yleistä että voimakkain osaäänes ei ole perusäänes, vaan esimerkiksi toinen tai kolmas osaäänes, ja balanssi näyttäisi riippuvan monista tekijöistä, esimerkiksi dynamiikasta, lauletusta vokaalista, äänialasta ja äänenmuodostuksesta. Osasävelten keskinäinen balanssi ei vaikuta kuultavaan äänenkorkeuteen, vaan äänenväriin (Beament 2001, 46). Tässä tutkimuksessa käytetyllä menetelmällä kyetään mittaamaan muidenkin osaäänesten kuin perusääneksen taajuutta, joten osaäänessarjan balanssivaihtelut eivät estä mittaamista.

### 5.2 Osaäänessarjan harmonisuus

Nykyisin tiedetään myös, että osaäänesten taajuudet eivät aina ole perusääneksen kokonaislukukerrannaisia, vaan ne voivat olla hieman ylä- tai alavireisiä. Yksi tunnettu esimerkki on piano, jonka ylemmät osaäänekset ovat kaikki hieman korkeampia kuin teoreettisessa osaäänessarjassa. Tämä johtuu kielimateriaalina käytetyn metallin jäykkyydestä, joka vaikuttaa kielen värähtelymekanismiin. Pianon alimmat kielet viritetäänkin perusäänekseltään ”alavireisiksi”, sillä muutkin osaäänekset kuin perusäänes vaikuttavat sävelkorkeuden kuulemiseen, ja pianon alimmilla kielillä juuri nämä ylemmät, ylävireiset osaäänekset sattuvat kuulon tarkimmalle alueelle ja vaikuttavat voimakkaasti havaittuun äänenkorkeuteen. (Beament 2001.)

Termillä harmonisuus (harmonicity) tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, miten lähellä jonkin soittimen osaäänessarja on teoreettista, kokonaislukusuhteista osaäänessarjaa. Tämän tutkimusta tehtäessä havaitsin kokeellisesti epäharmonisuuden olemassaolon. Olin äänittänyt kuoromusiikin lisäksi myös yksittäisiä flyygelin säveliä, sillä halusin testata mittausmenetelmän toimivuutta mahdollisimman yksinkertaisella materiaalilla, jossa äänenkorkeudet eivät muuttuisi yhden äänen aikana ja jonka äänenkorkeudet tuntisin. Mittauksissa kävi kuitenkin ilmi, että osaäänesten taajuudet eivät ole aivan kokonaislukusuhteisia. Päättelin tästä, että vian täytyy olla mittaustavassa. Samaan tulkintaan oli 1800-luvulla päätynyt myös osaäänessarjan tutkija Helmholz, joka päätteli mittaustulostensa poikkeamisen teoriasta johtuvan epätarkoista mittauksista (Beament 2001, 35-36). Mittaustuloksissani osaäänesten ylävireisyys oli kuitenkin säännönmukaista, joten kyse ei ollut satunnaisesta epätarkkuudesta. Etsin lisää tietoa aiheesta, jolloin syyksi paljastui pianon sävelten epäharmonisuus.

Kuviossa 3 nähdään flyygelin suuren oktaavialan A:n kymmenen ensimmäisen osaääneksen mittaustulokset. Taajuudet on jaettu osaääneksen järjestysnumerolla, jolloin ne kertovat mihin perusääneksen taajuuteen ne ”viittaavat”. Neljäs ja kahdeksas osaäänes puuttuvat kuviosta, sillä ne olivat liian heikkoja mitattaviksi. Tämä sävel kuullaan luultavasti vähintään 110Hz taajuutena, sillä flyygeli oli vireessä ja se on luultavasti viritetty joko 440Hz tai 442Hz mukaisesti. Kuten kuviosta nähdään, varsinainen perusäänes on taajuudeltaan noin 109.7Hz, mutta kuudes ja sitä ylemmät osaäänekset viittaisivat yli 110Hz taajuuteen, jolloin ne nostavat havaittua äänenkorkeutta ja varsinainen perusäänes pitää virittää alavireiseksi.




KUVIO 3. Flyygelin suuren oktaavialan A-sävelen kymmenen ensimmäisen osaääneksen taajuudet suhteutettuna perusääneksen taajuuteen.

Vaikka pianon epäharmonisuutta on tutkittu paljon, muut instrumentit ovat saaneet vähemmän huomiota. Judith C. Brown (1996) on tutkinut eri instrumenttien harmonisuutta ja hän on sisällyttänyt tutkimukseensa myös lauluäänen. Hänen mukaansa lauluääni on osaäänessarjaltaan harmoninen 0,2% mittaustarkkuuden rajoissa. Hän myös toteaa, että ihmisen tuottamassa äänessä on aina tätä suurempia taajuusvaihteluita, joten mittaustarkkuuden parantaminen ei ole tarpeen. (Brown 1996, 1218.)

Myös omat mittaustulokseni tukevat myös tätä näkemystä. Pianon osaäänesten mittaamisen jälkeen tein vastaavat mittaukset yksittäisestä naisäänestä, ja mittaamani poikkeamat teoreettisesta osaäänessarjasta olivat enintään 0,2%. En siksi ota mahdollista hyvin pientä epäharmonisuutta tutkimuksessani huomioon.

### 5.3 Likiarvoinen kuuleminen

Tolonen tarkoittaa likiarvoisella kuulemisella sitä, että ”tarkkojen sävelkorkeuksien asemasta korva tyytyy niiden likiarvoihin” (1969, 104). Tällöin lievästi epäpuhtaat intervallit toimivat ikään kuin puhtaiden vastineidensa edustajina, eikä kuulija välttämättä havaitse pientä epäpuhtautta lainkaan. Tolonen selittää ilmiön sillä, että epäpuhtaan intervallin sävelten osaäänessarjojen muodostama kokonaissuhdeverkosto muistuttaa suuresti puhtaan vastineensa verkostoa sekä sillä, että osaäänekset aiheuttavat korvan peruskalvoon melko laajoja kohoumia, jolloin toisiaan lähellä olevat osaäänekset muodostavat vain yhden kohouman eli äänekset sulautuvat yhteen. (Tolonen 1969, 104–110.)

Sloboda (1985, 23–27) puhuu samasta ilmiöstä musiikkipsykologian näkökulmasta käyttäen termiä ”categorical perception”, joka voitaisiin suomentaa luokittelevaksi havainnoinniksi. Sloboda esittelee kokeen, jossa koehenkilöille soitettiin kolmisointuja, joissa oli puhdas kvintti, ja terssin korkeutta vaihdeltiin portaattomasti molliterssin ja duuriterssin välillä. Tutkimuksessa havaittiin, että pienen ja suuren terssin välimaastossa on hyvin kapea alue, jolle sattuvia terssejä ei selvästi kuulla duuri- tai molliterssiksi, mutta lähes kaikki tätä laajemmat terssit kuultiin duurisointuna ja suppeammat mollisointuna. Ihmisen kuulo siis pyrkii luokittelemaan nämä terssit jompaankumpaan kulttuurissamme hyväksyttyyn luokkaan, eli joko suureksi tai pieneksi terssiksi. Tämä taipumus ilmeni muusikoilla vahvempana kuin ei-muusikoilla. (Sloboda 1985, 23–27.)

Sloboda kertoo myös toisesta kokeesta, jossa koehenkilöille soitettiin erilaisia tasavireisiä sekä tasavireisyydestä poikkeavia, epävireisiä intervalleja. Vaikka intervalleista vain 23% oli ”oikein viritettyjä”, koehenkilöt arvioivat 63% intervalleista oikein viritetyiksi, arvioiden ylä- ja alavireisten intervallien olevan yhtä laajoja kuin oikein viritetyt vastineensa. Joissain tapauksissa ylävireinen intervalli saatettiin kuulla alavireisenä. Tällöin koehenkilö pystyi kuulemaan epävireisyyden, muttei pystynyt tarkemmin arvioimaan epävireisyyden luonnetta. (Sloboda 1985, 178.)

Itselleni tällainen tilanne on hyvin tuttu. Kuoronjohtotehtävissä pystyn kyllä usein kuulemaan epäpuhtauden, mutta en useinkaan pysty tarkemmin arvioimaan sen laatua, eli en pysty sanomaan mikä stemma on epäpuhdas ja onko kyse ylä- vai alavireisyydestä. Vaikuttaisikin siltä, että äänenkorkeuksien havainnoiminen jakautuu kahteen havaintoon: intervallin tai soinnun luokan tunnistamiseen sekä mahdollisen epäpuhtauden havaitsemiseen. Uskon, että kyvyttömyyteni tunnistaa epäpuhtauden laatua johtuu suuresti pianistin taustastani, sillä pianistin ei tarvitse kiinnittää huomiota puhtausasioihin. Harjoittelun kautta olen saavuttanut jonkinasteisen kyvyn havaita epäpuhtautta, mutta vaikuttaisi siltä, että epäpuhtauden laadun tunnistaminen vaatii huomattavasti enemmän harjoitusta kuin pelkkä epäpuhtauden kuuleminen.

Mikäli kuulisimme sävelsuhteet tarkasti sellaisina kuin ne ovat, musiikista olisi mahdotonta nauttia, sillä taitavimpienkaan muusikoiden esitykset eivät ole täysin puhtaita. Tasavireisiä instrumentteja ei luultavasti voitaisi käyttää lainkaan (Sloboda 1985, 178). Myös käytännön kokemus puhuu likiarvoisen kuulemisen puolesta; mikäli kuulemme yhtäaikaisen intervallin, joka on hieman suppeampi kuin puhdas kvintti, emme kuule sitä intervallina, joka on hieman kvinttiä suppeampi, vaan kuulemme kvintin, joka on hieman epäpuhdas. Korva siis tulkitsee intervallin kvintiksi ennen kuin havainto saavuttaa tietoisuuden.

Tolosen mukaan eri intervalleilla on erisuuruinen ”epäpuhtaustoleranssi”, eli toisin sanoen kykymme arvioida puhtautta riippuu suuresti intervallista. Priimin ollessa kyseessä kuulemme pienenkin epäpuhtauden huojuntana. Priimissä kaikki osaäänekset osuvat samoille taajuuksille, joten epäpuhdas priimi tuottaa jokaiseen osaääneksen aiheuttamaan korvan peruskalvon painaumaan kaksi huippua. Oktaavissa toleranssi on suurempi, sillä oktaavissa vain joka toinen alemman sävelen osaääneksistä sattuu samalle kohdalle ylemmän sävelen osaäänesten kanssa. Osaäänessarjan voimakkuuseroista myös johtuu, että vaikka osaäänekset sattuisivat samaan kohtaan, toinen niistä on usein toista voimakkaampi, jolloin heikompi osaäänes ja sen muodostama painauma peruskalvossa peittyy vahvemman alle. Tätä kutsutaan peittoilmiöksi. Tolonen (1985, 108) esittää myös joitakin koetuloksia pianonvirittäjien ”virheiden” suuruudesta oktaavien virittämisessä, mutta uudempi tutkimus pianon sävelten epäharmonisuudesta osoittaa mielestäni selvästi, että pianoa ei voida käyttää tällaiseen tutkimukseen. Kykymme arvioida puhtautta ei riipu ainoastaan intervallista, vaan myös yksilöstä. Tämän lisäksi samankin kuulijan ollessa kyseessä asiaan vaikuttaa asennoituminen ja mielenvire. Näin ollen tarkkoja toleranssiarvoja eri intervalleille on mahdotonta antaa, mutta voidaan silti yleistää, että mitä aikaisemmin intervalli esiintyy osaäänessarjassa (eli mitä konsonoivampi se on), sitä pienempi on sen epäpuhtaustoleranssi. Varhaisemmassa artikkelissa Tolonen (1958, 50–51) puhuu samasta asiasta kehottaen kuoronjohtajia kiinnittämään kolmisoinnuissa enemmän huomiota kvintin kuin terssin puhtauteen, sillä kvintissä pienikin epäpuhtaus on häiritsevä. (Tolonen 1969, 108–109.)

### 5.4 Epäpuhtauden muodot ja niiden havaittavuus kuoromusiikissa

Kuulohavaintoa koskeva tutkimustieto osoittaa, että varsinainen kuulohavainto poikkeaa suuresti akustisesta todellisuudesta. Tällöin myös kuultu puhtaus on eri asia kuin teknisesti mittaamalla havaittu puhtaus. Tässä tutkimuksessa epäpuhtaus on määritelty poikkeamaksi ideaalisista sävelkorkeuksista. Tämä on tekninen, akustisesta todellisuudesta lähtöisin oleva määritelmä. Käyttäessämme tätä määritelmää joudumme luokittelemaan kaikenlaiset poikkeamat ideaalisävelkorkeudesta epäpuhtaudeksi, vaikka kuulija ei kaikkia poikkeamia havaitse eikä kaikkia havaitsemiaankaan välttämättä koe epäpuhtautena. Seuraavassa tarkastelemme erilaisia epäpuhtauden muotoja ja niiden havaittavuutta.

#### 5.4.1 Vibrato

Vibratolla tarkoitetaan sävelkorkeuden jaksollista, aaltomaista vaihtelua. Tässä tutkimuksessa käytetyn puhtauden määritelmän mukaisesti myös vibrato on epäpuhtautta, sillä se tarkoittaa poikkeamista ideaalisävelkorkeudesta. Backuksen mukaan vibrato saattaa olla jopa puolisävelaskelen laajuinen, mutta kuulemme silti vain yhden sävelen. Kuuloaistimme ottaa sävelkorkeudesta ikään kuin keskiarvon, ja kuulemme sävelen, jonka korkeus on vibraton ylä- ja alarajataajuuksien puolivälissä. (Backus 1969, 214.) Beament taas kirjoittaa, että mikäli vibraton vaihteluväli on vähemmän kuin kuudesosa puolisävelaskeleesta, emme havaitse sitä lainkaan, vaan tämänlaajuinen vibrato kuuluu ainoastaan äänenvärin rikkautena (Beament 2001, 49).

Kuorolaulussa vibratoa pyritään yleensä välttämään. Vaikka kuulemme vibratoa sisältävän sävelen yhtenä sävelkorkeutena, laaja vibrato tekee havaitun sävelkorkeuden epämääräiseksi. Itse olen havainnut tämän joissakin oopperoiden ensemble-kohtauksissa, joissa on vaikea kuulla laulajien muodostamia harmonioita, sillä laulajien äänessä on laaja vibrato. Tällöin en saa kuulijana sen koommin puhtauden kuin epäpuhtaudenkaan kokemusta, vaan ennemminkin koen ”epämääräisyyttä” sävelkorkeuksissa.

### 5.4.2 Sävelkorkeuden epästabiilius

Lauletut sävelet eivät käytännössä koskaan pysy täsmälleen samassa äänenkorkeudessa sävelen alusta loppuun asti. Vibrato on näistä vaihteluista tunnetuin, mutta muutakin vaihtelua esiintyy. Vaihteluita aiheuttavat esimerkiksi laulun teksti painotuksineen, äänen aloitus ja äänen lopetus. Voidaan siis ajatella lauluäänen sävelkorkeuden olevan jatkuvassa glissandossa, jonka kuuloaistimme ”suoristaa” tasaiseksi äänenkorkeudeksi. (Ross 1990.)

Hyvin lyhytkestoisten äänien sävelkorkeutta ei pystytä erottamaan. Tolosen (1969, 80) mukaan sävelkorkeus erottuu selvästi vasta, kun ääni on kestoltaan vähintään 50 ms (1/20 s). Tämä vaikuttaa myös pidempikestoisten sävelten alkuihin, sillä kuorolainen kontrolloi lauluaan kuuloaistinsa avulla. Tämän lisäksi äänten alkuihin vaikuttavat mm. alkukonsonantit, jotka ovat usein sävelkorkeudeltaan epämääräisiä. Ross (1990) tulee tutkimuksessaan siihen tulokseen, että kuultu sävelkorkeus vastaa mitattua sävelkorkeutta hetkellä, jolloin kaksi kolmasosaa sävelen kestosta on kulunut. Hänen tutkimuksensa tosin käsittelee tietyissä kansanlauluissa esiintyviä erikoisia liukuvia säveliä, joten hänen tuloksensa eivät ehkä ole yleistettävissä tavanomaisempaan laulumusiikkiin. Ross kuitenkin esittelee myös muiden tutkimusten tuloksia. Näiden tutkimusten perusteella voi päätellä, että havaittu äänenkorkeus joka tapauksessa sijoittuu sävelkorkeuden vaihteluvälin sisään. (Ross 1990.)

Tässä tutkimuksessa olen pyrkinyt mittaamaan lähinnä pitkien sävelien korkeutta, sillä lyhyiden sävelten äänenkorkeus on epämääräisempi kuin pitkien. Koska sävelen alussa ja lopussa korkeusvaihtelut näyttävät olevan suurimpia, olen pyrkinyt määrittämään sävelen korkeuden sen keskivaiheilta mitatuista taajuuksista.

### 5.4.3 Stemmansisäinen hajaannus

Kuorolaulussa on aina monta ihmistä samassa stemmassa. He eivät kuitenkaan välttämättä aina osu samoihin sävelkorkeuksiin. Kutsun tätä stemmansisäiseksi hajaannukseksi. Mikäli kaksi laulajaa laulaa samaa säveltä hieman eri korkeudelta, voidaan tulkita kyseessä olevan epäpuhtaan priimin. Mikäli sävelkorkeudet ovat lähellä toisiaan, kuulemme ne kuitenkin yhtenä sävelenä. Tällöin äänessä kuuluu huojunta, joka esiintyy myös esimerkiksi kitaraa viritettäessä. Tolosen (1969) mukaan huojunta voidaan jakaa kolmeen luokkaan. Mikäli taajuuksien ero on nollasta noin seitsemään hertsiä, huojunta kuulostaa äänenvoimakkuuden vaihtelulta eli tremololta. Tätä suurempi ero aiheuttaa huojunnan, joka kuulostaa vibratolta. Mikäli äänenkorkeuksien eroa edelleen kasvatetaan, sävelet alkavat erottautua erillisinä ja muistuttavat nopeaa trilliä. Tarkkoja rajoja näille on mahdotonta antaa. (Tolonen 1969, 97–99.)

Kun otetaan huomioon myös, että yksittäisen laulajan sävelkorkeus on epästabiili, ja että stemmassa on yleensä enemmän kuin kaksi laulajaa, voidaan todeta että jo yksittäinen stemma muodostaa alati muuttuvan monimutkaisen kokonaisuuden, josta tuskin voi erottaa yksittäisiä huojuntoja samalla tavalla kuin vaikkapa kitaraa viritettäessä. Voidaan myös päätellä, että koska kuuloaistimme yhdistää lähekkäiset sävelkorkeudet yhdeksi sävelkorkeudeksi, emme havaitse pientä stemmansisäistä hajaannusta. Näin ollen mikäli kuulemme stemmassa selkeästi eri sävelkorkeuksia, stemmansisäisen hajaannuksen täytyy olla jo huomattavan suurta.

### 5.4.4 Stemma yhtenäisesti epäpuhdas

Tämä on epäpuhtauden tyyppi, jota useimmiten ajatellaan puhuttaessa kuoron epäpuhtaudesta. Tarkoitan tällä tilannetta, jossa koko stemma on yhtenäinen, mutta epäpuhdas. Aiemmin mainittujen epäpuhtauden muotojen perusteella voidaan olettaa, että tässäkään tapauksessa stemma tuskin on täysin yhtenäinen ja äänenkorkeudeltaan stabiili. Ennemminkin voidaan ajatella, että tässä tapauksessa äänenkorkeuksien jonkinlainen keskiarvo on ylä- tai alavireinen.

Kuorolaulu, kuten kaikki muukin musiikki, perustuu kuuloaistiin. Yksittäinen kuorolaulaja pyrkii useimmiten kuuntelemaan muita kuorolaisia, etenkin oman stemmansa laulajia, ja kuulohavaintojen perusteella mukauttamaan omaa lauluaan muiden mukaiseksi. Tästä toiminnasta käytetään joskus nimitystä ”peesaus”, joskin silloin sanan sävy on usein negatiivinen, ja tällöin kyseessä on toiminta, jossa laulaja ei ota lainkaan vastuuta stemmastaan, vaan seuraa muita stemman jäseniä kritiikittä. Tällainen laulutapa tuottaa oman kokemukseni perusteella hyvin epävarman kuuloista laulua, ja kuoro tuntuu koko ajan olevan ajallisesti hieman johtajaa jäljessä, sillä peesaava laulaja on jatkuvasti reaktioajan verran muita jäljessä. Sanaa ”peesaus” käytettäessä unohdetaan kuitenkin usein, että muiden kuuntelussa ja muihin reagoimisessa on koko kuorolaulun ydin. Täydellinen muihin laulajiin reagoimattomuus on usein haitallisempaa kuin täydellinen peesaus, vaikka kyseinen laulaja olisi kuinka oikeassa, sillä usein yhtenäisyys on tärkeämpää kuin oikea sävelkorkeus, rytmi, tai dynamiikka.

Muiden laulajien kuuntelu on yhtenäisen epäpuhtauden pääasiallinen syy. Mikäli koko stemma on vähänkin epävarma sävelkorkeudesta, laulajat mieluusti seuraavat ketä tahansa joka ottaa aloitteen sävelkorkeuden valitsemisessa. Toisaalta tämä voidaan myös kääntää niin päin, että stemman yhtenäisyys ylipäänsä johtuu muiden laulajien kuuntelusta, jolloin on toisarvoista, onko yhtenäinen sävel epäpuhdas vai ei. Yhtenäisesti epäpuhtaan stemman puhtausarviossa tullaan jälleen likiarvoisen eli luokittelevan kuulon piiriin.

### 5.4.5 Äänenmuodostuksen vaikutus äänenkorkeuden kuulemiseen.

Äänenkorkeuden tunnistamisessa osaäänessarja on hyvin merkittävä. Yksittäisten äänesten sävelyys on heikko, toisin sanoen ääneksen muodostama sävelkorkeudellinen havainto on epämääräinen. Kokeellisesti on osoitettu, että ääneksistä muodostetun intervallin tunnistaminen on epävarmempaa kuin sävelistä muodostetun. (Tolonen 1969, 86.)

Tästä voidaan päätellä, että osaäänessarjan rikkaus parantaa sävelkorkeuden tunnistettavuutta. Laulussa osaäänessarjan muoto riippuu erityisesti äänenmuodostuksesta. Tässä yhteydessä äänenmuodostus on ymmärrettävä laajana käsitteenä, johon kuuluvat mm. vokaalien värit ja hengitystekniikka. Mikäli laulajan äänenmuodostus on sellainen, että osaäänessarja on lyhyt, toisin sanoen vain vähäinen määrä osasävelistä on kyllin vahvoja vaikuttaakseen kuulohavaintoon, lauletun äänenkorkeuden havainto jää epämääräiseksi.

Sävelkorkeuden kuulemisen tarkkuuteen vaikuttaa myös äänen korkeus. Ihminen pystyy erottamaan eniten sävelkorkeuden vivahteita noin kahdentuhannen ja neljäntuhannen hertsin välillä joten se on kuulon tarkin alue. Kuulon tarkkuus vähenee tästä alaspäin mentäessä. Tolonen (1969, 86) kirjoittaa, että aivan matalimmalla alueella ”ääneksien ja osaääneksistä köyhien sävelten korkeutta on vaikea täsmällisesti määritellä. Täälläkin tilanne helpottuu suuresti osaäänesten luvun ja voiman kasvaessa”. (Tolonen 1969, 86-87.)

Kuorossa bassot tuntuvat olevan tämän suhteen erityisasemassa. Vaikuttaa siltä, että erityisesti bassoilla puutteellinen äänenmuodostus johtaa varsin epämääräiseen sävelkorkeuden havaintoon. Tulkitsen tämän johtuvan juuri osaäänessarjan köyhyydestä. Uskoisin, että juuri tästä on kyse myös kun sanotaan että ”ääni ei soi”. Koska bassoilla perusäänes on varsin matala, köyhästä osaäänessarjasta seuraa, että kuulon tarkimmalle alueelle osuvat osaäänekset ovat liian heikkoja jotta kuuloaisti kykenisi käyttämään niitä tarkan sävelkorkeuden määrittämiseen. Tästä voidaan päätellä, että erityisesti bassoilla tarkasti oikean äänenkorkeuden laulaminen vaatii hyvää äänenmuodostusta. Toisaalta voidaan todeta, että basson laulaminen puhtaasti on helpompaa kuin muiden stemmojen, sillä bassojen äänialalla kuuloaistin epäpuhtaustoleranssi on suuri.

Äänenmuodostus vaikuttaa myös stemmansisäiseen hajaannukseen. Beamentin mukaan intervallien tarkka tunnistus voi olla vaikeaa, kun intervallin sävelet tuotetaan eri soittimilla (Beament 2001, 71). Tällöin voidaan ajatella, että koska laulussa erilainen äänenmuodostus tuottaa erilaisen osaäänessarjan, erilaiset lauluäänet ovat ikään kuin eri soittimia. Käytännön kuoromusiikissa tämä on helppo todeta, esimerkiksi erilaiset vokaalin värit samassa stemmassa saavat stemman kuulostamaan heterogeeniseltä. Toisaalta kyseessä on tällöin äänenvärien heterogeenisyys, mutta uskon että tästä seuraa myös stemmansisäistä hajaannusta äänenkorkeuden suhteen, sillä laulajien on tällöin vaikeampi kuulla, ovatko he samassa sävelessä. Vaikuttaakin siltä, että todella yhtenäisen kuuloinen stemma voidaan saavuttaa vain todella yhtenäisen äänenmuodostuksen avulla. Tämä vaatii paljon harjoitusta, mutta on vaivan arvoista. Olen kuullut lopputulosta kommentoitavan sanoilla ”kuin yksi suuri altto”, mikä mielestäni kuvasi hyvin kuulovaikutelmaa.

### 5.4.6 Kuorolaulun epäpuhtauden luokittelu nuottilähtöisestä näkökulmasta

Kuorolaulussa epäpuhtautta voidaan luokitella myös muista näkökulmista katsoen. Nuottilähtöinen tai viritysjärjestelmälähtöinen ajattelu luokittelisi epäpuhtauden kolmeen ilmiöön: vertikaalinen eli simultaanisten intervallien epäpuhtaus, horisontaalinen eli peräkkäisten äänien muodostamien intervallien epäpuhtaus sekä kokonaisvirityksen muuttuminen eli tavallisimmin sävellajin laskeminen. Näistä viimeiseksi mainittu on oikeastaan vain seuraus kahdesta aikaisemmasta epäpuhtauden tyypistä.

Viritysjärjestelmäajattelusta kumpuava kirjallisuus tuntuu luokittelevan epäpuhtautta juuri näin (ainakin Tolonen 1958, Fougstedt 1950). Tällöin pohdiskellaan mikä näistä kolmesta on missäkin musiikillisessa tilanteessa ”uhrattavissa”, sillä usein ollaan tilanteessa, jossa puhtaus ei ole täysin saavutettavissa kaikkien kolmen suhteen. Nämä pohdinnat ovat hyvin samankaltaisia kuin väittelyt eri viritysjärjestelmien paremmuudesta, sillä molemmissa on pohjimmiltaan kyse tietystä määrästä väistämätöntä epäpuhtautta sekä tämän epäpuhtauden sijoituspaikasta.

Tässä ajattelussa kuoron epäpuhtaus ei eroa laulu- tai soitinyhtyeen epäpuhtaudesta millään lailla, sillä tämä ajattelu jättää huomiotta äänenmuodostuksen vaikutukset sekä sen, että jokaisessa stemmassa on useita laulajia. Sellaisenaan tämä luokittelu ei siis riitä tällaisessa tutkimuksessa, mutta sitä voidaan käyttää aiemmin esitellyn luokittelun lisänä.

Vertikaalisella epäpuhtaudella tarkoitetaan epäpuhtautta, joka esiintyy yhtäaikaisesti soivien sävelten suhteissa. Itselleni luonnollisin tapa hahmottaa kuoromusiikkia on ajatella sitä sarjana pystysuoria sointuja, mikä johtuu pianistin taustastani. Tämä ei ole tietoinen ratkaisu, vaan huomaan usein kuorolaulajana pyrkiväni puhtauteen vertaamalla itseäni muihin yhtäaikaa laulaviin stemmoihin. Tämä vaikuttaakin olevan hyvin toimiva menetelmä stemmoissa, jotka laulavat säestäviä sointuja, sillä kuulijan kannalta varsinkin hitaasti vaihtuvissa soinnuissa yksittäisen soinnun puhtaus vaikuttaisi olevan tärkeämpää kuin yhden säestävän stemman muodostaman linjan puhtaudellinen eheys.

Horisontaalinen puhtaus vaikuttaisi olevan tärkeää erityisesti melodiaa laulaville stemmoille. Tolonen (1958) ja Fougstedt (1950) antavat erilaiset suositukset ”oikeista” sävelkorkeuksista riippuen siitä, onko kyseessä sointuharmonia vai melodia, joten voidaan ajatella melodialla olevan tässä suhteessa erityisasema. Todellisuudessa melodisen linjan ja sointuharmonian väliin ei kuitenkaan voida vetää selkeää rajaa, toisin sanoen läheskään kaikkia kuorokappaleessa laulettavia säveliä ei voida yksiselitteisesti luokitella kuuluvaksi vain toiseen näistä luokista. Horisontaalinen ajattelutapa tuntuisi olevan luonteva kuorolaulajille, joilla on laulajan tai esimerkiksi viulistin tai huilistin tausta, sillä he ovat tottuneet kuuntelemaan nimenomaan melodisia linjoja.

Kokonaisvirityksen muutos eli sävellajin nousu tai lasku on hieman erilainen ilmiö, sillä se on aina vain seuraus muusta epäpuhtaudesta. Mielestäni tämä on kaikkein kyseenalaisin epäpuhtauden muoto, sillä normaalisti sävellajin pieni muutos ei vaikuta häiritsevästi musiikkikokemukseen. Sävellajin muutoksesta johtuvat ongelmat ovat hyvin käytännöllisiä ongelmia ja liittyvät lähinnä äänialan loppumiseen bassoilla tai sopraanoilla sekä lihasmuistin häiriintymiseen sävellajin muuttuessa. Yksistään pientä sävellajin nousua tai laskua ei mielestäni voida pitää varsinaisena epäpuhtautena. Sen sijaan suuri (yli puolisävelaskeleen suuruinen) sävellajin muutos toimii melko luotettavana indikaattorina siitä, että kappaleen puhtaudessa ylipäänsä on ongelmia. Absoluuttisen sävelkorvan omaavalle kuulijalle sävellajin liikkuminen varmastikin on häiritsevää, mutta tällöin on kyseessä niin pieni joukko ihmisiä, etten pidä tätä ongelmana.

### 5.5 Yhteenveto epäpuhtauden kuulemisesta

Edellä on todettu, että kuultu todellisuus eroaa huomattavasti akustisesta todellisuudesta. On kuitenkin lohdullista, etenkin tällaisen tutkimuksen kannalta, että kaikki eroavaisuudet tuntuisivat viittaavan samaan suuntaan: kuultu epäpuhtaus on vähäisempää kuin akustisen todellisuuden epäpuhtaus. Toisin sanoen vaikuttaa siltä, että kuuloaisti pyrkii kaikissa erillisissä ilmiöissä korjaamaan epäsäännöllisen ja epäpuhtaan todellisuuden kauniiksi, puhtaaksi ja säännölliseksi kuulohavainnoksi. Tämän vuoksi puhtauden tutkiminen akustista todellisuutta mittaamalla on perusteltua sillä edellytyksellä, että tuloksia tulkittaessa otetaan huomioon kuuloaistimuksessa tapahtuva korjaus.

Useissa yhteyksissä on myös puhuttu sävelkorkeuden epämääräisyydestä. Tällöin ei voida suoranaisesti puhua puhtaudesta tai epäpuhtaudesta, sillä sävel havaitaan korkeudeltaan epämääräisenä. Tällaisissa tilanteissa joudutaankin suurempien kysymysten ääreen: onko perustellumpaa tarkastella puhtautta vai epäpuhtautta? Vaikka sävelkorkeudeltaan epämääräinen sävel ei suoranaisesti ole epäpuhdas, se ei myöskään voi olla puhdas, jolloin se ei tue kuoron kokonaispuhtautta. Useimmiten vaikuttaisi myös siltä, että mikäli sävelkorkeuden epämääräisyys on vallitseva piirre kuoron laulutavassa, kuulokokemus on hyvin samankaltainen kuin epäpuhtauden kokemus. Nämä kaksi saattavat jopa olla mahdottomia erottaa toisistaan. Tämä pohdiskelu on kuitenkin melko teoreettista, joten pitäydyn epäpuhtauden tutkimisessa, sillä epäilen että varsinaisen puhtauden mittaaminen muutoin kuin epäpuhtauden kautta voisi olla mahdotonta.

## 6 Taajuusanalyysimetodin kehittäminen

Tutkimuksessa haluttiin keskittyä nimenomaan arkisiin, amatöörikuorojen musiikillisiin tilanteisiin. Tätä varten tuli tutkia kuoromusiikkia mahdollisimman autenttisissa olosuhteissa. Sävelpuhtauden mittaamisen kannalta olisi ollut helpointa äänittää laulajia studio-olosuhteissa, jokainen stemma tai jopa jokainen laulaja omalle raidalleen, mutta siinä tapauksessa tilanne olisi ollut liian keinotekoinen antaakseen kuvaa arkisesta kuorolaulannasta. Studioakustiikka ja monitoroinnin käyttö olisivat vaikuttaneet erityisesti siihen, millä tavalla kukin laulaja kuulee tai kuuntelee muita laulajia. Ammattilaisista koostuvalle lauluyhtyeelle kuulokuvan muutos ei välttämättä olisi ollut suurikaan ongelma, mutta amatöörikuorolaisille ero on suuri. Päädyin näin ollen äänittämään kuoroa todellisissa tilanteissa, kuoroharjoituksissa ja esiintymisissä, yksinkertaisella yhden mikrofonin laitteistolla.

Tutkimusta varten täytyi löytää menetelmä, jolla sävelpuhtautta voitaisiin mitata. Sävelpuhtautta voidaan mitata mittaamalla tarkasti ääninäytteessä esiintyviä sävelkorkeuksia. Tietotekniikka antaa tähän hyvät mahdollisuudet. Tutustuin saatavilla oleviin äänenkäsittelyohjelmiin, mutta mikään niistä ei tuntunut kykenevän juuri haluamamme kaltaiseen analyysiin. Tarjolla olevat ohjelmat pystyivät kyllä tunnistamaan taajuudet yksiäänisestä signaalista, mutta eivät moniäänisestä. Käsittääkseni vielä ei ole kyetty kehittämään analyysimetodia, joka kykenisi aukottomasti tunnistamaan sävelet moniäänisestä signaalista. Tällaisella ohjelmalla olisi mahdollista esimerkiksi automaattisesti kirjoittaa nuotinnus äänitetystä musiikista. Tässä tutkimuksessa ei ole kuitenkaan tarkoitus jäljittää sokeasti mitä tahansa säveliä ääninäytteestä, vaan koska tiedän mitä säveliä kuoro laulaa, tiedän myös muutaman prosentin tarkkuudella, miltä korkeudelta tehopiikkejä tulisi etsiä. Sampsa ehdotti, että kirjoittaisimme oman ohjelman tähän tarkoitukseen. Hänelle tämä oli tekniikan alan ihmisenä muutoinkin luonnollisin vaihtoehto. Moni seikka puolsi oman ohjelman kirjoittamista; ohjelmaa voisi muunnella vapaasti kulloisenkin tarpeen mukaan, oman ohjelman kanssa tuntisimme mittausmetodin hyvin tarkasti, ja oman ohjelman luotettavuutta ja tarkkuutta olisi verrattain helppo arvioida.

### 6.1 Fourier-muunnos analyysityökaluna

Analyysiohjelman perustyökaluksi valittiin Fourier-muunnos, josta joskus käytetään myös nimeä ”Fourier’n muunnos”. Fourier-muunnos on matemaattinen menetelmä, joka ”purkaa tai erottelee annetun aaltomuodon eri taajuuksisten siniaaltojen summaksi” (Brigham 1974, 3). Sillä siis saadaan tutkittua ääninäytteestä minkä korkuisia ääniä se sisältää.

Lynnin ja Fuerstin (1994, 65) mukaan Fourier-muunnos perustuu Fourier-sarjaan, joka on nimetty Ranskalaisen matemaatikon Jean Baptiste Joseph Fourierin (1768-1830) mukaan. Hän kirjoitti pääteoksensa ”La théorie analytique de la chaleur” (Analyyttinen lämpöteoria) vuonna 1807, mutta teosta pidettiin kiistanalaisena ja se julkaistiin vasta vuonna 1822. Teoksessaan Fourier osoitti, että jaksolliset signaalit voidaan esittää toisiinsa harmonisessa suhteessa olevien siniaaltojen summana. Vastaavasti ei-jaksolliset signaalit voidaan esittää sellaisten siniaaltojen integraalina, jotka eivät ole harmonisessa suhteessa toisiinsa. Näistä kahdesta oivalluksesta syntyivät Fourier-sarja ja Fourier-muunnos. Alunperin Fourier kirjoitti teoksensa ratkaistakseen tiettyjä lämpövirtaan liittyviä ongelmia, mutta hänen työnsä tuloksia hyödynnetään nykyisin monella tieteenalalla, mm. elektroniikassa ja signaalinkäsittelyssä. (Lynn & Fuerst 1994, 65; ks. myös Kauko 1994).

#### 6.1.1 Erilaiset Fourier-muunnokset

Fourier-muunnokset jaetaan yleisesti neljään ryhmään perustuen signaalin jaksollisuuteen tai ei-jaksollisuuteen, sekä siihen, onko signaali ajan suhteen jatkuva (rajaton) vai diskreetti (rajattu). Kuvio 4 esittää Fourier-muunnosten jaottelua.

| | **jaksollinen** | **ei-jaksollinen** |
|---|---|---|
| **jatkuva** | Fourier-sarja<br>*Fourier Series (FS)* | Fourier-muunnos<br>*Fourier Transform (FT)* |
| **diskreetti** | diskreettiaikainen Fourier-sarja tai diskreetti Fourier-muunnos<br>*Discrete-Time Fourier Series (DTFS) or Discrete Fourier Transform (DFT)* | diskreettiaikainen Fourier-muunnos<br>*Discrete-Time Fourier Transform (DTFT)* |

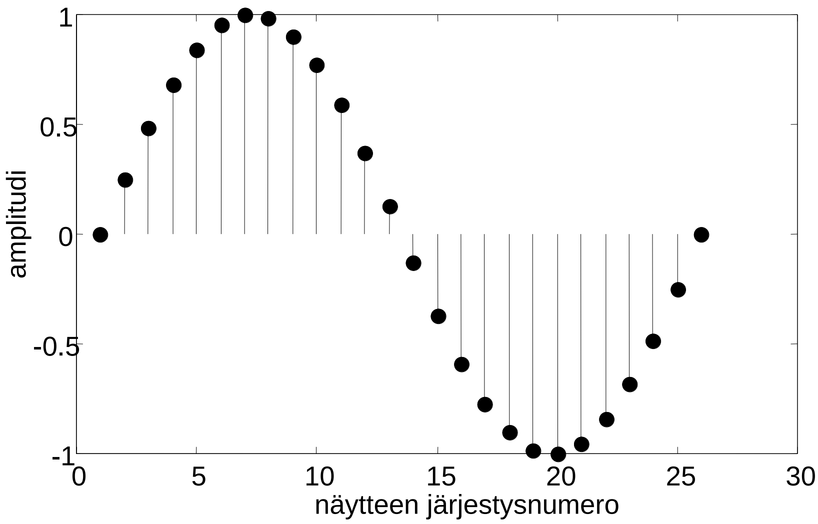
KUVIO 4. Erilaiset Fourier-muunnokset (Haykin & Van Veen 1999, 157)

Näiden neljän eri muunnoksen nimitykset ovat hyvin samankaltaisia, ja usein mistä tahansa näistä saatetaan käyttää nimitystä Fourier-muunnos. Niissä on kuitenkin eroja, ehkä tärkeimpänä ero jatkuvien ja diskreettien muunnosten välillä. Jatkuvat Fourier-muunnokset ovat hyvin teoreettisia, ne muuntavat funktioita toisiksi funktioiksi (kuvio 5).

| | |
|---|---|
| Funktio 1 | $x(t) = e^{at}u(-t), \quad a > 0$ |
| Fourier-muunnos (FT) | $X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t}dt$ |
| Funktio 2 | $X(j\omega) = \dfrac{-1}{j\omega - a}$ |

KUVIO 5. Fourier-muunnoksella saadaan jatkuvasta Funktio 1:stä Funktio 2.

Diskreetit muunnokset ovat paremmin käytäntöön soveltuvia. Ne käsittelevät ajallisesti rajattuja signaaleja, ts. signaaleja joilla on alku ja loppu. Tällaisia ovat esimerkiksi ääninäytteet. Itse muunnettavat signaalit ovat myös yleensä digitaalisessa muodossa, toisin sanoen signaali on matemaattisen kaavan sijaan sarja lukuarvoja, jotka kuvaavat signaalin amplitudia tasaisin väliajoin. Kuvio 6 kuvaa tällaista signaalia.




KUVIO 6. Siniaalto digitaalisessa muodossa, 26 näytettä, signaalin amplitudi = 1.

### 6.1.2 Diskreetti Fourier-muunnos

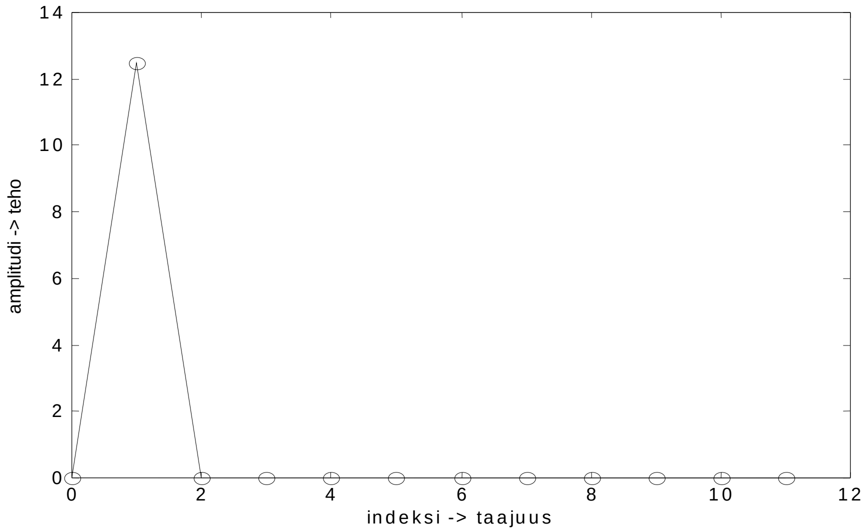
Tämän tutkimuksen kannalta olennaisin Fourier-muunnos on  diskreetti Fourier-muunnos (DFT). Se on erityisen tärkeä kaikessa tietokoneella tapahtuvassa signaalien analysoinnissa (Lynn & Fuerst 1994, 67). Joissain yhteyksissä käytetään myös termiä ”diskreettiaikainen Fourier-sarja” (ks. kuvio 4), mutta tässä tutkimuksessa pitäydyn huomattavasti yleisemmässä nimityksessä ”diskreetti Fourier-muunnos” ja sen englanninkielisessä lyhenteessä DFT. Vaikuttaa myös siltä, että kun signaalinkäsittelyä koskevissa teksteissä puhutaan Fourier-muunnoksesta, useimmiten tarkoitetaan juuri diskreettiä Fourier-muunnosta, sillä se on yleisimmin signaalinkäsittelyssä käytetty Fourier-muunnos.

Fourier-muunnoksen avulla siis saadaan haluttu aaltomuoto, esimerkiksi ääninäyte, purettua eritaajuksisten siniaaltojen summaksi. Diskreettiä Fourier-muunnosta käytettäessä sekä alkuperäinen signaali että muunnoksen tulos ovat muodoltaan sarja lukuarvoja. Kutsun tällaista sarjaa lukuarvoja nimellä *vektori* (englanniksi käytetään termiä *array*). Vektori voidaan ajatella matriisiksi, jolla on vain yksi rivi tai sarake (Apiola & Laine 2006). Vektorissa elementtien keskinäinen järjestys on merkityksellinen. Esimerkiksi kuviossa 6 kuvattu vektori olisi:

sini1 = [0  0.2487  0.4818  0.6845  0.8443  0.9511  0.9980  0.9823  0.9048  0.7705  0.5878  0.3681  0.1253  -0.1253  -0.3681  -0.5878  -0.7705  -0.9048  -0.9823  -0.9980  -0.9511  -0.8443  -0.6845  -0.4818  -0.2487  -0.0000]

Tässä vektorissa on 26 elementtiä, eli se sisältää 26 lukuarvoa jotka kuvaavat signaalin amplitudia tietyllä hetkellä. Tällaisen hetkellisen amplitudin voidaan ajatella äänisignaalin kyseessä ollessa vastaavan kaiutinelementin tai tärykalvon asentoa. Yhden värähdyksen sisältävässä esimerkkisignaalissamme siis tärykalvo tai kaiutinelementti lähtee keskiasennosta ja liikkuu kerran ulospäin ja sisäänpäin, ja näiden välissä käy kerran keskiasennossa eli ohittaa nollakohdan. Amplitudista voidaan puhua myös jonkin signaalin amplitudina. Tällöin tarkoitetaan signaalin maksimiamplitudia.

Kuviossa 6 signaali on kuvattu koordinaatistoon, jossa y-akseli (pystysuora suunta) kertoo hetkellisen amplitudin. X-akseli kertoo elementin järjestysnumeron, jota kutsutaan vektoreissa indeksiksi. Kun tiedämme signaalin näytteenottotaajuuden, indeksit voidaan muuttaa suoraan ajaksi, sillä vektorin elementit ovat näytteitä, jotka on otettu tasaisin väliajoin. Kyseessä on siis signaalin kuvaus *aikatasolla*. Diskreetillä Fourier-muunnoksella signaali siirretään *taajuustasolle*. Kuviossa 6 kuvatun signaalin Fourier-muunnos esitetään kuviossa 7.



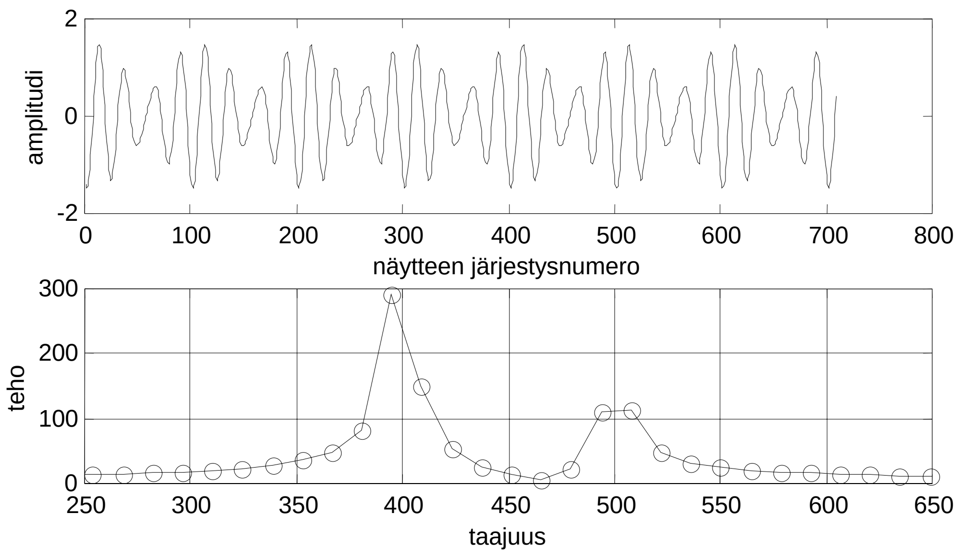

KUVIO 7. Diskreetti Fourier-muunnos kuvion 6 siniaallosta.

Fourier-muunnetun signaalin y-akselia kutsutaan matemaattisissa yhteyksissä amplitudiksi, mutta koska se on verrannollinen signaalin tehoon, kutsun sitä tehoksi, sillä se on selkeämpää ja havainnollisempaa. Esimerkkisignaalissamme Fourier-muunnoksen indeksit voidaan suoraan tulkita taajuutena, mikäli oletamme että näytteenottotaajuus on 25 näytettä sekunnissa, jolloin esimerkkisignaalimme on yhden sekunnin mittainen (Fourier-muunnetun signaalin indeksit voidaan suoraan ajatella taajuuksina ”[indeksi] värähdystä näytteen pituudessa”).

Tässä vaiheessa tulee huomioida, että kuvion 7 kaltaisen esityksen tuottamiseen tarvitaan muutamia välivaiheita, jotka olen jättänyt kuvaamatta. Kuviossa 7 nähdään vain osa diskreetin Fourier-muunnoksen tuottamasta vektorista. Tavallisesti vektoria tarkastellaan nollan hertsin ja ns. Nyquistin taajuuden väliltä. Laineen ja Lassfolkin (2001) mukaan ”Nyqvistin taajuus eli ns. ylärajataajuus, joka on puolet näytteenottotaajuudesta, on korkein digitaaliäänitteessä toistettava taajuus”. Esimerkkinäytteessämme Nyquistin taajuus on 12,5 Hz. Vektori kokonaisuudessaan on aina yhtä pitkä kuin muunnettavan signaalin vektori, toisin sanoen siinä on yhtä monta elementtiä. Tämä on olennaista monilla signaalinkäsittelyn osa-alueilla, sillä siitä seuraa että diskreetti Fourier-muunnos on häviötön prosessi, toisin sanoen informaatiota ei katoa muunnoksessa. Tämän vuoksi signaalin Fourier-muunnokselle voidaan tehdä käänteis-Fourier-muunnos, jolloin saadaan alkuperäinen signaali. Tätä ominaisuutta käytetään runsaasti äänisynteesissä, sillä Fourier-muunnettua signaalia voidaan muokata monin tavoin ennen käänteismuunnosta, esimerkiksi pidentämällä ääniä äänenkorkeuden muuttumatta. (Serra 1997, 33-45.)

### 6.2 Signaalin ikkunointi

Kuviossa 7 esitetty taajuustason kuvaaja on häiriötön ja eksakti; yhden hertsin taajuudella on havaittu tehoa, mutta millään muulla taajuudella tehoa ei ole. Tämä johtuu siitä, että esimerkkisignaalimme on hyvin keinotekoinen. Se on täysin jaksollinen, eli mikäli signaali olisi pidempi, se jatkuisi täsmälleen samanlaisena. Lisäksi signaali on täsmälleen yhden jakson (eli tässä tapauksessa yhden värähdyksen) pituinen, ja se alkaa amplitudista nolla sekä päättyy amplitudiin nolla. Todelliset ääninäytteet eivät ole täysin jaksollisia, sillä ei-synteettiset äänet muuttuvat kaiken aikaa (Haykin & Van Veen 1999, 648). Jaksollisuudessakin voidaan kuitenkin ajatella olevan astevaihtelua. Esimerkiksi kovat, soinnittomat konsonantit ovat kohinan kaltaisia eli hyvin satunnaisia, kun taas soinnilliset äänteet ovat lähes jaksollisia, toisin sanoen niissä on miltei samankaltaisina toistuvia elementtejä (Haykin & Van Veen 1999, 649). Todellinen äänisignaali ei myöskään normaalisti ala amplitudista nolla eikä lopu siihen. Otetaan uusi esimerkkisignaali, joka sisältää kaksi siniääntä, neljäsataa hertsiä ja viisisataa hertsiä. Viidensadan hertsin signaali on amplitudiltaan puolet neljänsadan hertsin signaalin amplitudista. Näytteenottotaajuus on 10000 näytettä sekunnissa. Otetaan signaalista 709 elementin pituinen pala, joka ei ala nollasta eikä lopu siihen, ja tarkastellaan tämän palan Fourier-muunnosta (kuvio 8).

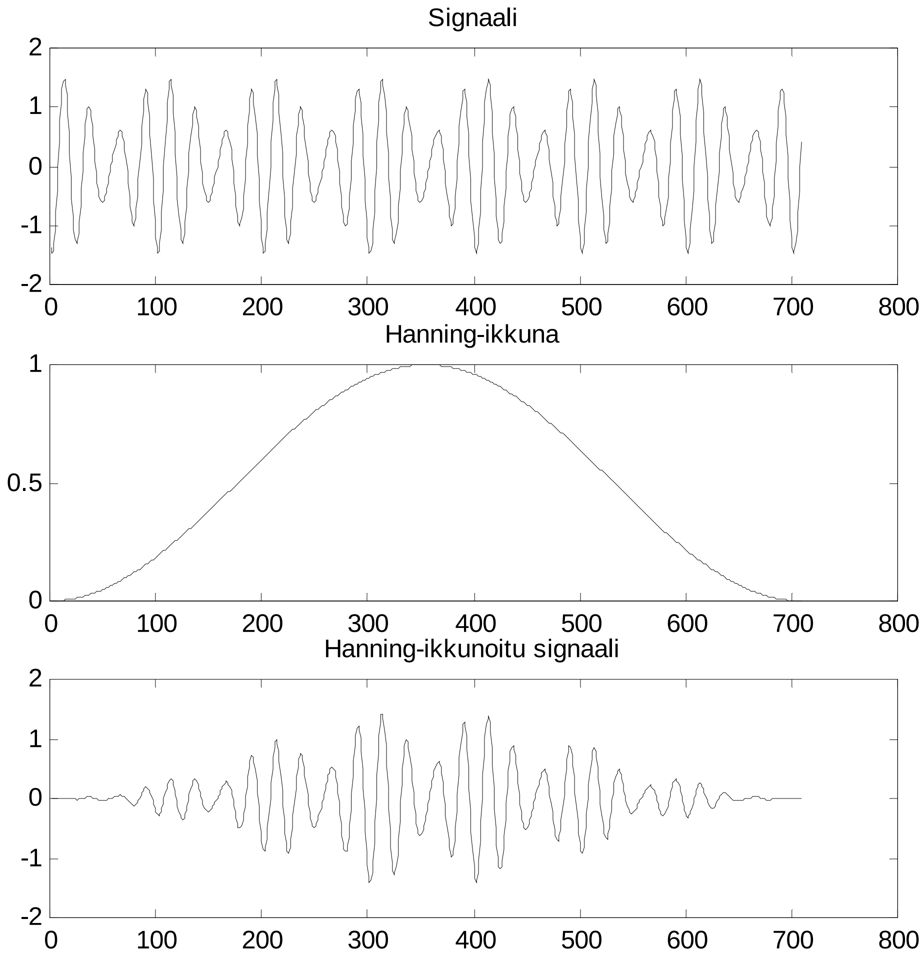



KUVIO 8. Signaali (400Hz & 500Hz, näytteenottotaajuus 10KHz) ja sen diskreetti Fourier-muunnos.

Kuviossa 8 ylempänä nähtävää signaalin aikatason kuvausta Laine ja Lassfolk kutsuvat *oskillogrammiksi*, ja alempana nähtävää taajuustason kuvausta *spektrogrammiksi* (Laine & Lassfolk 2001). Taajuustason kuvausta kutsutaan yleisesti myös signaalin *spektriksi* (Serra 1997, 35-37). Kuviossa 8 signaalin Fourier-muunnoksesta havaitaan, että se ei ole yhtä tarkka kuin kuviossa 7. Tehoa on jakautunut muuallekin kuin neljäänsataan ja viiteensataan hertsiin. Signaalin taajuuksia kuvaavat piikit eivät enää ole piikkejä vaan ikään kuin leveitä kukkuloita.

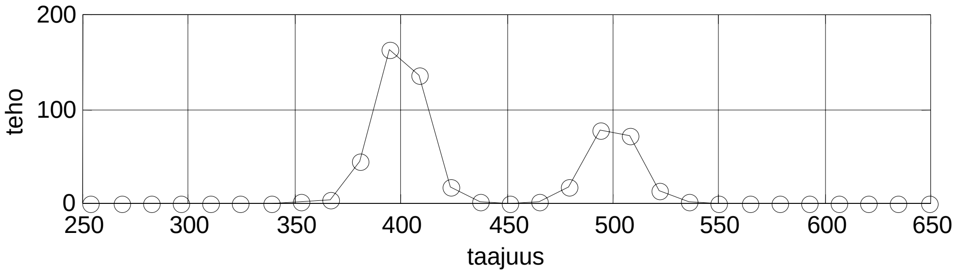
Tähän on kaksi syytä. Ensinnäkin signaalin alussa ja lopussa ei ollut amplitudin nollakohtaa, sillä tutkittava signaali ei ollut tasan signaalin jakson tai sen monikerran pituinen. Tämä näkyy ylimääräisenä tehona, joka jakautuu pitkin signaalin spektriä. Kuviossa 8 nähdään, että signaalissa näyttäisi olevan tehoa kaikilla taajuuksilla välillä 250Hz ... 650Hz, eli tehokäyrä ei kosketa nollaa missään kohdassa. Toiseksi havaitaan, että koska tutkittava näyte ei ollut signaalin jakson mittainen, mikään taajuustason kuvauksen vektorin elementti ei osu tasan neljäänsataan tai viiteensataan hertsiin (spektrogrammissa yksittäiset elementit on ympyröity). Tämäkin hajottaa tehoa pitkin spektriä, ja vaikeuttaa tarkkojen havaintojen tekemistä spektrogrammista. (mm. Smith 2003).

Ensimmäiseen ongelmaan eli signaalin reunoihin voidaan vaikuttaa erityyppisten aikaikkunoiden käytöllä. Tällöin tutkittava signaalivektori kerrotaan tekijöittäin samanpituisella vektorilla, joka tasaisesti häivyttää signaalivektorin alun ja lopun. Tällaisia aikaikkunoita ovat mm. Hanning, Hamming ja Blackman. Tässä tutkimuksessa käytetään Hanning-ikkunaa. Se on hieman gaussin käyrää muistuttava kuvio, jonka amplitudi vaihtelee nollan ja yhden välillä. Kun signaali kerrotaan tekijöittäin Hanning-ikkunalla, saadaan portaattomasti voimistuva ja hiljenevä signaali (kuvio 9).




KUVIO 9. Signaali (400Hz & 500Hz), samanpituinen Hanning-ikkuna, sekä näistä tekijöittäin kertomalla saatu Hanning-ikkunoitu signaali.

Kuviossa 10 nähdään Hanning-ikkunoidusta esimerkkisignaalista otettu Fourier-muunnos.




KUVIO 10. Hanning-ikkunoidun esimerkkisignaalin Fourier-muunnos

Kuviosta 10 voi havaita, että Hanning-ikkunoidun signaalin Fourier-muunnoksessa teho alle 350 hertsin sekä yli 550 hertsin taajuuksilla pysyy nollassa. Siltä osin tämän tutkimuksen kannalta hyödyttömän ja häiritsevän tehon määrä on pienentynyt, eli taajuustason esitys vastaa tältä osin paremmin signaalin akustista luonnetta. Silti tällaisesta spekrogrammista saadaan hyvin summittainen arvio signaalin taajuuksista, taajuuskäyrän huippujen paikoiksi saadaan 394.92Hz ja 493.65Hz. Näitä taajuuksia ei tarvitse hakea silmämääräisesti spektrogrammista, vaan ne saadaan ohjelmallisesti laskettua. Toisessa on virhettä 5.08Hz ja toisessa 6.35Hz. Seuraavassa keskitymme tämän virheen pienentämiseen.

### 6.3 Ikkunan pituuden vaikutus taajuusresoluutioon

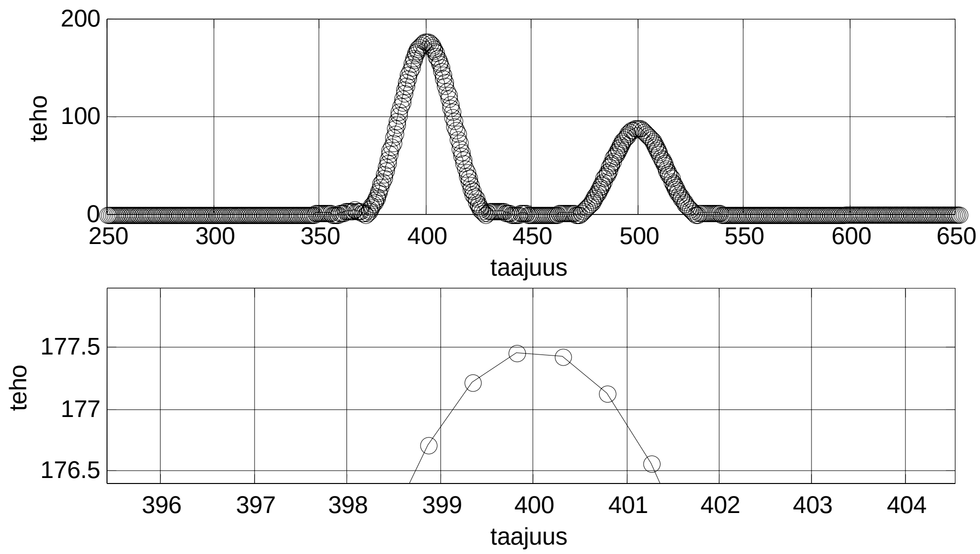
Kuten jo aiemmin on mainittu, diskreetin Fourier-muunnoksen tuottama vektori on yhtä pitkä kuin muunnettava signaalivektori, ja se kuvaa taajuuksia nollan hertsin ja näytteenottotaajuuden välillä[1]. Siten Fourier-muunnoksen taajuusresoluutio eli kahden peräkkäisen vektorin elementin etäisyys saadaan jakamalla näytteenottotaajuus signaalin pituudella. Esimerkkisignaalissamme (kuviot 8, 9 ja 10) taajuusresoluutio on siis 10000Hz / 709 $\approx$ 14,1Hz. Taajuusresoluutiota voidaan kasvattaa ottamalla alkuperäisestä signaalista pidempi näyte analysoitavaksi. Tässä kuitenkin piilee ongelma. Tähän mennessä käytetyt esimerkkisignaalit ovat olleet tietokoneella tuotettuja keinotekoisia signaaleja, jotka eivät ole muuttuneet lainkaan suhteessa aikaan. Todelliset musiikkisignaalit kuitenkin ovat käytännössä aina ajan suhteen muuttuvaisia. Koska signaalin taajuustason kuvaus ei sisällä aika-muuttujaa lainkaan, Fourier-muunnos ”litistää” kaiken ajassa tapahtuvan muuttumisen samaan spektriin. Fourier-muunnos ei toisin sanoen kerro missä vaiheessa tutkittavaa näytettä mikäkin sävel on esiintynyt. Jos tutkitaan esimerkiksi kuoromusiikkia, on mahdotonta pelkästään spektriä tutkimalla sanoa, onko spektrissä näkyvä leveä harjanne seurausta glissandosta vai stemmansisäisestä klusterin kaltaisesta epäpuhtaudesta. Toisin sanoen on mahdotonta sanoa, tapahtuivatko asiat yhtäaikaa vai peräkkäin. Mikäli siis näytettä pidennetään, taajuusresoluutio kasvaa mutta

---

[1] Joissain yhteyksissä mainitaan Fourier-muunnoksen olevan määritelty välillä -Fs/2 ... +Fs/2, jossa Fs on näytteenottotaajuus (mm. Laine & Lassfolk 2001). Tällöinkin kuitenkin koko taajuusalue on saman mittainen kuin 0 ... Fs, sillä Fs/2-(-Fs/2) = Fs.

erottelu ajan suhteen huononee. Jos otetaan lyhyempi näyte, saadaan tarkasteltua lyhyemmän ajan sisällä tapahtuvia asioita eli aikaresoluutio paranee, mutta taajuusresoluutio huononee. Tämä ongelma ei ole täysin poistettavissa, vaan kompromisseja joudutaan tekemään kulloisenkin tarpeen mukaan.

Tutkittavaa näytettä voidaan kuitenkin pidentää lisäämällä näytteen perään haluttu määrä nollia. Tätä kutsutaan englanniksi nimellä ”zero padding”. Mikäli nollia lisätään esimerkiksi näytteen pituutta vastaava määrä, signaalin pituus ja taajuustason kuvauksen tarkkuus kaksinkertaistuvat ilman että aikaresoluutio kärsisi. Kuviossa 11 nähdään, mitä tapahtuu kun esimerkkisignaalimme perään lisätään 20000 nollaa.




KUVIO 11. Nollilla pidennetyn, Hanning-ikkunoidun signaalin Fourier-muunnos sekä suurennos neljänsadan hertsin kohdalta.

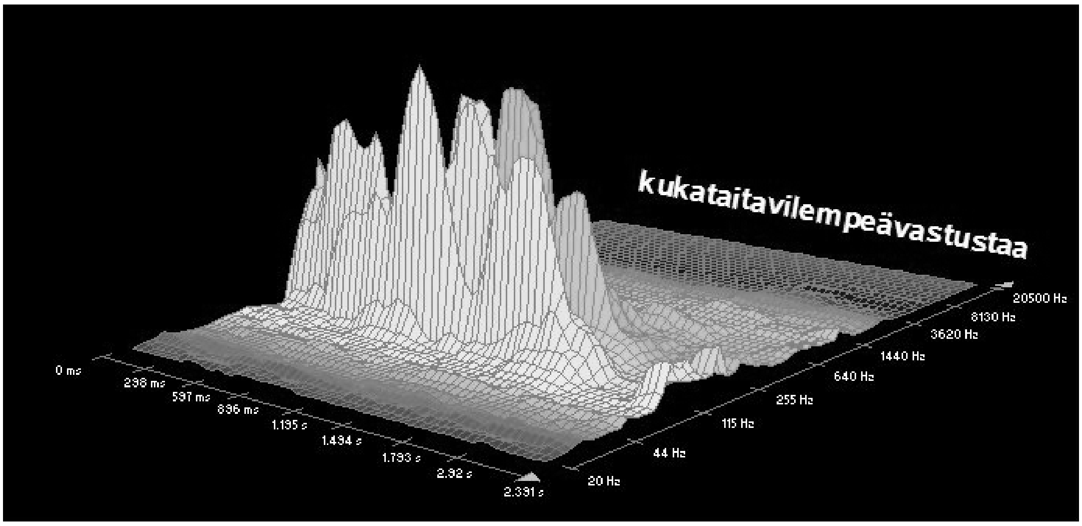
Kuviosta 11 huomataan, että vaikka taajuustason kuvaajan esitystarkkuus on parantunut huomattavasti, taajuuspiikit ovat edelleenkin leveitä harjanteita. Sen sijaan, että nähtäisiin terävät piikit neljänsadan ja viidensadan hertsin kohdalla, nähdään leveä harjanne. Signaalin taajuustason kuvaus ei siltä osin vastaa akustista todellisuutta, sillä esimerkkisignaalissammehan ei ole lainkaan tehoa esimerkiksi taajuudella 390 Hz, vaikka sitä kuviossa näyttäisikin olevan melko paljon. Nollia lisäämällä saadaan kuitenkin mittauksen tarkkuutta parannettua siten, että voidaan saada tarkemmat arvot taajuuksille. Esimerkissä signaalia on pidennetty noin 29-

kertaiseksi nollia lisäämällä, joten myös taajuustason kuvaajan esitystarkkuus on 29-kertaistunut. Nollia lisäämällä saatu uusi taajuustason kuvaajan esitystarkkuus on 10000Hz / 20709 ≈ 0,48Hz, mikä on jo melko hyvä tarkkuus. Taajuustason kuvauksesta saadaan tehokäyrän huippuarvo kohtaan 399.83Hz, missä on virhettä ainoastaan 0,17Hz.

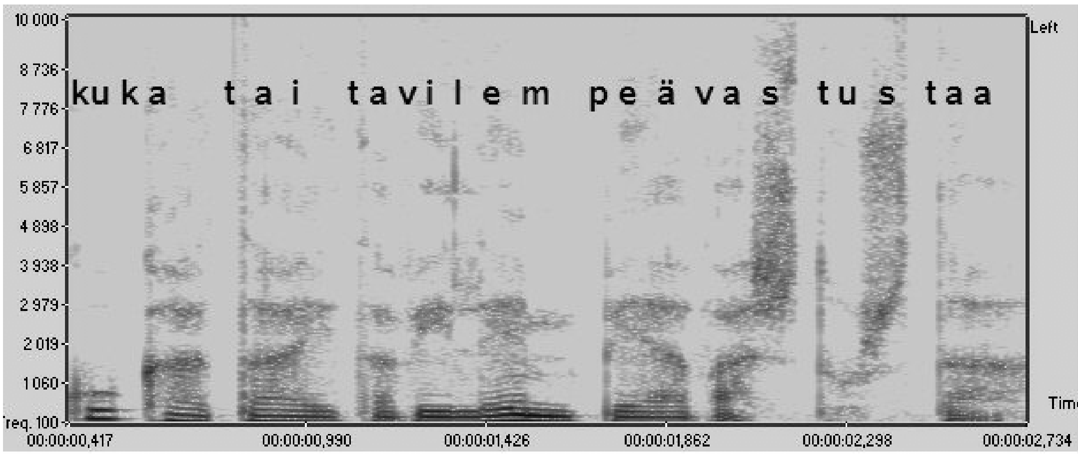
Jotta taajuustason kuvausta saataisiin edelleen parannettua ja harjanteita kavennettua, tutkittavan näytteen tulisi olla signaalin jakson mittainen. Joissain spektrianalyysiin tarkoitetuissa ohjelmissa, esimerkiksi AudioSculptissa, mitataankin ensin signaalin perusääneksen jakson pituus ja sovitetaan tutkittava signaali tämän mittaiseksi (Hanappe, Serra & Battier 1996, 35). Tässä tutkimuksessa tutkitaan kuitenkin moniäänisiä signaaleja, joille ei ole määriteltävissä yhtä perusäänestä, joten tätä keinoa ei voida käyttää hyväksi. Näin ollen tässä tutkimuksessa on tyydyttävä mahdollisimman tarkkaan arvioon signaalin taajuuksista.

### 6.4 Lyhyen aikavälin Fourier-muunnos

Yksittäisellä Fourier-muunnoksella saadaan signaalista ainoastaan kaksiulotteinen taajuustason kuvaus, josta ei nähdä mitään signaalin ajalliseen muuttumiseen liittyvää tietoa. Jotta saataisiin tutkittua myös signaalin muuttumista ajassa, käytetään ns. lyhyen aikavälin Fourier-muunnosta (engl. Short-Time Fourier Transform, STFT). Siinä otetaan signaalista useita yleensä samanpituisia näytteitä, jotka ikkunoidaan, pidennetään nollilla ja Fourier-muunnetaan yksi kerrallaan. Näin saadaan sarja taajuustason kuvaajia, jotka voidaan esittää kolmiulotteisena spektrogrammina tai kaksiulotteisena sonogrammina. Kolmiulotteisessa spektrogrammissa (kuvio 12) akselit ovat taajuus, aika ja teho. Kaksiulotteisessa sonogrammissa (kuvio 13) taas on aika- ja taajuusakselit, ja teho ilmoitetaan värien avulla. (Laine & Lassfolk 2001; Serra 1997, 45-50).




KUVIO 12. Kolmiulotteinen spektrogrammi (Korpinen 2005)




KUVIO 13. Kaksiulotteinen sonogrammi (Korpinen 2005)

Nämä signaalin kuvaustavat ovat visuaalisesti hyvin havainnollisia, niistä näkee signaalin perusolemuksen melko selkeästi. Tässä tutkimuksessa näitä kuvaustapoja ei ole kuitenkaan juurikaan käytetty, sillä tutkimuksessa tarvitaan tarkempia tietoja kuin mitä yleisluontoinen silmäys voi tarjota. Tässä tutkimuksessa on tarkasteltu vain kaksiulotteisia spektrogrammeja ja niissä esiintyvien huippujen tarkkaa paikkaa.

Lyhyen aikavälin Fourier-muunnoksessa peräkkäisten ikkunoiden välinen etäisyys (englanniksi *step size* tai *hop size*) vaikuttaa olennaisesti tuloksiin. Tavallisesti signaalista otetut ikkunat limittyvät, toisin sanoen peräkkäisten ikkunoiden välinen etäisyys on pienempi kuin ikkunan pituus. Saatetaan ottaa esimerkiksi kahden sekunnin pituisia ikkunoita siten, että ensimmäinen on väliltä 0s...2s, toinen väliltä 1s...3s, kolmas väliltä 2s...4s jne. Tällöin ikkunan pituus on kaksi sekuntia ja peräkkäisten ikkunoiden välinen etäisyys yksi sekunti, jolloin voidaan sanoa, että *limittymiskerroin* on kaksi, koska ikkuna on kaksi kertaa niin pitkä kuin peräkkäisten ikkunoiden välinen etäisyys.

Ikkunoiden limittäminen on tarpeellista, sillä Hanning-ikkuna vähentää muotonsa vuoksi ikkunan reunoilla tapahtuvien asioiden vaikutusta Fourier-muunnoksessa (ks. kuvio 9). Hanning-ikkunointi voidaan ajatella signaalin häivytyksenä (”feidauksena”) alussa ja lopussa. Näin signaalin keskivaihe painottuu analyysissä, ja alun ja lopun merkitys vähenee. Limittämällä ikkunoita saadaan signaali pala kerrallaan sijoittumaan Hanning-ikkunan keskivaiheille.

Hanappe, Serra ja Battier suosittelevat Hanning-ikkunaa käytettäessä, että limittymiskerroin olisi vähintään neljä. AudioSculpt-ohjelmassa limittymiskertoimen oletusarvo on kahdeksan. (Hanappe, Serra & Battier 1996, 32; Serra 1997, 52-53). Tätä tutkimusta varten kehitetyssä ohjelmassa käytetään kuitenkin limittymiskerrointa 2, sillä tässä menetelmällä ei aiota tarkastella kuvaajia jotka kuvaisivat koko tutkittavaa signaalia ja sen kehittymistä ajassa (kuviot 12 ja 13). Puhtauden mittaamisen tarpeisiin riittää, että saadaan pistokokeenomaisia näytteitä tutkittavasta signaalista tasaisin väliajoin. Tässä tutkimuksessa päädyttiin menetelmän raskauden vuoksi ottamaan vain yksittäisiä näytteitä signaaleista, mutta ohjelmalla voidaan tutkia myös peräkkäisten, limittyvien ikkunoiden Fourier-muunnoksia.

### 6.5 Muut menetelmät

Diskreetti Fourier-muunnos ei ole ainoa signaalien analysoinnissa käytettävä menetelmä. Muita menetelmiä, joilla signaaleista voidaan tutkia siinä esiintyviä taajuuksia ovat mm. autokorrelaatio, LPC (linear prediction), filtterien käyttö ja AMDF (average magnitude difference function) (de Cheveigné 1993; Hanappe ym. 1996; Serra 1997). Lisäksi on monia muitakin menetelmiä. Tätä tutkimusta varten tutustuttiin hieman autokorrelaatioon. Se toimii lähinnä yksiäänisillä signaaleilla, ja sillä saadaan Fourier-muunnosta parempi resoluutio ajan suhteen.

Testasimme autokorrelaatiota yksiäänisellä, keinotekoisella neljänsadan hertsin siniaallolla. Saimme oikean ja hyvin tarkan tuloksen. Ajattelimme, että voisimme ehkä käyttää filttereitä saadaksemme moniäänisestä signaalista eroteltua yksittäiset äänet, joiden taajuudet voitaisiin mitata autokorrelaatiolla. Seuraavaksi testasimme, miten autokorrelaatio toimii signaaleilla, joissa on enemmän kuin yksi ääni, eli joita voitaisiin ajatella äärimmäisen häiriöisinä yksiäänisinä signaaleina. Teimme keinotekoisen signaalin, jossa oli kaksi yhtä vahvaa siniaaltoa, neljäsataa ja viisisataa hertsiä. Oletimme, että autokorrelaatio mittaisi jommankumman näistä taajuuksista tai antaisi jonkin omituisen tuloksen tai pysähtyisi virheilmoitukseen, mutta mitään näistä ei tapahtunut. Saimme mittaustulokseksi taajuuden, joka oli hieman päälle 447 hertsiä. Suurin huolenaiheemme ei ollut tuloksen virheellisyys vaan se, että tuloksesta ei voinut millään tavalla päätellä, että mittauksessa olisi jotain vialla. Mittaustulos näytti yhtä puhtaalta, kauniilta ja häiriöttömältä kuin jos mitattava signaali olisi todella ollut taajuudeltaan hieman päälle 447 hertsiä. Myös Brown ja Zhang (1991) mainitsevat tämän ongelman: ”perinteinen autokorrelaatio palauttaa kahden sävelen keskiarvon joissain siirtymävaiheissa[2]” (Brown & Zhang 1991, 2354) (siirtymävaiheella tarkoitetaan tässä tilannetta, jossa uusi ääni on alkanut mutta edellinen ei ole vielä sammunut). Päättelimme tästä, että autokorrelaatiossa signaalin häiriöt saattavat vääristää tulosta vaikeasti ennustettavalla ja vaikeasti havaittavalla tavalla, joten päätimme pitäytyä Fourier-muunnoksessa ja sen sovittamisessa toimimaan mahdollisimman hyvin aineistomme kanssa.

Fourier-muunnos ei varmastikaan ole tarkin tapa mitata taajuuksia signaaleista, mutta sillä on useita etuja puolellaan. Ensinnäkin se toimii myös moniäänisillä signaaleilla. Toiseksi se on melko yksinkertainen menetelmä, joten sitä pystyvät käyttämään muutkin kuin signaalinkäsittelyn ammattilaiset. Kolmanneksi se sietää virheitä ja häiriöitä hyvin. Mikäli signaali on häiriöinen myös sen taajuustason kuvaus on häiriöinen, joten mahdolliset häiriöt ovat silmin havaittavissa kuvaajasta. Tämä pienentää harhaanjohtavien tai väärien tulosten todennäköisyyttä. Neljänneksi, lyhyen aikavälin Fourier-muunnos on hyvin havainnollinen menetelmä, sillä se toimii hieman samaan tapaan kuin ihmiskorva, joka myöskin tunnistaa äänen

[2] “conventional autocorrelation returns the average of two notes in some transition regions”, kirjoittajan suomennos.

muodostavia taajuuksia millä tahansa annetulla hetkellä (Serra 1997). Toisaalta Fourier-muunnosta myös kritisoidaan siitä, että se toimii hieman eri tavalla kuin korva, sillä Fourier-muunnoksen spektrogrammin taajuusasteikko on lineaarinen, kun taas ihmiskorva kuulee taajuudet logaritmisesti (Laine & Lassfolk 2001). Tämä tarkoittaa samalla myös sitä, että Fourier-muunnoksen taajuusresoluutio pysyy vakiona sekä korkeilla että matalilla taajuuksilla. Jos esimerkiksi taajuusresoluutio olisi viisi hertsiä, tämä tarkoittaisi suuren D:n kohdalla noin puolisävelaskelta ja kaksiviivaisen a:n kohdalla suurin piirtein puolisävelaskeleen kymmenesosaa. Fourier-muunnoksen tarkkuus on siis huonompi matalilla taajuuksilla kuin korkeilla taajuuksilla. Lineaarisen asteikon käytöstä on kuitenkin myös hyötyä: kunkin sävelen osaäänekset esiintyvät taajuustason kuvauksessa tasaisin välimatkoin, kun taas esimerkiksi nuottiviivastoon merkittynä osaäänessarja tihenee ylöspäin mentäessä.

### 6.6 Mittausohjelman kirjoitus

Taajuusanalyysimetodia alettiin kehittää syksyllä 2003. Päätimme Sampsa Laineen kanssa kirjoittaa ohjelmaa MATLAB:lla. MATLAB on paitsi laskentaan, datan analysointiin ja matemaattisten ohjelmien kirjoitukseen käytettävä ohjelma, myös sen sisällä käytettävä ohjelmointikieli. Termi ”MATLAB-ohjelma” voi siis viitata joko koko matemaattisten ohjelmien kehitysympäristöön tai ohjelmaan, jota ajetaan MATLAB:ssa.

Minun kannaltani edessä oli valtava työsarka. Projektin alkaessa en tiennyt mitään MATLAB:sta enkä Fourier-muunnoksesta. En myöskään ole käynyt ainuttakaan signaaliprosessoinnin kurssia joten olin täysin lukiomatematiikan varassa. Huomasin pian prosessin edetessä, että lukiomatematiikka ei riitä alkuunkaan Fourier-muunnoksen kunnolliseen ymmärtämiseen joten jouduin opiskelemaan itsenäisesti melkoisen paljon matematiikkaa. Selvitin itsenäisesti, miten Fourier-muunnokset matematiikan tasolla toimivat (mm. Smith 2003 on hyvin perusteellinen selvitys aiheesta), mutta tämän tutkimuksen kannalta ei ole tarpeen selvittää sitä sen tarkemmin kuin mitä tässä luvussa on tehty. Sampsa osasi tekniikan alan ihmisenä MATLAB:n käytön ja tiesi jonkin verran Fourier-muunnoksista. Projektin alkuvaiheessa mietimme jatkuvasti yhdessä, mitä ohjelman tulisi tehdä, ja Sampsa kirjoitti varsinaista ohjelmakoodia. Projektin edetessä opin lukemaan ohjelmakoodia ja myöhemmin myös kirjoittamaan sitä. Syvensin samaan aikaan tietojani Fourier-muunnoksesta ja askel kerrallaan saimme ohjelman antamia tuloksia tarkennettua tutkimuksen vaatimalle tasolle. Tämä tapahtui lisäämällä melko raakaan versioon Hanning-ikkunointi, ikkunoiden limitys ja näytteen pidentäminen nollilla. Tässä vaiheessa arvelimme, että taajuuksien mittaamiseen täytyy olla tarkempiakin tapoja ja kokeilimme autokorrelaatiota huonoin seurauksin. Palasimme takaisin Fourier-muunnokseen ja tarkkuutta parantaaksemme lisäsimme nollien määrää huomattavasti. Viimeiset parannukset ja lisäykset ohjelmaan kirjoitin yksin keväällä 2006. Näitä ovat mm. FFT-yhteensopivuus, alkeellinen ”käyttöliittymä” ja paikallisten maksimien sijainnin määrittäminen taajuustasolla. Ohjelmalistaukset ovat liitteessä 1.

### 6.7 Ohjelman rakenne

Taajuusanalyysiohjelmamme koostuu itse asiassa kahdesta ohjelmasta. Toinen on ding4.m, joka on varsinainen pääohjelma ja toinen on ourfft.m, joka on diskreetin Fourier-muunnoksen suorittava aliohjelma. MATLAB-ohjelmointikielisen ohjelman tiedostotunnus on ”.m”. Kuvaan tässä ohjelman toiminnan vain suurpiirteisesti.

MATLAB-ohjelmalistauksissa kaikki rivit, jotka alkavat prosenttimerkillä (%) ovat niin sanottuja kommenttirivejä, eikä niitä huomioida ohjelman suorituksessa. Ohjelmalistauksissa on paljon turhia rivejä, joita syntyy kun jossakin ohjelmoinnin välivaiheessa jotakin toimintoa muutetaan, ja halutaan vanhan komennon jäävän silti näkyviin, ikään kuin muistutuksena ohjelman kirjoittajalle. Tällöin vanhan komennon eteen laitetaan prosenttimerkki, jolloin ohjelma ohittaa tämän kohdan. Koska ohjelma on tarkoitettu lähinnä omaan käyttöön, en ole näitä rivejä ohjelmista poistanut, joten ohjelma näyttää jonkun toisen silmiin melko suttuiselta. Ohjelmia saa kuitenkin kuka tahansa halutessaan käyttää.

Ohjelma käynnistetään ajamalla ding4.m. Kommenttirivien jälkeen ohjelma lukee komennossa määritellyn äänitiedoston ja sijoittaa muuttujiin varsinaisen äänidatan ja näytteenottotaajuuden. Tämän jälkeen äänidatasta otetaan tarkastelun alle vain toinen kanava, mikäli kyseessä on stereoääni. Muuttuja ”dists” määrää Fourier-muunnettavien ikkunoiden välimatkan (step size), joka on samalla puolet Fourier-muunnoksen ikkunan pituudesta. Päädyimme käyttämään ikkunan pituuksia 0,2s ja 0,5s. Muuttuja ”alkukohta” määrää mistä kohdasta näytettä mittaaminen aloitetaan. Sisennetyt rivit muodostavat ohjelman ydinosan. Tässä signaalista otetaan yksi kerrallaan pätkiä, jotka hanning-ikkunoidaan, pidennetään nollilla ja lähetetään ourfft-aliohjelmalle Fourier-muunnettaviksi.

Signaalin pidentäminen nollilla ei kuulunut ohjelman raakaversioon. Se otettiin mukaan, jotta analyysin tarkkuutta saataisiin parannettua. Tässä ohjelmassa käytetty nollien määrä poikkeaa huomattavasti yleisesti käytetyistä määristä. Esimerkiksi AudioSculpt -ohjelma pidentää signaalia nollilla korkeintaan kaksinkertaiseksi alkuperäiseen pituuteen nähden (Hanappe ym. 1996,). Tässä ohjelmassa 8820–22050 näytettä pitkän ikkunan perään lisätään nollia siten, että siitä tulee 1 048 576 näytteen pituinen. Fourier-muunnettava ikkuna pitenee siis 48–119-kertaiseksi. Vastaavasti taajuustason kuvaajan esitystarkkuus paranee 48–119-kertaiseksi.

Nollien lisääminen ikkunoituun signaaliin ei paranna Fourier-muunnoksen kykyä erotella taajuuskomponentteja toisistaan, mutta se parantaa taajuustason kuvaajan esitystarkkuutta ja tekee sen tarkastelun helpommaksi (Hanappe ym. 1996, 36). Tämä näkyy niin, että koska jopa ohjelmallisesti tuotetut äänekset näkyvät edelleen terävien piikkien sijaan leveinä harjanteina, ohjelma ei kykene erottelemaan hyvin lähekkäisiä ääniä toisistaan vaan ne sulautuvat yhdeksi harjanteeksi. Sen sijaan harjanteiden huippujen paikka voidaan nollien lisäämisen vuoksi määrittää hyvin suurella tarkkuudella. Varsinainen taajuusresoluutio on edelleen ikkunan pituudesta (200ms tai 500ms) 44100Hz / 8820 eli 5Hz tai 44100 / 22050 eli 2Hz. Nämä vastaavat pienen oktaavialan a:n korkeudella 77 ja 31 senttiä ja yksiviivaisen a:n korkeudella 20 ja 8 senttiä. Taajuustason kuvaajan esitystarkkuus sen sijaan on 44100Hz / 1048576 eli 0,042Hz, mikä vastaa edellä mainituilla korkeuksilla 0,66 senttiä ja 0,17 senttiä.

Nollilla pidentämisen jälkeen näyte annetaan ourfft-aliohjelmalle, joka suorittaa Fourier-muunnoksen FFT-algoritmia (fast fourier transform) käyttäen. FFT on hyvin nopea Fourier-muunnoksen algoritmi, jota voidaan käyttää vain sellaisille näytteille, joiden pituus on jokin kahden potenssi. Tämän vuoksi nollilla pidennetyn ikkunan pituus on 1048576 eli $2^{20}$. FFT:tä käyttämällä Fourier-muunnokseen kuluu noin 30 sekuntia, kun muutoin siihen kuluisi tunteja.

Tämän jälkeen ohjelma piirtää näytölle signaalin taajuustason kuvaajan. Sitten ohjelma etsii Fourier-muunnetusta signaalista paikalliset maksimit eli kuvaajassa näkyvien ”kukkuloiden” huippukohdat, ja poimii niistä kaksikymmentä suurimman tehon omaavaa huippukohtaa, jotka merkitään kuvaajaan neliöillä.

Tämän jälkeen ohjelma pysähtyy odottamaan käyttäjää. Käyttäjä voi kuvaajaa tarkasteltuaan joko jatkaa ohjelman suoritusta tai lopettaa sen. Mikäli suoritusta jatketaan, ohjelma ottaa signaalista seuraavan pätkän käsittelyyn ja prosessi toistuu. Kun suoritus lopetetaan tai ohjelma saavuttaa äänitiedoston lopun, ohjelma kirjoittaa aiemmin saadut taajuustason kuvaajan huippukohdat taulukkolaskentaohjelmien ymmärtämään wk1-tiedostoon. Tässä tiedostossa ovat kaikkien sillä ohjelman ajokerralla tutkittujen signaalinpätkien huippujen sijainnit kolmessa muodossa: hertseinä, sentteinä 440Hz nähden sekä sentteinä 440Hz nähden transponoituna samaan oktaavialaan ($a^1$...$a^2$). Samaan oktaavialaan transponointi helpottaa sävelen tunnistamista.

Ohjelman automatisoidut toiminnot loppuvat tähän. Näytteitä analysoitaessa on siis tutkittava sekä taajuustason kuvaajaa että huippujen taajuuksia rinnakkain, jotta voisi muodostaa kunnollisen kuvan puhtaustilanteesta. Myös sävelien tunnistus ja intervallien laajuuksien laskeminen on tehtävä käsin yksi kerrallaan.

## 7 Aineiston keruu

Tutkimusaineistoksi tarvittiin autenttisissa tilanteissa äänitettyä kuoromusiikkia. Päätin äänittää juuri WiOLia, sillä laulan itse siinä ja tunnen kuoron hyvin. Kuorolaulun puhtauden suhteen kyseessä on siis tapaustutkimus, jossa tutkimuskohde on WiOL lukukaudella 2003–2004. Halusin saada tutkimukseeni myös tietoa siitä, miltä mitattava materiaali kuulostaa erittäin tarkkakorvaisen ihmisen korvaan, joten kuuntelutin näytteitä Tuuli Lindebergillä ja haastattelin häntä.

### 7.1 Wiipurilaisen Osakunnan Laulajat

Wiipurilaisen Osakunnan Laulajat eli WiOL on yksi Helsingin yliopiston opiskelijakuoroista. Kuoro toimii kaikkien Liisankadun osakuntien tiloja käyttävien osakuntien eli Wiipurilaisen, Karjalaisen sekä Kymenlaakson osakunnan kuorona. Osakunnan tai ylioppilaskunnan jäsenyys ei kuitenkaan ole rivikuorolaisille pakollista, ja kuoroon kuuluukin monia laulajia, jotka ovat joko valmistuneita tai opiskelevat muualla kuin Helsingin yliopistossa. Keväällä 2005 kuoron jäsentietokannasta tehtyjen laskelmien perusteella kuorolaisten keski-ikä oli 26,2 vuotta ja kuorolaiset olivat olleet kuorossa keskimäärin 3,3 lukuvuotta (Kuntsi 2006). Äänitysten aikaan lukuvuonna 2003-2004 kuoron vahvuus vaihteli 30–35 laulajan välillä. Tenoreita oli vain viisi muiden stemmojen ollessa suunnilleen tasavahvoja.

Luonnehtisin WiOLin olevan tasoltaan keskitasoinen yliopistokuoro. Helsingin yliopiston alaisten kuorojen joukossa WiOL ei ole tasokkain, muttei myöskään tasoltaan heikoin. Jos tarkastellaan kaikkien suomen kuorojen joukkoa, WiOL sijoittuu tasovertailussa melko korkealle. Käytännössä kaikki kuorolaiset ovat nuotinlukutaitoisia, ja suurin osa osaa säveltapailua edes auttavasti. Perinteisesti WiOLin on ajateltu olevan opiskelijakuoroista sosiaalisimpia. Tämä näkyy vahvasti siinä, että monen kuorolaisen pääasiallinen kaveripiiri on WiOL ja kuorolaiset viettävät paljon aikaa yhdessä harjoitusten ulkopuolellakin. Uskoisin, että hyvä yhteishenki kuuluu myös laulussa. Toisaalta olen myös joskus törmännyt läheisten suhteiden kääntöpuoleen. Kun kuorossa on yhtä paljon kyse sosiaalisista suhteista kuin musiikista, voi olla vaikeaa esimerkiksi pienryhmäesiintymisiin laulajia valitessa painottaa musiikillista taitoa.

WiOL harjoittelee kerran viikossa osakunnan tiloissa. WiOLin keskimääräinen lukuvuosi käsittää syyslukukaudella omia joulukonsertteja tai syyskonsertin sekä kaikkien HY:n kuorojen yhteisen Akateemisen Joulukonsertin. Keväisin WiOL järjestää pääsiäisviikolla passiokonsertteja, joissa esitämme säestyksettömiä kuoropassioita. Lisäksi järjestetään kevätkonsertti. Pienempiä koko kuoron tai kuoron pienryhmien esiintymisiä on runsaasti. Ulkomaanmatkoja WiOL tekee yleensä kahden vuoden välein.

### 7.2 Äänittäminen

Kuoroa äänitettäessä halusin painottaa tilanteiden autenttisuutta ja arkipäiväisyyttä. Siksi nauhoitin ainoastaan kuoron harjoituksia ja esiintymisiä, toisin sanoen mitään ei tehty ”vain äänitystä varten”, vaan pikemminkin pyrin kiinnittämään huomion pois äänityslaitteistosta. Käytin nauhoituksissa Sibelius-Akatemian Pitäjänmäen palvelupisteestä lainattavissa ollutta äänityslaitteistoa, joka käsitti kannettavan DAT-nauhurin (Tascam DA-P1) sekä laadukkaan stereomikrofonin (Shure VP88).

Äänitysten aikaan tutkimuskysymykseni eivät vielä olleet hahmottuneet nykyiseen muotoonsa, joten äänitin paljon materiaalia jotta se varmasti riittäisi tutkimusaineistoksi. Tutkimusongelmien tarkentuessa mittausmenetelmän tutkimisen suuntaan äänittämäni aineiston rooli muuttui laajasta tutkimusaineistosta mittausmenetelmän testimateriaaliksi. Taulukossa 1 on lueteltu äänittämäni materiaali.

Äänitin yhteensä neljä konserttia sekä neljä harjoitusta. Imatran ja Lappeenrannan konsertit kuuluivat syksyn 2003 maakuntakiertueeseen, ja näiden konserttien nauhoituksista käytin lopulta vain niitä kappaleita, jotka esitettiin myös kevään 2004 konserteissa. Lämmittelyharjoituksella tarkoitan tässä yhteydessä viime hetken harjoittelua konserttipaikalla juuri ennen konserttia. Kaunialan konsertti oli samalla kevätkonsertin kenraaliharjoitus ja se pidettiin Kaunialan sotavammasairaalassa. Kevätkonsertti pidettiin Balderin salissa.

TAULUKKO 1. Tutkimusta varten äänitetty materiaali

| Tilanne | lyhenne | päivämäärä | äänitteen kesto |
|---|---|---|---|
| konsertti Imatralla | K1 | 22.11.2003 | 65min |
| konsertti Lappeenrannassa | K2 | 23.11.2003 | 60min |
| normaali harjoitus | H1 | 3.5.2004 | 85min |
| normaali harjoitus | H2 | 10.5.2004 | 177min |
| lämmittelyharjoitus | H3 | 17.5.2004 | 48min |
| Kaunialan konsertti | K3 | 17.5.2004 | 43min |
| lämmittelyharjoitus | H4 | 20.5.2004 | 67min |
| kevätkonsertti | K4 | 20.5.2004 | 54min |
| yhteensä | | | 9h 59min |

Äänityksissä sijoitin mikrofonin kuoron eteen mahdollisimman keskelle. Mikrofoni oli nostettu telineellä noin kahden metrin korkeuteen. Konserteissa ja lämmittelyharjoituksissa mikrofoni oli suoraan kuoronjohtajan takana ja normaaleissa harjoituksissa kuoronjohtajan vieressä. Käytin äänityksissä 44,1 kilohertsin näytteenottotaajuutta ja kuudentoista bitin resoluutiota jotta formaattia ei tarvitsisi muuttaa äänityksiä CD-levylle siirrettäessä.

Nauhoituksissa ilmeni, että nauhoituslaitteisto oli hyvin herkkä sähköisille häiriöille. Tämä tuotti äänitysten vasempaan kanavaan melko kuuluvan verkkovirtahurinan, joka oli erityisen voimakas mikäli tiloissa oli himmentimin varustetut valot. Laitteisto kävi äänitysten välillä huollossa, mutta häiriö ei korjaantunut. Päätin, että koska mittausmenetelmäni tarkastelisi joka tapauksessa vain yhtä äänikanavaa kerrallaan, käyttäisin mittauksiin ainoastaan oikeaa kanavaa. Tästä johtuen bassot ja sopraanot saattavat kuulua näytteissä todellisuutta vaimeampina, sillä WiOLin kuoromuodossa he ovat johtajasta katsoen vasemmalla puolella. Ero on kuitenkin hyvin pieni, ja muihin tekijöihin vain oikean kanavan käyttö ei vaikuta.

Äänitetty materiaali siirrettiin Musiikkikasvatusosaston studion tietokoneelle wav-tiedostoiksi studion DAT-nauhurin digitaalisen SPDIF-liitännän kautta. Tällöin materiaali pysyi siirrossa digitaalisessa muodossa ja turhilta DA- ja AD-muunnoksilta vältyttiin. Studion tietokoneelta siirsin wav-tiedostot cd-rom-levyille ja levyiltä kotona tietokoneen kiintolevylle. Materiaalia kertyi yhteensä noin kuusi gigatavua.

### 7.3 Näytteiden valinta

Nauhoituksia kertyi yhteensä noin kymmenen tuntia. Tästä täytyi valita analysoitavaksi vain hyvin lyhyitä katkelmia, sillä taajuusanalyysimetodimme on hyvin hidas ja soveltuu parhaiten korkeintaan muutaman sekunnin pituisen näytteen analysointiin kerrallaan. Näytteitä valitessani kiinnitin huomiota katkelman harmonian selkeyteen, sävelten kestoon, katkelman kiinnostavuuteen sekä nauhoitettujen ottojen määrään. Pyrin valitsemaan näytteitä, joissa harmonia on mahdollisimman selkeä eli sointujen ja sävelten funktiot ovat melko yksiselitteisiä, jotta katkelman puhtausideaali olisi myös mahdollisimman yksiselitteinen. Tämän vuoksi hylkäsin mm. Ravelin sarjan ”Trois chansons”, joka oli tonaliteettinsa puolesta liian moderni analysoitavaksi tonaalisen musiikin puhtauskäsitysten valossa. Pyrin myös valitsemaan katkelmia, joissa sävelet ovat pitkiä ja soinnuilla on aikaa soida, sillä mittausmetodimme resoluutio ajan suhteen on melko heikko. Kuuloaisti myös antaa helpommin anteeksi suuriakin epäpuhtauksia lyhyissä sävelissä, joten oli hedelmällisempää tutkia pitkiä ääniä. Kiinnitin myös huomiota näytteen kiinnostavuuteen puhtauden tutkimisen kannalta. Vielä viimeiseksi valitsin sellaisia kappaleita, jotka esiintyivät nauhoituksissa vähintään kolmeen kertaan, jotta voisin vertailla eri versioita keskenään. Olin hylännyt jo ennen tätä ne varhaiset harjoitusotot, joissa on vielä suuria vaikeuksia säveltapailun kanssa, sillä väärien äänien puhtauden tutkiminen ei ole mielekästä.

Valitsin näytteet ennen Tuuli Lindebergin haastattelua, koska halusin käyttää täsmälleen samoja näytteitä sekä haastatteluun että mittaukseen. Taulukossa 2 on luettelo valituista näytteistä. Sibeliuksen Finlandia-hymnin (N1–N3) päätin ottaa mukaan kokonaan, sillä se ei sisällä kohtia, jotka eivät soveltuisi analysoitaviksi menetelmällämme. Toivo Kuulan kappaleesta ”Siell’ on kauan jo kukkineet omenapuut” (N9–N11) valitsin keskeltä kappaletta katkelman, joka sisältää mieskuorojakson. Jussi Chydeniuksen laulusarjasta ”Laulan voiessani” otin mukaan kaksi laulua. Laulusta ”Muut istui iloitsemahan” (N4–N8) valitsin katkelman, jossa sopraanosolisti laulaa naiskuoron pitkien sointujen päällä. Laulusta ”Onpa tietty tietyssäni” (N12–N17) valitsin mieskuoron laulamat neljä tahtia kappaleen alusta. Sibeliuksen laulusta ”Rakastava” valitsin kaksi katkelmaa: kappaleen ensimmäiset kahdeksan tahtia (N18–N21) sekä osan jaksosta, jossa nais- ja miessolisti laulavat kuoron säestävien sointujen kanssa (N22–N26). Jälkimmäisen katkelman valitsin osittain siitä syystä, että siinä koettiin suuria ongelmia juuri puhtauteen liittyen.

Kun näytteet oli valittu, kopion katkelmat erillisiksi tiedostoiksi ja normalisoin ne. Normalisoinnilla tarkoitetaan näytteiden äänenvoimakkuuden nostamista siten, että jokaisen näytteen voimakkain kohta saavuttaa säädetyn maksimivoimakkuuden, joka tässä tapauksessa oli -6dB. Normalisointi helpottaa sekä hiljaisten näytteiden mittaamista että kuuntelua. Valittujen katkelmien nuotit ovat liitteessä 2. Nuotteihin on merkitty tahtinumerot valitun katkelman alueelle.

TAULUKKO 2. Valitut musiikkinäytteet

| Näyte | Kappale | Tilanne[a] | Kesto |
|---|---|---|---|
| N1 | Finlandia-hymni | H2a[b] | 1min 5s |
| N2 | Finlandia-hymni | H2b[b] | 2min 25s |
| N3 | Finlandia-hymni | K3 | 2min 4s |
| N4 | Muut istui iloitsemahan | K3 | 40s |
| N5 | Muut istui iloitsemahan | H4 | 38s |
| N6 | Muut istui iloitsemahan | K4 | 40s |
| N7 | Muut istui iloitsemahan | K1 | 37s |
| N8 | Muut istui iloitsemahan | K2 | 36s |
| N9 | Omenapuut | K3 | 1min 13s |
| N10 | Omenapuut | H4 | 1min 15s |
| N11 | Omenapuut | K4 | 1min 13s |
| N12 | Onpa tietty tietyssäni | H2 | 13s |
| N13 | Onpa tietty tietyssäni | K3 | 12s |
| N14 | Onpa tietty tietyssäni | H4 | 11s |

(jatkuu)

TAULUKKO 2. (jatkuu)

| | | | |
|---|---|---|---|
| N15 | Onpa tietty tietyssäni | K4 | 11s |
| N16 | Onpa tietty tietyssäni | K1 | 12s |
| N17 | Onpa tietty tietyssäni | K2 | 11s |
| N18 | Rakastava, alku | H1 | 23s |
| N19 | Rakastava, alku | K3 | 23s |
| N20 | Rakastava, alku | H4 | 21s |
| N21 | Rakastava, alku | K4 | 23s |
| N22 | Rakastava, soolo | H2 | 1min 12s |
| N23 | Rakastava, soolo | H3 | 1min 18s |
| N24 | Rakastava, soolo | K3 | 1min 10s |
| N25 | Rakastava, soolo | H4 | 1min 15s |
| N26 | Rakastava, soolo | K4 | 1min 8s |

[a] katso TAULUKKO 1.
[b] H2a ja H2b viittaavat eri ottoihin saman harjoituksen aikana

### 7.4 Tuuli Lindebergin haastattelu

Alkuperäinen tutkimusajatukseni oli vertailla kuultua ja mitattua epäpuhtautta toisiinsa. Oma kykyni kuulla epäpuhtautta on hyvin rajallinen, joten päätin kuunteluttaa näytteitä tarkkakorvaisella asiantuntijalla. Ensimmäisenä mieleeni tuli Tuuli Lindeberg, joka toimi taiteellisena tuottajana WiOLin levyttäessä Hugo Distlerin koraalipassion syksyllä 2003. Tuuli suostui yhteistyöhön, ja haastattelin häntä 11.4.2006 hänen kotonaan.

Minulla oli haastattelutilanteessa mukana valitsemani näytteet normalisoituina CD-levyllä ja kappaleiden nuotit. Nauhurina käytin Creative MuVo TX FM -mp3-soitinta. Kuuntelimme kaikki näytteet kertaalleen, ja jokaisen näytteen jälkeen Tuuli kommentoi kuulemaansa. Minulla ei ollut mitään varsinaisia kysymyksiä, vaan haastattelussa oli ajatuksena antaa Tuulin kertoa vapaasti, mitä hänelle tulee näytteen puhtaudesta mieleen. Tämä oli jälkikäteen ajateltuna ehkä virhe, sillä Tuuli puhui näytteistä lähinnä tuottajan näkökulmasta eli arvioi epäpuhtauden syitä ja keinoja puhtauden parantamiseen. Olisin kaivannut mittausten arvioinnin tueksi ennemminkin melko mekaanisia arvioita siitä, miten puhtaalta tai epäpuhtaalta mikäkin kohta vaikuttaa. Ymmärsin tämän kuitenkin vasta haastattelun jälkeen. Osasyynä tähän oli varmasti se, että olin valvonut haastattelua edeltävän yön ja tehnyt tätä tutkielmaa noin 30 tuntia yhtäjaksoisesti, joten keskittymiskykyni ei ollut paras mahdollinen.

Haastattelu kesti kaksi tuntia. Näytteiden yhteiskesto on noin kaksikymmentä minuuttia, joten varsinaista haastattelua kertyi noin tunnin ja neljänkymmenen minuutin verran. Siirsin haastattelun mp3-soittimesta tietokoneelle, ja litteroin sen WaveLab-ohjelman puolinopeustoimintoa apuna käyttäen. Litteroitua tekstiä kertyi kolmenkymmenen sivun verran.

Haastattelun tekemisen jälkeen tutkimusongelmien painotus muuttui vielä kerran, joten Tuulin haastattelun rooli tutkimuksessa oli lopulta osoittaa äänitetystä materiaalista paikkoja, joita kannattaisi mitata sekä toimia vertailukohtana mittarin luotettavuudelle.

### 7.5 Pianon äänitys ohjelman testausta varten

Analysoituani muutamia lyhyitä näytteitä ohjelmallamme olin hyvin hämmentynyt ohjelman antamista mittaustuloksista. En tällöin vielä ymmärtänyt kuullun ja akustisen todellisuuden perustavanlaatuisia eroja, joten pelkäsin, että mittausohjelmamme ei välttämättä toimi oikein. Tässä vaiheessa ohjelmaa oli varsinaisesti testattu ainoastaan ohjelmallisesti tuotetuilla äänitiedostoilla, joten halusin testata ohjelmaa aidoilla äänillä, joiden taajuudet tunnettaisiin. Kyseeseen tulivat siis kiinteävireiset soittimet. Äänitin tätä tarkoitusta varten musiikkikasvatusosaston studion flyygelin ääntä. Tämän testin tuloksista kerrotaan luvussa 5.2.

## 8 Mittaukset

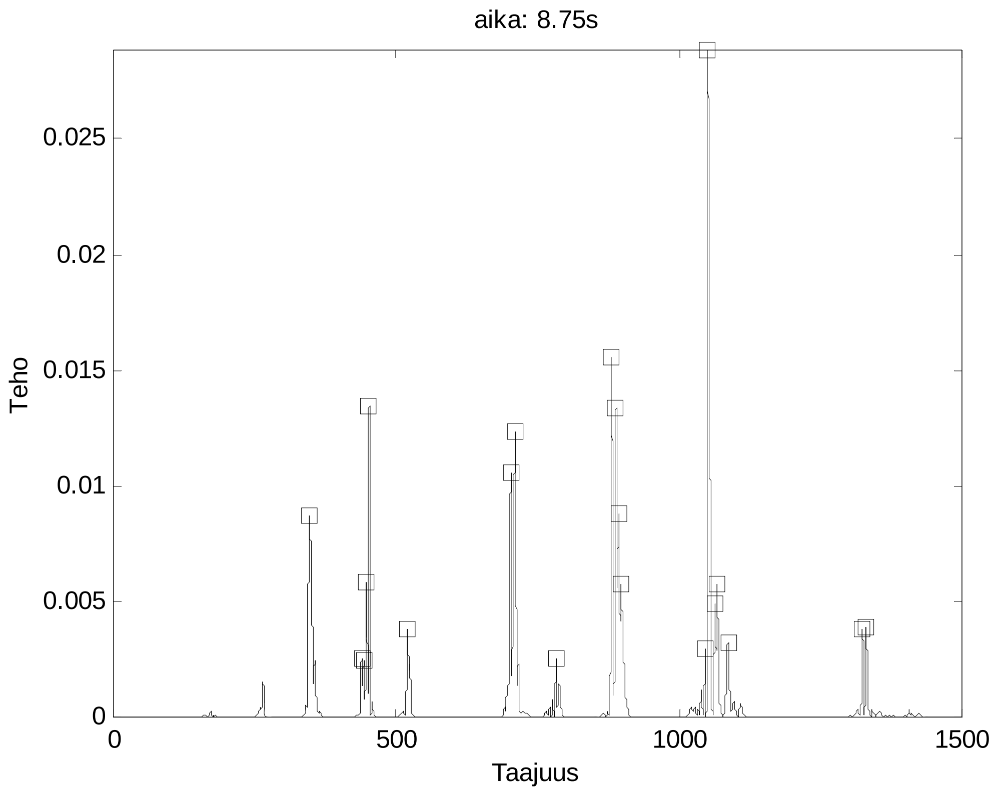
Mittauksia tehtäessä aineisto rajattiin vielä kerran. Rajaus tehtiin musiikillisen tilanteen ja Tuulin kommenttien perusteella. Mitattaviksi valittiin kymmenen kiinnostavaa erityyppistä näytettä. Mittauksissa käytettiin ikkunan pituuksia 200ms ja 500ms. Menetelmän hitaudesta johtuen päädyttiin soinnuista mittaamaan vain yksittäisiä ikkunoita, ei siis käytetty järjestelmällisesti peräkkäisten, limittyvien ikkunoiden mittausta.

### 8.1 Finlandia

Finlandiasta Tuuli ottaa esille kaikkien neljäsosanuottia pidempien sointujen puhtauden. Ensimmäisessä otossa (N1) sopraanot ovat Tuulin mukaan hieman korkeita ”kautta linjan”. Tuuli kuulee myös epävarmuutta alkuäänissä.

Toisen tahdin C7-soinnulla mittauksista voidaan erottaa vain naisäänten taajuudet, miesten äänet ovat liian hiljaisia mitattaviksi. Sopraano ja altto erottuvat parhaiten toisista osaääneksistä, joiden korkeudet suhteessa 440 hertsiin ovat 1309c ja 709c. Sopraanon ja alton välinen intervalli on tarkalleen tasavireinen vähennetty kvintti (600c), eli puhdasvireistä 10c suppeampi ja pythagoralaista 12c laajempi. Mikäli kappaleen aloitustilanteeksi oletetaan puhdasvireinen f-duurisointu, jossa a=440Hz, sopraano on tässä 3c puhdasvireistä matalampi ja altto 7c korkeampi. Nämä lukemat saadaan helpoimmin määrittämällä aluksi sävellajin perussävelen ”oikea” taajuus, joka on 386c alempana kuin $a^1$.

Neljännen tahdin F-duurisoinnun analysoiminen ei onnistu kunnolla, mikä johtuu soinnun muodosta. Soinnun sävelten osaääneksistä suuri osa sattuu samoille taajuuksille, jolloin näillä taajuuksilla ilmenevästä tehopiikistä ei voida erottaa stemmoja toisistaan. Soinnun taajuustason kuvaaja nähdään kuviossa 14 ja kymmenen voimakkainta huippua taulukossa 3.




KUVIO 14. Finlandia, näyte N1, tahti 4.

TAULUKKO 3. Finlandia, näyte N1, tahti 4, tulokset (osa).

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 1051 | 881 | 452 | 888 | 710 | 702 | 893 | 347 | 447 | 1068 |
| Korkeus (c)[a] | 1507 | 1201 | 47 | 1217 | 827 | 809 | 1225 | -411 | 29 | 1535 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 307 | 1 | 47 | 17 | 827 | 809 | 25 | 789 | 29 | 335 |
| Sävel | $c^3$ | $a^2$ | $a^1$ | $a^2$ | $f^2$ | $f^2$ | $a^2$ | $f^1$ | $a^1$ | $c^3$ |
| Stemmat | ATB | SB | S | SB | AB | AB | SB | AB | S | ATB |

[a] 440Hz taajuuteen verrattuna

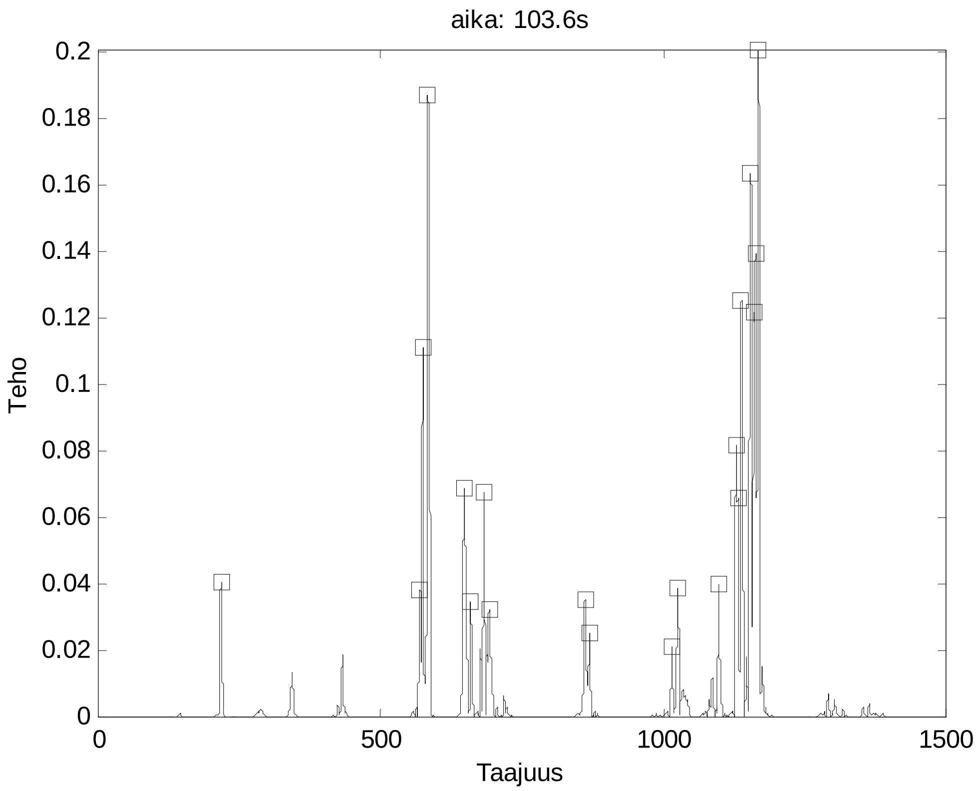
Taulukon 3 kolme ylintä riviä on saatu suoraan mittausohjelmasta. Tässä nähdään kymmenen ohjelman tuottamista kahdenkymmenen voimakkaimman huipun taajuuksista alenevassa voimakkuusjärjestyksessä. Taulukon kolmas rivi näyttää huipun äänenkorkeuden $a^1$:han verrattuna siirrettynä oktaavialalle $a^1 ... a^2$. Kaksi taulukon alinta riviä on täytetty manuaalisesti nuottikuvan ja kolmen ylimmän rivin perusteella. Alin rivi kertoo, minkä stemman osaäänes tämä on.

Voimakkaimpana taajuutena erottuu 1051Hz, mikä vastaa $c^3$:tä. Tämä on samanaikaisesti basson kuudes, tenorin neljäs ja alton kolmas osaäänes. Tehopiikin taajuus on 1507c korkeampi kuin 440Hz ($a^1$). Mikäli tästä lasketaan basson, tenorin ja alton sävelkorkeus, he näyttäisivät olevan 9c lähtösävellajia alempana. Alton sävelkorkeutta ei voida mitata erikseen, sillä alton perusäänes ($f^1$) kuuluu basson osaäänessarjaan, jolloin kaikki alton osaäänekset ovat samalla myös basson osaääneksiä. Miesten sävelkorkeudet voitaisiin mitata ensimmäisistä osaääneksistä (f ja $c^1$), mutta nämä ovat liian heikkoja mahtuakseen kahdenkymmenen voimakkaimman taajuuden joukkoon. Nämä taajuudet näkyvät kuviossa 14 kahtena vasemmanpuolimmaisena matalana piikkinä.

Sopraanon sävelkorkeutta voidaan mitata erikseen ensimmäisestä osaääneksestä ($a^1$). Tässä kohdassa voimakkaimmaksi taajuudeksi nousee 452Hz, mikä on 47c ylävireinen alkusävellajiin verrattuna, ja 56c ylävireinen kun sitä verrataan voimakkaimman $c^3$-osaääneksen taajuuteen. Tosin kuviosta 14 havaitaan, että 440Hz paikkeilla olevassa ”kukkulassa” on myös muita sivuhuippuja. Taulukossa 3 näistä nähdään yksi taajuudella 447Hz, joka tarkoittaa 29c ylävireisyyttä alkusävellajiin verrattuna. Tämä viittaisi jonkinlaiseen hajanaisuuteen sopraanostemman sisällä. Myös 880Hz ”kukkulan” tarkastelu vahvistaa käsitystä stemman hajanaisuudesta. Siinä on tosin bassojen osaäänes mukana, mutta tässä kohdassa näytettä bassot laulavat niin hiljaa, että voidaan olettaa tämän kukkulan johtuvan lähinnä sopraanoista. Tässä kukkulassa näkyy neljä merkittävää huippua, joista voimakkain on 881Hz, joka on vain 1c alkusävellajia korkeammalla. Muut sivuhuiput ovat 17c ja 25c ylävireisiä alkusävellajiin nähden. Muissakin stemmoissa näkyy hajanaisuutta, sillä myös 1051Hz huipun ympärillä näkyy sivuhuippuja.

Mittaus näyttäisi vahvistavan Tuulin havainnon sopraanon ylävireisyydestä muihin stemmoihin nähden.

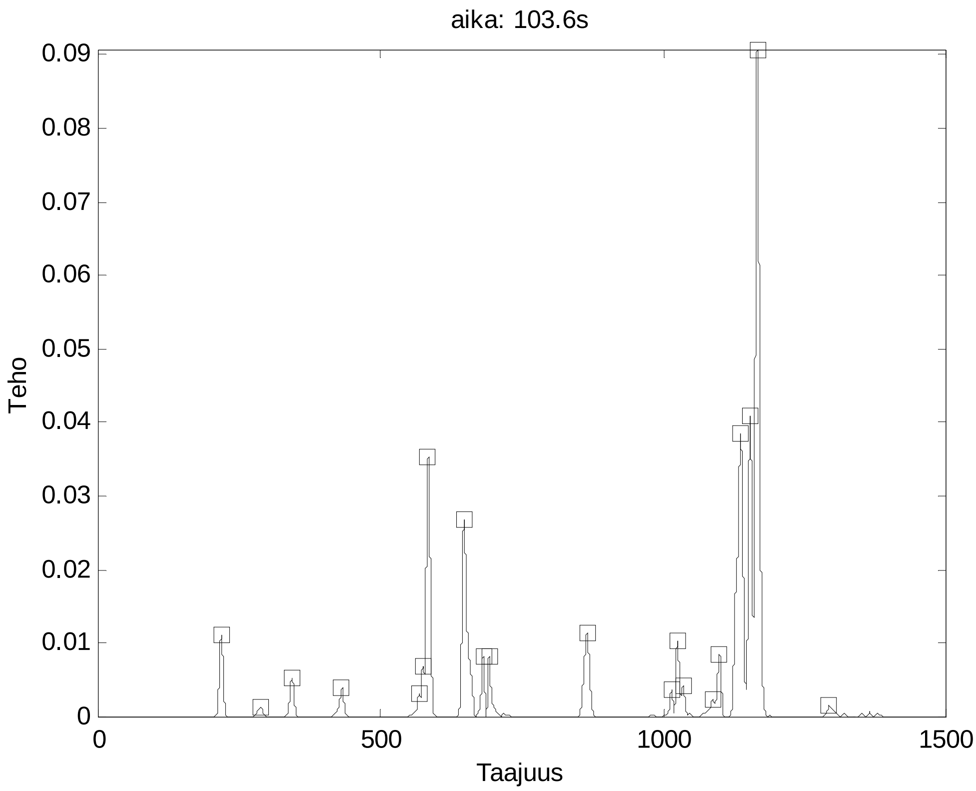
Näyte N3 on Finlandian konserttiotto. Tuuli sanoo tämän olevan ”tosi paljon yhtenäisempi kaikin puolin kuin harjoitusversiot”. Toisessa säkeistössä kuoro tekee crescendon, ja Tuuli kuulee tenorien ajautuvan ylävireisiksi ja bassojen alavireisiksi. Tahdin 18 pitkän soinnun taajuustason kuvaaja 500ms ikkunanpituudella nähdään kuviossa 15.




KUVIO 15. Finlandia, näyte N3, tahti 18, ikkunan pituus 500ms.

Kuviossa kukkulat näyttävät hajoavan huomattavasti. Varsinkin korkeimman piikin vieressä on huomattava määrä sivuhuippuja. Sama kohta 200ms ikkunan pituutta käyttäen tuottaa kuvion 16 ja taulukon 4.

Taulukkoon 4 on otettu kaikki ohjelman tuottamat kaksikymmentä huippua, minkä vuoksi rivit on jouduttu jakamaan kahtia. Säveliä määritettäessä on otettu huomioon laskenut sävellaji, joten esimerkiksi huippu numero 17 tulkitaan $d^2$:ksi, vaikka se todellisuudessa on lähempänä $cis^2$:ää. Taulukossa sivuhuiput on merkitty laittamalla stemmat sulkeiden sisään.




KUVIO 16. Finlandia, näyte N3, tahti 18, ikkunan pituus 200ms.

TAULUKKO 4. Finlandia, näyte N3, tahti 18, tulokset.

| Voimakkuusjärjestysnumero | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 1166 | 1154 | 1137 | 584 | 647 | 865 | 218 | 1025 | 1099 | 691 |
| Korkeus (c)[a] | 1687 | 1669 | 1643 | 489 | 668 | 1169 | -1220 | 1464 | 1585 | 782 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 487 | 469 | 443 | 489 | 668 | 1169 | 1180 | 264 | 385 | 782 |
| Sävel | $d^3$ | $d^3$ | $d^3$ | $d^2$ | $e^2$ | $a^2$ | a | $c^3$ | $cis^3$ | $f^2$ |
| Stemmat | SB | (SB) | (SB) | SB | T | TB | T | AB | T | A |

| Voimakkuusjärjestysnumero | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 681 | 574 | 343 | 1035 | 431 | 1014 | 567 | 1087 | 1293 | 286 |
| Korkeus (c)[a] | 757 | 460 | -434 | 1480 | -35 | 1446 | 439 | 1565 | 1866 | -746 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 757 | 460 | 766 | 280 | 1165 | 246 | 439 | 365 | 666 | 454 |
| Sävel | $f^2$ | $d^2$ | $f^1$ | $c^3$ | $a^1$ | $c^3$ | $d^2$ | $cis^3$ | $e^3$ | $d^1$ |
| Stemmat | A | (SB) | A | (AB) | TB | (AB) | (SB) | (T) | TB | B |

[a] 440Hz taajuuteen verrattuna

Taajuustason kuvaaja näyttää selkeämmältä 200ms ikkunan pituutta käytettäessä, sillä sivuhuippuja muodostuu vähemmän. Soinnun muodosta johtuen basson osaäänessarja peittää sopraanon, mutta altto, tenori, ja basso voidaan mitata erikseen.

Tenorin osaäänesten tutkiminen antaa toisistaan poikkeavia tuloksia. 440Hz viritystasoon verrattuna tenorin sävel olisi huippujen 5, 7 ja 9 mukaan 34c, 20c tai 1c alavireinen. Koska sävellaji on Tuulin mukaan laskenut selkeästi, termi ”alavireinen” on harhaanjohtava, joten käytän tästä eteenpäin mieluummin merkintää ±Xc. Huippujen korkeudet ovat tällä tavalla ilmaistuna -34c, -20c ja -1c. Sivuhuipun 18 korkeus on -21c.

Alton perusäänes ($f^1$, huippu 13) on -48c. Alton toinen osaäänes jakautuu kahteen yhtä voimakkaaseen huippuun (huiput 10 ja 11), joista toinen on -32c ja toinen -57c.

Basson sävelestä nähdään ainoastaan toinen osaäänes eli huippu 20. Perusäänes on liian heikko näkyäkseen edes kuvaajassa. Kuitenkin basso kuuluu näytteessä kohtuullisen voimakkaana. Huipun 20 perusteella basson korkeus on -44c.

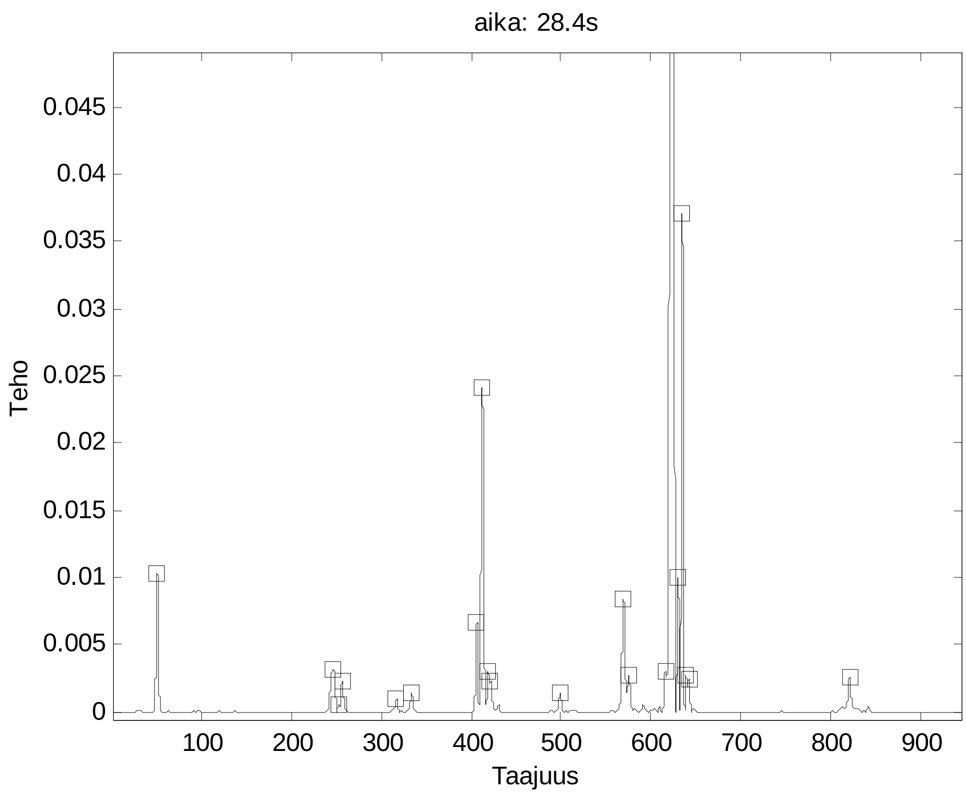
Sopraanon äänenkorkeutta ei voida tästä näytteestä aivan erikseen mitata. Huipuissa 1 ja 4 on basson osaäänes mukana, mutta voidaan kuitenkin olettaa että sopraanon osaäänes on näillä taajuuksilla ($d^3$ ja $d^2$) huomattavasti bassoa voimakkaampi. Huiput ovat korkeudeltaan -11c ja -9c. Havaitaan kuitenkin myös sivuhuiput 2, 3, 12 ja 17 jotka kaikki ovat päähuippuja alemmassa vireessä. Sopraano vaikuttaisi tämän perusteella epäyhtenäiseltä sillä tavalla, että korkeampaa viritystä laulavat kuuluvat voimakkaampina.

Mittaukset näyttävät hieman erilaisilta kuin Tuulin havainto tästä kohdasta. Mittausten perusteella basso ja altto näyttäisivät olevan suunnilleen samassa virityksessä (-44c ja -48c), kun taas tenori ja sopraanon voimakkaimmat äänet ovat tätä ylempänä. Tämä voidaan tulkita myös niin, että basso on alavireinen ja tenori ylävireinen, mutta mittausten perusteella sopraano näyttäisi olevan vielä tenoria korkeammalla.

## 8.2 Muut istui iloitsemahan

Kappaleesta muut istui iloitsemahan (N4–N8) mitattiin seitsemännen tahdin soinnun puhtautta näytteistä N6 ja N7.

Näyte N6 on kevätkonsertista. Tuulin mukaan seitsemännen tahdin sointu on ”vähän hajallaan” ja ”horjuvan tuntuinen”. Tuulista myös ”tuntu et sopraanot mielellään ois hilannu sitä g-säveltä vähän liian korkeeks siinä”. Kuviossa 17 ja taulukossa 5 nähdään seitsemännen tahdin sointu solistin $d^2$-sävelen kohdalta.




KUVIO 17. Muut istui iloitsemahan, näyte N6, tahti 7, ikkunan pituus 500ms.

TAULUKKO 5. Finlandia, näyte N3, tahti 18, tulokset.

| Voimakkuusjärjestysnumero | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 623 | 635 | 412 | 50 | 631 | 570 | 406 | 246 | 616 | 419 |
| Korkeus (c)[a] | 603 | 635 | -113 | -3765 | 623 | 447 | -139 | -1005 | 583 | -86 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 603 | 635 | 1087 | 1035 | 623 | 447 | 1061 | 195 | 583 | 1114 |
| Sävel | $d^2$ | $d^2$ | $g^1$ | - | $d^2$ | ($c^2$) | $g^1$ | b | $d^2$ | $g^1$ |
| Stemmat | sol | sol | S | - | sol | sol | (S) | A2 | sol | (S) |

| Voimakkuusjärjestysnumero | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 639 | 575 | 821 | 642 | 421 | 256 | 499 | 333 | 316 | 252 |
| Korkeus (c)[a] | 647 | 465 | 1080 | 655 | -75 | -938 | 217 | -480 | -571 | -965 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 647 | 465 | 1080 | 655 | 1125 | 262 | 217 | 720 | 629 | 235 |
| Sävel | $d^2$ | ($cis^2$) | $g^2$ | $es^2$ | $g^1$ | (b) | $b^1$ | $es^1$ | ($es^1$) | b |
| Stemmat | sol | sol | S | A1/sol | (S) | A2 | A2 | A1 | A1 | A2 |

[a] 440Hz taajuuteen verrattuna

Mittauksessa käytettiin 500ms ikkunan pituutta, jolloin solisti ehtii vaihtaa säveltä $c^2$:lta $d^2$:lle, joten näiden välillä näkyy runsaasti eri taajuuksia. Jätän tässä solistin osuuden huomiotta ja tutkin vain säestävää pitkää sointua. Tämä katkelma on erittäin hiljainen, minkä vuoksi näytettä normalisoitaessa mahdolliset häiriöt voimistuvat. Huippu 4 on maadoitushäiriöstä johtuvan hurinan aikaansaama. Sävellaji on noussut puolisävelaskeleella, joten taulukossa 5 olevat sävelet on tulkittu tämän mukaisesti, esim. korkeimman huipun $d^2$ on todellisuudessa ylävireinen $es^2$.

”Oikean” sävellajin korkeuden määrittäminen tähän sointuun on hieman mutkikasta. Solistin katkelma alkaa C-duurissa ja päätyy g-molliin. Tällöin on perusteltua olettaa, että g-sävelen tulisi tässä vaihdoksessa pysyä samalla tasolla. Puhdasvireisyyden mukaan saadaan tällöin g-sävelelle korkeus +1018c ja es-sävelelle +632c a-sävelestä. Es-sävelen ihannekorkeus on siis 32c korkeampi kuin tasavireinen. Tämä kuvastaa hyvin Tuulin (ja mm. Tolosen 1958) esiintuomaa näkemystä, jonka mukaan sävellajin eläminen on kuoromusiikissa väistämätöntä ja arkipäiväistä, ja usein joudutaan tyytymään kompromissiin siten, että kappaleen sävellajin nousut ja laskut yhdessä pitäisivät sävellajin ”paikallaan”. Tässä puhtausarvion perustaksi otetaan puhdasvireinen duurisointu, jonka es on +632c.

Sopraanon korkeus huipuissa 3 ja 13 on 1087c ja 1080c eli +69c ja +62c. Sivuhuippujen 7, 10 ja 15 korkeudet ovat +43c, +96c ja +107c.

Ykkösalton perusääneksen kohdalla nähdään tasavahvoina huiput 18 ja 19, joiden korkeudet ovat +88c ja -3c. Näillä on eroa melkein puolisävelaskel, joten stemma vaikuttaa hajanaiselta.

Kakkosalton huippujen 8, 16, 17 ja 20 korkeudet ovat +61c, +128c, +83c ja +101c. Tuulin havaitsema stemmojen horjuvuus tulee mittauksissa hyvin esille hajanaisina stemmoina. Sopraanon g-sävel ei sen sijaan vaikuta ylävireiseltä muihin stemmoihin nähden.

Näyte N7 on Imatran konsertista. Tuuli ei kiinnitä tässä näytteessä erityistä huomiota seitsemänteen tahtiin, mutta halusin mitata samaa sointua kuin näytteessä N6. Sointua mitataan kahdesta eri kohdasta, ensin toisen ja sitten kolmannen neljäsosan kohdalta. Ikkunan pituus on 500ms. Tässäkin sävellaji on noussut puolisävelaskeleen verran.

Sopraanon korkeudeksi saadaan ensimmäisessä mittauksessa ensimmäisestä osaääneksestä +112c ja toisesta +120c. Sopraanossa havaitaan sivuhuippuja korkeuksilla +78c, +105c, +135c ja +140c. Toisessa mittauksessa sopraano näyttää yhtä hajanaiselta. Päähuiput ovat +116c ja +104c. Sivuhuippuja näkyy välillä +113c...+184c.

Ykkösaltto vaikuttaa kummassakin mittauksessa todella yhtenäiseltä. Merkittäviä sivuhuippuja ei näy. Ykkösalton korkeudeksi saadaan ensimmäisessä mittauksessa +115c ja toisessa +127c.

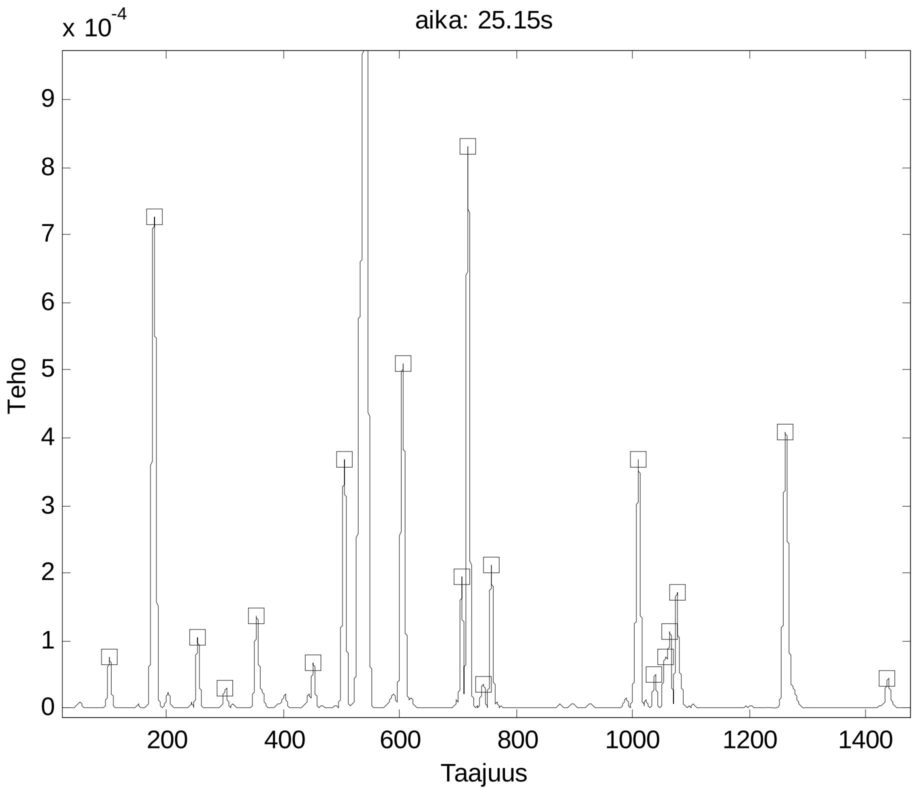
Kakkosaltto jakautuu ensimmäisessä mittauksessa kahteen yhtä vahvaan huippuun, joiden korkeudet ovat +88c ja +137c. Toisessa mittauksessa näkyy vain yksi huippu, +94c.

Näissä mittauksissa näkyy miten sointu ”elää” kestonsa aikana. Ensimmäisen mittauksen perusteella stemmat vaikuttaisivat olevan keskenään kohtuullisessa vireessä koska kaikkien stemmojen keskiarvot sattuvat välille +110c...+120c, vaikka sopraanossa ja kakkosaltossa esiintyykin hajanaisuutta. Toiseen mittaukseen tultaessa kakkosaltto on yhtenäistynyt, mutta laskenut samalla korkeudelle +94c eli noin 20c. Ykkösaltto on noussut 12c ja sopraanon pääjoukko on laskenut hieman, vaikkakin sopraanon sivuhuiput ovat keskimäärin nousseet.

Omaan korvaani tämä sointu kuulostaa melko puhtaalta. En kuule soinnun aikana tapahtuvan mitään varsinaisia muutoksia sävelkorkeuksissa sen koommin kuin stemmojen hajanaisuuttakaan, mutta sointu kuulostaa jännittävän väreilevältä.

### 8.3 Siell’ on kauan jo kukkineet omenapuut

Näytteestä N9 valitaan mittaukseen tahdin 8 kolmas neljäsosanuotti (tavu ”kai-”). Tuulin mukaan tämä mieskuoron fraasi on ”kauniin yhtenäinen noin virityksen puolesta”. Ikkunan pituudeksi valitaan 200ms, koska sävel on melko lyhyt (830ms). Kuviossa 18 ja taulukossa 6 nähdään mittauksen tulokset.




KUVIO 18. Omenapuut, näyte N9, tahti 8, ikkunan pituus 200ms.

TAULUKKO 6. Omenapuut, näyte N9, tahti 8, tulokset.

| Voimakkuusjärjestysnumero | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 541 | 717 | 178 | 604 | 1262 | 1009 | 505 | 757 | 706 | 1075 |
| Korkeus (c)[a] | 357 | 844 | -1569 | 550 | 1824 | 1437 | 237 | 939 | 819 | 1546 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 357 | 844 | 831 | 550 | 624 | 237 | 237 | 939 | 819 | 346 |
| Sävel | c#$^{2}$ | f#$^{2}$ | f# | d#$^{2}$ | e$^{3}$ | h#$^{2}$ | h#$^{1}$ | g$^{2}$ | f#$^{2}$ | c#$^{3}$ |
| Stemmat | T2 | T2B2 | T2 | B1B2 | T1B2 | T1B2 | T1B2 | T1B1 | T2B2 | T2B1 |

| Voimakkuusjärjestysnumero | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 354 | 1063 | 253 | 1055 | 102 | 451 | 1037 | 1436 | 742 | 300 |
| Korkeus (c)[a] | -376 | 1528 | -958 | 1514 | -2539 | 44 | 1485 | 2048 | 906 | -661 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 824 | 328 | 242 | 314 | 1061 | 44 | 285 | 848 | 906 | 539 |
| Sävel | f#$^{1}$ | c#$^{3}$ | h# | ? | G# | a#$^{1}$ | h#$^{2}$ | f#$^{3}$ | ? | d#$^{1}$ |
| Stemmat | T2 | T2b1 | T1 | ? | B2 | B1 | T1B2 | | | B1B2 |

[a] 440Hz taajuuteen verrattuna

Kuviossa 18 nähdään paljon merkityksellisiä huippuja. Tässä mittauksessa yhdenkään stemman ensimmäinen osaäänes ei ole voimakkain, mikä vaikuttaisikin olevan etenkin miesäänissä varsin yleistä. Hyvin suuri osa osaääneksistä on useamman stemman yhteisiä osaääneksiä.

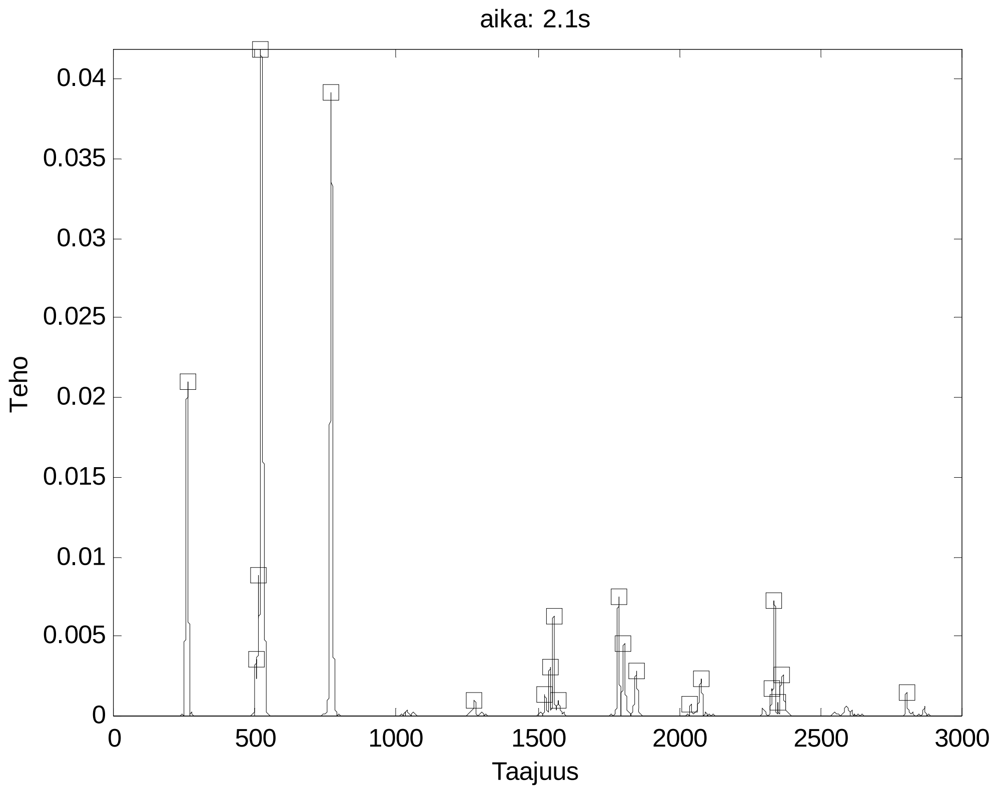
Ykköstenorin korkeus on huipun 13 perusteella -32c puhdasvireiseen suureen terssiin verrattuna. Kakkostenorin korkeudeksi saadaan puhdasvireiseen pienseptimiin (9:16) verrattuna huippujen 1, 3 ja 11 perusteella -29c, -53c ja -60c. Ykkösbasson korkeus on huipun 16 perusteella -48c ja kakkosbasso huipun 15 perusteella -27c.

Useamman stemman yhteiset osaäänekset ovat melko voimakkaita. Laskettaessa ykköstenorin korkeus bassojen kanssa yhteisistä huipuista 5, 6, 7 ja 8 saadaan tenorin korkeudeksi -36c, -37c, -37c, ja -37c.

Mittauksissa stemmat näyttävät melko yhtenäisiltä. Sointu sen sijaan ei vaikuta kovinkaan puhtaalta. Kakkosbassoon verrattuna ykköstenori näyttäisi olevan 5c matala, kakkostenori keskimäärin n. 20c matala ja ykkösbasso n. 20c matala. Yhteisten osaäänesten korkeuksia tarkasteltaessa saadaan erilaisia tuloksia. Esimerkiksi ykköstenorin ja kakkosbasson yhteiset osaäänekset näyttävät matalammilta kuin kummankaan stemman omat osaäänekset. Tässä suhteellisen puhdas kuulovaikutelma saattaa selittyä sillä, että ääriäänet ovat suhteellisen hyvässä keskinäisessä vireessä, eroa on vain 5c.

### 8.4 Onpa tietty tietyssäni

Kappale ”Onpa tietty tietyssäni” alkaa mieskuoron unisonolla. Tuuli kuulee näytteessä N12 hajanaisuutta alun unisonossa. Kuviossa 19 nähdään taajuustason kuvaaja ensimmäisen tahdin kolmannelta neljäsosalta (tavu ”tie-”). Ikkunan pituus on 200ms.




KUVIO 19. Onpa tietty tietyssäni, näyte N12, tahti 1, ikkunan pituus 200ms.

Kuviosta 19 havaitaan unisonon epäyhtenäisyys tarkastelemalla ylempiä osaääneksiä, jotka hajoavat useaksi huipuksi. Alemmilla osaääneksillä stemmat ”sulautuvat” yhdeksi huipuksi. Voimakkaimmat huiput ovat toinen, kolmas ja ensimmäinen osaäänes. Ensimmäisen ja toisen osaääneksen korkeus on -18c, kun taas kolmannen on -49c. Muilla osaäänesten voimakkaimmat huiput ovat välillä -58c...-29c, ja kaikkien osaäänesten sivuhuiput (11kpl) sijoittuvat välille -82c...0c. Laulajien äänet näyttäisivät siis olevan hajallaan jopa 80c alueella. Tarkkaa sävelkorkeutta on tulosten hajanaisuuden vuoksi mahdotonta tästä määrittää, mutta se vaikuttaisi olevan keskimäärin 30-40 c alavireinen.

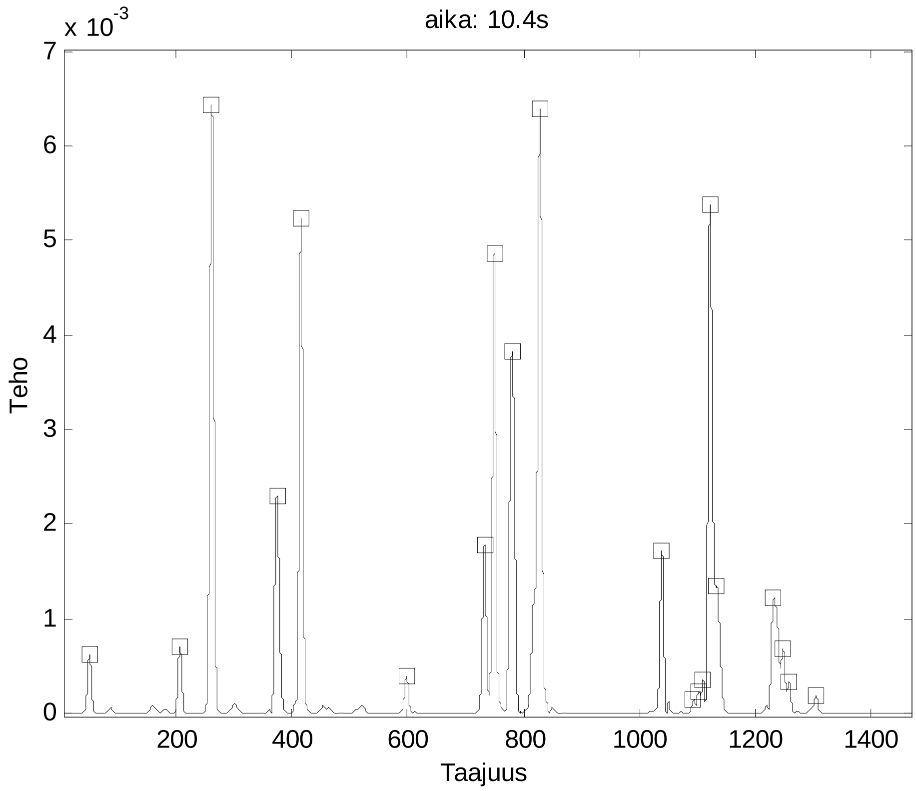
Toiseen tahtiin tultaessa Tuuli sanoo kvarttihypyn menevän ”liian matalalle”. Mittauksissa unisono näyttää toisessa tahdissa hajoavan entistä enemmän. Ensimmäinen ja toinen osaäänes ovat hallitsevia, ja näiden korkeudet ovat -86c ja -63c. Heikompien osaäänesten kohdalla päähuippujen korkeudet jakautuvat välille -63c...-26c. Sivuhuippuja näkyy välillä -70c...+48c sekä yksi perusääneksen sivuhuippu korkeudella -249c. Vahvimpien osaäänesten perusteella kvarttihyppy vaikuttaisi päätyvän liian matalalle pudoten noin 30-40c, mutta tämän tarkemmin sitä ei äänien hajonnan vuoksi voida arvioida. Tuulin kommenteista kannatta huomioida seuraava katkelma:

> *. . . et kaikilla kun on yhteinen sävel mutta kun sinne on merkitty fortissimo niin sillon äänenkäyttö usein on pikkusen liian raakaa ja sillon se säveltason kontrolli ei oo yhtä hyvä niin se niinku vähä vaihtelee yhden sävelen sisällä se puhtaus. Usein ehkä siihen suuntaan et se niinku se pakotettu ääni jää vähän matalaksi. Se on jotenkin semmonen miesäänten ominaisuus enemmän.*

Raaka äänenkäyttö tuntuisi yhdistyvän ylemmän osaäänessarjan heikkouteen – toisin sanoen ”pakotetun” äänen osaäänessarja on lyhyt. Tämä voi selittää sen, miksi ensimmäisen ja toisen osaääneksen perusteella ääni vaikuttaa matalammalta kuin ylemmän osaäänessarjan perusteella.

### 8.5 Rakastava

Sibeliuksen teoksesta ”Rakastava” mitattiin näytteen N21 neljännen tahdin ensimmäistä sointua. Tuuli sanoo neljännen tahdin jäävän ”liian varovaiseksi”, koska fraasi näyttää loppuvan mutta ajatuksen pitäisi jatkua. Tuuli kuulee myös, että ”joku tenoreista sitten vetäs jo ihan uhkarohkean matalan duuriterssin sillä his-nuotilla joka siis kuulosti jo enemmän mollilta ...”. Mittaustulokset nähdään kuviossa 20 ja taulukossa 7.




KUVIO 20. Rakastava, näyte N21, tahti 4, ikkunan pituus 200ms.

TAULUKKO 7. Rakastava, näyte N21, tahti 4, tulokset.

| Voimakkuusjärjestysnumero | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 261 | 828 | 1122 | 415 | 749 | 780 | 374 | 732 | 1039 | 1133 |
| Korkeus (c)[a] | -904 | 1095 | 1620 | -101 | 921 | 991 | -283 | 881 | 1488 | 1638 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 296 | 1095 | 420 | 1099 | 921 | 991 | 917 | 881 | 288 | 438 |
| Sävel | h# | g#2 | c#3 | g#1 | f#2 | g2 | f#1 | f#2 | h#2 | c#3 |
| Stemmat | T | SB1 | AB2 | SB1 | A | TB2 | A | A | TB1 | AB2 |

| Voimakkuusjärjestysnumero | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Taajuus (Hz) | 1232 | 206 | 1248 | 50 | 598 | 1110 | 1259 | 1102 | 1305 | 1093 |
| Korkeus (c)[a] | 1783 | -1312 | 1805 | -3765 | 530 | 1602 | 1819 | 1590 | 1882 | 1576 |
| Transponoitu Korkeus (c)[a] | 583 | 1088 | 605 | 1035 | 530 | 402 | 619 | 390 | 682 | 376 |
| Sävel | d#3 | g# | d#3 | | d(#)2 | c#3 | d#3 | c#3 | e3 | c#3 |
| Stemmat | SB1B2 | B1 | SB1B2 | - | B1B2 | AB2 | SB1B2 | AB2 | T | AB2 |

[a] 440Hz taajuuteen verrattuna

Sopraanon korkeutta ei voida tästä erikseen mitata, sillä se peittyy ykkösbasson osaäänessarjaan. Alton korkeudeksi saadaan ensimmäisestä osaäänEksestä +33c ja toisesta +37c ja -3c. Tenorin korkeus on ensimmäisellä osaäänEksellä puhdasvireiseen verrattuna +22c ja viidennellä samoin +22c. Ykkösbasson korkeus on ensimmäisellä osaääneksellä +0c. Kakkosbasson osaäänekset olivat liian heikkoja näkyäkseen tuloksissa, mutta poikkeuksellisesti kakkosbasson korkeus mitattiin toisesta osaääneksestä ottamalla kuvaajasta MATLAB:lla tarkka suurennos, josta nähdään korkeus hertseinä ja laskemalla sentit käsin. Näin kakkosbasson korkeudeksi saadaan -58c.

Sointu vaikuttaa melkoisen epäpuhtaalta. Ykkös- ja etenkin kakkosbassot ovat selvästi alavireisiä, tenori ei näytä olevan niinkään alavireessä. Sopraanon sävelkorkeutta ei voida erikseen määritellä, joten tenori saattaa olla matala suhteessa sopraanoon. Voi myös olla, että valtaosa tenoreista on yhtenäisiä ja yksittäinen matalampi tenori ei näy kuvaajassa. On myös periaatteessa mahdollista, että Tuuli odottaa kuulevansa pythagoralaisen terssin, johon verrattuna tenorin korkeus onkin +0c ja näin ollen alttoon nähden n. 30c matala, tosin tämä ei riitä selittämään elämystä ”melkein molliterssistä”.

Rakastavan soolokatkelmasta (N21-26) ei tehdä mittauksia, sillä niissä on mukana miessolisti, jota ei voida erottaa kuorostemmoista.

## 9 Johtopäätökset mittausmenetelmästä

Suurimmaksi ongelmaksi mittausmenetelmän käytössä ilmeni stemmojen sisäinen epäyhtenäisyys yhdistettynä mittausmenetelmän yksinkertaisuuteen. Ohjelmasta saadaan ulos taajuusdataa varsin jalostamattomassa muodossa, joten tutkijalle jää paljon työtä tehtäväksi käsin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yhden alle sekunnin mittaisen näytteen analysoiminen kestää kahdesta viiteen tuntia. Tämän vuoksi aineistoa ei voida tutkia kovinkaan kattavasti.

Stemmojen sisäinen epäyhtenäisyys vaikuttaa mittaustuloksiin monella tavalla. Äänenkorkeuden määrittäminen eri osaääneksistä antaa erilaisia tuloksia. Tämä näyttää siltä, kuin lauluäänen osaäänessarja olisi epäharmoninen. Brown (1996) on kuitenkin osoittanut, että näin ei ole. Erilaiset tulokset johtuvatkin luultavimmin useamman erityyppisen epäyhtenäisyyden yhteisvaikutuksesta. Samaa säveltä laulavilla kuorolaisilla on usein erilainen äänenmuodostus, mistä seuraa, että osaäänessarjat ovat balanssiltaan erilaisia. Kun tähän yhdistyy epäyhtenäisyys lauletun sävelkorkeuden suhteen, tuloksena on epäharmonisen näköinen osaäänessarja, sillä jokaisen osaääneksen kohdalla korostuu niiden laulajien merkitys, joilla kyseinen osaäänes on sarjassa hallitseva.

Epäyhtenäisyys näkyy myös siinä, että saman soinnun keston aikana eri hetkinä otetut mittaukset näyttävät eri tuloksia. Sointu siis elää ajassa. Tämä soinnun eläminen on monimutkainen yhdistelmä yksittäisten laulajien sävelkorkeuden ja äänenmuodostuksen epästabiiliudesta. Jotta saataisiin kunnollinen käsitys sävelten korkeudesta soinnun aikana, pitäisi sointua mitata useina peräkkäisinä ”viipaleina”. Tämä kuitenkin tuottaisi moninkertaisen määrän eri tuloksia kunkin sävelen korkeudelle. Näihin pitäisi soveltaa tilastollisia analyysimenetelmiä, jotta saataisiin muodostettua jonkinlainen painotettu keskiarvo stemman sävelkorkeudesta. Tämä vaatisi myös eri huippujen tehon huomioon ottamista. Ohjelman nykyinen versio ei anna tehosta muuta tietoa kuin taajuushuippujen järjestyksen voimakkuuden mukaan. Jotta tämä olisi mahdollista, ohjelman automaattisia toimintoja pitäisi kehittää paljon lisää.

Ohjelman tuottaman datan matala jalostusaste tuottaa myös luotettavuusongelmia. Kun ohjelma antaa paljon erilaisia tuloksia äänenkorkeudelle, on suuri riski että tutkija näitä tulkitessaan tulkitsee tulokset ”parhain päin” eli näkee asioita, joita olettaa näkevänsä tai haluaa nähdä. Tämä riski kasvaisi huomattavasti, mikäli sointuja tutkittaisiin useista eri kohdista, sillä vaihtoehtojen määrän kasvaessa on melko varmaa että kaikilla stemmoilla joku mittaustulos olisi ”täydellisen puhdas” ja monet taas hyvin epäpuhtaita.

Fourier-muunnokseen liittyy myös ongelmia. Koska näytteiden pidentäminen nollilla parantaa vain muunnoksen esitystarkkuutta, muttei todellista taajuusresoluutiota, muunnos yhdistää toisiaan lähellä olevat äänet yhdeksi huipuksi. Tätä testattiin vielä erikseen tekemällä keinotekoinen äänitiedosto, jossa oli kaksi äänestä. Toinen oli 450Hz ja täysin tasainen, ja toinen nousi lineaarisesti neljästäsadasta viiteensataan hertsiin kahden sekunnin aikana. Näyte mitattiin 200ms ikkunan pituudella 100ms välein, eli peräkkäisissä ikkunoissa nouseva ääni nousi viidellä hertsillä. Tuloksissa näkyi, että näytteen alkupuolella tasaisen äänen korkeus näytti vaihtelevan 0,1Hz todellisen korkeuden molemmin puolin. Nousevan ääneksen lähestyessä vaihteluväli kasvoi kiihtyvästi 0,6 hertsiin asti, jolloin äänesten ero oli 10Hz. Nousevan ääneksen ollessa 445Hz eli viiden hertsin päässä äänekset yhdistyivät kuvaajassa yhdeksi huipuksi, jonka taajuus oli 447,57Hz eli hyvin lähellä taajuuksien keskiarvoa. Nousevan ääneksen noustessa tasaisen ääneksen yläpuolelle sama ilmiö toteutui eron ollessa viisi hertsiä. Tämän jälkeen tasaisen ääneksen taajuus heilahteli hieman. Heilahtelun vaihteluväli pieneni nousevan ääneksen jälleen etääntyessä.

Huomattavaa on, että äänesten erottelukyky pysyy hertseissä vakiona läpi taajuuskaistan. Tämä tarkoittaa, että matalilla äänillä suhteellisen kaukanakin olevat äänekset yhdistyvät yhdeksi huipuksi. Tämä havaitaan monissa tuloksissa, erityisen selvästi kuviossa 19 (Onpa tietty tietyssäni). Ylemmillä osaääneksillä unisono hajoaa moneksi eri huipuksi, mutta alemmilla osaääneksillä nähdään vain yksi yhdistynyt huippu. Tästä myös johtuu se, että basso näyttäytyy tuloksissa yhtenäisempänä kuin onkaan, kun taas sopraanon stemma näyttää hajoavan useiksi sivuhuipuiksi.

Yleisesti voidaan sanoa, että signaalin pidentäminen hyvin suurella määrällä nollia on tässä tutkimuksessa epävarmuustekijä. Kutsuttakoon tätä vaikkapa termillä

”massive zero-padding”. En tunne tämän kaikkia vaikutuksia tuloksiin, eikä tämä vaikuttaisi olevan erityisen yleisesti hyväksytty tekniikka. Olen kuitenkin asiaa asiantuntijoilta tiedusteltuani siinä uskossa, että se ei varsinaisesti vääristä mittaustuloksia, joskaan se ei myöskään poista taajuusresoluution ongelmia. Tällä luultavasti on kuitenkin vaikutuksia ns. sivuhuippujen muodostumiseen, mutta vaikutukset ovat vaikeasti ennustettavia.

Mittauksissa käytettiin 200ms ja 500ms ikkunanpituuksia. Kummassakin havaittiin hyviä ja huonoja puolia, joten ikkunan pituuden valinnassa joudutaan aina tyytymään kompromisseihin. Pidempää ikkunaa käytettäessä saadaan suurempi osa soinnusta mitattua. Tällöin kuitenkin sivuhuippuja muodostuu paljon enemmän, sillä taajuuksien erottelukyky on parantunut ja toisaalta myös soinnun stemmat ehtivät elää enemmän näytteen aikana. Sivuhuiput kuvaavat todellisuutta paremmin, mutta hankaloittavat tulosten tulkintaa. Lyhyemmällä ikkunalla stemmat näyttävät yhtenäisemmältä, mutta koska näin saadut tulokset kuvaavat vain pientä osaa koko soinnun kestosta, saadut tulokset saattavat antaa koko soinnun olemuksesta virheellisen kuvan.

Myös mitattavia sointuja valitessa täytyy valinta suorittaa tarkkaan, sillä menetelmän soveltuvuus on melko rajallinen. Sointuja, joissa jonkin ylemmän stemman sävel esiintyy jonkin alemman sävelen osaäänessarjassa ei voida kunnolla analysoida, sillä tällöin ylemmän sävelen taajuutta ei voida erottaa alemmasta, sillä ylemmän sävelen kaikki osaäänekset ovat myös alemman sävelen osaääneksiä. Esimerkiksi voitaisiin ottaa sointu $cis^2$ - $e^1$ - a - A. Sointu ei ole rakenteeltaan mitenkään harvinainen. Tällaisessa soinnussa alimman sävelen osaäänessarja peittää kaikki muut stemmat, jolloin vain alimman sävelen korkeus pystytään itsenäisesti määrittämään.

Mitattavan ikkunan aikana ei pitäisi myöskään esiintyä vokaalinvaihdoksia tai kovia konsonantteja, sillä kovien konsonanttien taajuus on epämääräinen, ja vokaalinvaihto aiheuttaa muutoksia äänenmuodostuksessa ja usein myös sävelkorkeudessa.

## 10 Johtopäätökset puhtaudesta

Puhtaudesta on vaikea tulosten perusteella sanoa mitään varmaa mittausmenetelmän heikkouksista johtuen. Mitattujen näytteiden määrä on myös liian pieni jotta kattavia yleistyksiä voitaisiin tehdä, varsinkin kun mitatut näytteet ovat vain yhden kuoron yksittäisten sointujen osia.

Osa Tuulin havaitsemista ilmiöistä näkyy myös mittauksissa, mutta osa ei. Tulokset, joissa Tuuli kuulee jonkin stemman olevan korkea tai matala mutta tämä ei näy mittauksissa ovat ongelmallisia. Tämä voi selittyä stemmojen ajelehtimisella - juuri mitatulla hetkellä stemma on ollut esimerkiksi merkittävästi ylempänä tai alempana kuin muutoin soinnun aikana. Tällöin kyse olisi liian pienen otannan aiheuttamasta tilastollisesta virheestä. Toinen yhtä todennäköinen selitys on se, että esimerkiksi alavireisenä kuultu stemma on joutunut alavireiseksi soinnun alkaessa, eli sävelelle tulo on jäänyt alavireiseksi, mutta muut stemmat ovat mittaushetkeen mennessä ehtineet kompensoida laskemalla virettään saman verran. Tässä tutkimuksessa on rajauduttu mittaamaan yhtäaikaisesti soivien sävelten suhteita, joten peräkkäisten sävelten intervallien puhtaus ei näy mittauksissa näytettä 12 lukuun ottamatta. Näytteessä 12 Tuulin kuulema liian laaja alaspäinen hyppy näkyy myös mittauksissa 30-40c suuruisena virheenä.

Yleisesti ottaen stemmojen ylä- tai alavireisyyden määrittäminen mittauksilla on hankalaa, sillä kun kaikki stemmat ovat eri vireessä, voidaan perustellusti kysyä kuka on oikeassa. Tilannetta voisi verrata neliön piirtämiseen vapaalla kädellä. Syntyvä neliö poikkeaa täydellisestä neliöstä, mutta mittauksetkaan eivät kerro, mikä nurkka on väärässä paikassa, kuinka paljon ja mihin suuntaan, sillä kulmat ja sivut määrittyvät toistensa kautta. Kuoromusiikissa yleensä itsepintaisesti oman linjansa paikallaan pitävä laulaja on väärässä, mikäli muiden vire muuttuu. Sävellajia voitaisiin määrittää vireiden keskiarvon ja virheitä keskihajonnan avulla, mutta on huomattava että myös edeltävillä soinnuilla on paljon vaikutusta asiaan.

Tuulin havaitsema stemmojen ajelehtiminen, haparoiminen ja epäyhtenäisyys näkyvät selkeästi mittauksissa. Puhtauden kannalta merkittävin tutkimuksen tulos onkin se, että stemmojen epäyhtenäisyys näyttäisi olevan vallitseva olotila.

Epäyhtenäisyys näkyy mittauksissa sekä eri osaäänesten antamina erilaisina korkeuksina samalla sävelellä sekä sivuhuippuina taajuustason kuvaajassa. Epäyhtenäisyys näyttäisi koostuvan monesta tekijästä, joita ei voi tällä mittaustekniikalla erottaa toisistaan. Näyttäisi siltä, että yksittäisen laulajan laulama sävel on jatkuvassa mikro-glissandossa tavoitellun sävelkorkeuden ympärillä. Laulajien äänien osaäänessarjat myös ovat erilaisia, ja nähtävästi myös yksittäisen laulajan osaäänessarja on jatkuvan muutoksen alainen. Nämä alati muuttuvat äänet muodostavat yhdessä stemman, joka kuulostaa enemmän tai vähemmän kiinteältä säveleltä mutta on todellisuudessa enemmänkin vellova massa koetun sävelkorkeuden ympärillä. Itseäni hämmentää suuresti kuulovaikutelman ja todellisuuden erilaisuus, sillä itse en kuule näytteissä stemmansisäistä epäyhtenäisyyttä erillisinä ääninä tai sävelinä, vaan korkeintaan kuulen jonkinlaista yleistä epämääräisyyttä stemmassa.

Stemmansisäinen hajaannus vaikuttaa mittausten perusteella verrattain suurelta. Hyvin tavallista oli tulosten hajoaminen 30c alueelle, mutta yli 60c hajontakaan ei ollut harvinainen. Hajaannus oli sen verran suurta, että mittauksia tulkitessa ei olisi ollut mielekästä suuremmin puuttua pythagoralaisen ja puhdasvireisen virityksen eroihin. Tämän perusteella akateeminen väittely hiuksenhienoista eroista virityksessä ja eri systeemien oikeammuudesta vaikuttaa amatöörikuoron kyseessä ollessa merkitykseltään vähintäänkin kyseenalaiselta. Puhdasvireisten ja pythagoralaisten intervallien 22c suuruinen keskinäinen ero vaikuttaa melko pieneltä kun sitä verrataan hajonnan suuruuteen. En ole myöskään vielä nähnyt kuorokappaleen puhtausanalyysiä, joka ottaisi huomioon että sävelkorkeudet muuttuvat sävelten aikana. Puhtausanalyysien perusteella voi saada sen vaikutelman, että sävellaji pysyisi paikallaan kunnes se jonkin viritysteoreettisesti hankalan vaihdoksen kohdalla muuttuu, mutta todellisuudessa sävellaji vaikuttaisi olevan jatkuvassa liikkeessä, vaikka se myös ongelmapaikkojen kohdalla muuttuukin äkisti. Todella hyvien kuorojen tapauksessa tilanne saattaa olla hyvinkin erilainen, mutta amatöörikuoron todellisuus näyttäisi olevan sen verran epämääräinen, että hienoisista eroista keskusteleminen jää vain teorian tasolle. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan toki tehdä päätelmiä vain WiOLista, mutta uskon että WiOL on puhtauden suhteen hyvin tavallinen amatöörikuoro.

## 11 Ajatuksia jatkotutkimuksista

Kuoron puhtaus on varmasti laajempienkin tutkimusten arvoinen asia. Tuuli Lindeberg toi haastattelussa esiin paljon arvokkaita asioita puhtauteen vaikuttavista tekijöistä sekä keinoista parantaa kuoron puhtautta, mutta nämä jäivät tutkimuksen rajauksen ulkopuolelle. Tämänkaltaisissa haastatteluissa olisi varmasti potentiaalia monenlaisiin tutkimuksiin käytännön kuoropuhtaudesta.

Tässä tutkimuksessa käytettyä menetelmää voisi vielä parantaa, mutta itseltäni loppuvat ohjelmointitaidot auttamattomasti kesken. Erityisesti ohjelmalta kaipaisin automaattista taajuuksien tunnistamista tietyiksi säveliksi sävellajin muutokset huomioon ottaen sekä osaäänessarjojen automaattista tunnistusta. Tämä olisi suhteellisen yksinkertaista ideaalitapauksissa, mutta epäpuhtaissa näytteissä tarvittaisiin jo jonkinnäköistä tulkintaa sävelten tunnistuksessa, ja tällaisen tunnistuksen kirjoittamista ohjelmaan en osaa edes kuvitella. Vaikuttaakin siltä, että pelkällä Fourier-muunnoksella ei kovin paljoa tämän pidemmälle päästä puhtauden tutkimisessa.

Paras vaihtoehto olisi ehdottomasti äänittää kuoro siten, että jokainen laulaja on omalla raidallaan. Tämä tulisi toteuttaa normaalien harjoitustilanteiden yhteydessä, jotta vältettäisiin studio-olosuhteiden epäluonnollisuus. Tämä voitaisiin toteuttaa ns. headset-mikrofoneilla, eli kuuloke-mikrofoniyhdistelmien kaltaisilla mikrofoneilla. Näin mikrofoni saataisiin suoraan kunkin laulajan suun eteen siten, että laulaja voisi myös liikuttaa päätään äänityksen häiriintymättä. Tällöin saataisiin muiden äänten vuotaminen raidalle mahdollisimman pieneksi. Kokonaan toinen kysymys on, mistä saadaan kolmekymmentäviisi tällaista mikrofonia ja liikuteltava laitteisto, joka pystyisi näin monen raidan yhtäaikaiseen äänitykseen. Tällaista kalustoa on tällä hetkellä lähinnä merkittävillä studioilla, eivätkä tämän mittakaavan äänityslaitteistot ole kovinkaan helposti liikuteltavissa, joten kannattaa luultavasti hieman odottaa tekniikan kehittymistä.

Erillisille raidoille nauhoitettaessa voitaisiin mittaamiseen käyttää autokorrelaation tyyppisiä, huomattavasti Fourier-muunnosta tarkempia ja yksinkertaisempia menetelmiä. Tällöin myöskään eri stemmojen osaäänesten päällekkäisyys ei haittaisi mittauksia. Dataa tietysti kertyisi valtavat määrät, joten ohjelmoinnin haaste olisikin tämän datan jalostus järkevään muotoon.

Jotta tämänkaltaisesta tutkimuksesta voitaisiin tehdä yleistyksiä koko kuoron puhtaudesta, pitäisi saada tarkasti selvitettyä miten kuuloaisti muokkaa hajanaisesta massasta tietyn sävelen. Muutoin päätelmiä voisi tehdä vain yksittäisten laulajien taajuuksista ja suhteista toisiinsa.

## 12 Lopuksi

Tämän tutkimuksen tekemistä voisi kuvailla lähinnä harhailuna pimeässä. Monet kerrat urakka on ollut hyvin lähellä jäädä kokonaan kesken, mutta lopulta esteistä on jollakin tavalla päästy yli ja prosessi on jatkunut. Tietysti kolmen vuoden prosessin jälkeen harmittaa, että menetelmä todettiin aika lailla rajoittuneeksi puhtauden tutkimisessa. Tutkimuksessa saatiin kuitenkin tietoa Fourier-muunnoksen eräästä käytännön soveltamistavasta sekä amatöörikuoromusiikin arkitodellisuuden luonteesta.

Itselleni prosessista on ollut suurta hyötyä - olen oppinut paljon uutta puhtaudesta, signaalinkäsittelystä sekä MATLAB-ohjelmoinnista. Voidaan varmasti sanoa, että kaiken mitä tiedän kahdesta viimeksi mainitusta olen oppinut tämän tutkimuksen myötä. Prosessin myötä on myös käynyt ilmi, että puhtaudessa minua kiinnostavat enemmän käytännön ilmiöt kuin teoria. Näen puhtauden yhtenä kuorolaisten ryhmädynamiikan ilmenemismuotona. Kuorokin näyttäytyy tässä valossa enemmän kommunikoivana ryhmänä kuin johtajan instrumenttina. Puhtaus on käytännön kuoroarjessa ilmiö, joka liittyy vuorovaikutukseen, toisten huomioimiseen, tuen antamiseen ja toisiin tukeutumiseen. Yhtä käsittämätöntä kuin se, miten kuuloaisti muodostaa monimutkaisesta kudoksesta selkeän rakenteen on se, miten ylipäänsä on mahdollista että suuri joukko aivan erilaisia ihmisiä kykenee luomaan yhden kokonaisuuden, jossa kaikkien tekijöiden täytyy olla jatkuvasti vuorovaikutuksessa jotta kokonaisuus pysyisi kasassa. Silloin kun vuorovaikutus todella toimii, ykseyden tunne on sanoinkuvaamaton. Siksi en pianistin korvinenikaan tule koskaan kuoroista luopumaan.

**Lähteet**

Alldahl, P.-G. 1990. Körintonation. Du skall icke sjunga falskt mot din nästa. Tukholma: Gehrmans Musikförlag.

Apiola, H. & Laine, M. 2006. Lyhyt MATLAB-opas. http://math.tkk.fi/~apiola/matlab/opas/lyhyt/perusteet.html [luettu 18.5.2006]

Backus, J. 1969. The acoustical foundations of music. Lontoo: John Murray Ltd.

Barbour, J. M. 1951/1972. Tuning and Temperament. East Lansing: Michigan State College Press.

Beament, J. 2001. How we hear music. Woodbridge: The Boydell Press.

Blackwood, E. 1985. The Structure of Recognizable Diatonic Tunings. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Brigham, E. O. 1974. The fast Fourier transform. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Brown, J. C. & Zhang, B. 1991. Musical frequency tracking using the methods of conventional and “narrowed” autocorrelation. The journal of the Acoustical Society of America 89, 2346-2354.

Brown, J. C. 1996. Frequency ratios of spectral components of musical sounds. The journal of the Acoustical Society of America 99, 1210–1218.

de Cheveigné, A. 1993. Separation of concurrent harmonic sounds: Fundamental frequency estimation and a time-domain cancellation model of auditory processing. The journal of the Acoustical Society of America 93, 3271-3290.

Davy, M., Godsill, S. & Idier, J. 2006. Bayesian analysis of polyphonic western tonal music. The journal of the Acoustical Society of America 119, 2498-2517.

Fougstedt, N.-E. 1950. Kuoronjohtajan opas. Porvoo: WSOY.

Hanappe, P., Serra, M.-H. & Battier, M. 1996. AudioSculpt User’s manual. 2. painos. Pariisi:IRCAM.

Haykin, S. & Van Veen, B. 1999. Signals and systems. New York: John Wiley & Sons.

Kauko, V. (toim.) 1994. Matematiikan käsikirja. 2. täydennetty ja korjattu painos. Juva: WSOY.

Korpinen, P. 2005. Äänipää - Äänen kuvaamistapoja. http://www.aanipaa.tamk.fi/kuvaa_1.htm [luettu 25.5.2006]

Korteila, M. 2004. Tietokone kääntää äänen nuoteiksi. Tekniikka & Talous 22.4.2004. http://tekniikkatalous.talentum.com/doc.te?f_id=574230 [luettu 22.4.2004]

Kuntsi, A. 2006. Re: Jasentietokanta. Henkilökohtainen sähköpostiviesti 26.5.2006.

Laine, P. M. & Lassfolk, K. 2001. Jousisoittimen äänen arviointi spektrianalyysin avulla. Helsingin yliopisto. http://www.music.helsinki.fi/tmt/tutkimus/jousisoitinanalyysi/ [luettu 21.5.2006]

Lynn, P. A. & Fuerst, W. 1994. Introductory Digital Signal Processing with Computer Applications. Korj. painos. Chichester: John Wiley & Sons.

Pola, J. 2004. Muusikoiden kokemuksia absoluuttisesta sävelkorvasta. Sibelius-Akatemia. Musiikkikasvatuksen osasto. Pro Gradu -tutkielma.

Ross, J. 1990. Liukuvien F(0)-käyrien äänenkorkeus vatjalaisissa kansanlauluissa. Suomentanut K. Tiits.Musiikkitiede 2 (2), 29-36. Alkuperäisjulkaisu 1987.

Serra, M.-H. 1997. Introducing the phase vocoder. Teoksessa C. Roads, S. T. Pope, A. Piccialli & G. De Poli (toim.) Musical signal processing. Lisse: Swets & Zeitlinger, 31-90.

Sloboda, J. A. 1985/1991. The Musical Mind. Korj. painos. Oxford: Clarendon Press.

Smith, J. O. 2003. Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT). http://ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/ [luettu 24.5.2006]

Tolonen, J. 1958. Kuorolaulun puhtaudesta. Teoksessa M. Hela, A. Sonninen, O. Korte, A. Vainio, A Sarmanto (toim.) Kuorolaulun käsikirja. Helsinki: Otava, 46-65.

Tolonen J. 1969. Mollisoinnun ongelma ja unitaarinen intervalli- ja sointutulkinta. Forssa: Forssan Kirjapaino.

## LIITE 1: Ohjelmalistaukset

### ding4.m

```
%Taajuuksien tunnistus moniäänisestä .wav-tiedostosta
%(C) Sampsa Laine & Erkki Nurmi 2003-2006
%Korjattu zeropadpituus x.3.2006;
%kokeilua peakin kanssa 8.4.2006;

%doSound(440, 44100, 16, 2, 'sini440.wav');
%[dingYorig, dingFs, dingNbits] = wavread('sinit440_880.wav');

[dingYorig, dingFs, dingNbits] =
wavread('E:\RaakaKala\Naytteet\Normalisoidut\RakAlku2005KNorm.wav');
%[dingYorig, dingFs, dingNbits] = wavread('Omput_T_Norm_mono.wav');
%[dingYorig, dingFs, dingNbits] = wavread('somewhere.wav');


%load handel; dingYorig = y; dingFs = Fs;
dingY = dingYorig(:,1);


dists = round(0.1*dingFs);
alkukohta = round(10.4*dingFs);
ha = hanning(dists*2);
counter = 0;
freqMat = [];
pointMat = [];
figure(1); clf
points = alkukohta:dists:length(dingYorig)-dists;
for point = points
    counter = counter + 1;
    dingLocal = dingY(point-dists+1:point+dists);
    dingLocal2 = ha.*dingLocal;
    dingLocal3 = [dingLocal2; zeros(1048576-length(dingLocal2),1)];
    [freq, amp] = ourFft(dingLocal3, dingFs);
    %ampF = filtfilt(ones(10,1)/10, 1, amp);
    ampF = amp;
    plot(freq, ampF, 'b-');
    title(['aika: ' num2str(point/dingFs, 4) 's']);
    xlabel('Taajuus');
    ylabel('Teho');
    axis([0 3000 0 max(0.001, max(ampF))]);
    hold on;
    allPeaks=find(diff(diff(ampF)>0)<0)+1; %maksimien indeksit
ampF:ssä
    [arvo,PeakNro]=sort(ampF(allPeaks)); %arvo=tehot ylenevästi
    %PeakNro=monesko huippu arvo on, ylenevä tehojärjestys
    huippuja=min(20, length(allPeaks));
    huipputaajuudet=freq(allPeaks(PeakNro(end+1-huippuja:end)));
    plot(huipputaajuudet, arvo(end+1-huippuja:end), 'sr');
    hold off;

    if isempty(freqMat)
        freqMat = zeros(length(points), huippuja);
    end
    if isempty(pointMat)
       pointMat = zeros(length(points), 1);
    end
    pointMat(counter,1)=point/dingFs;
    freqMat(counter,:) = huipputaajuudet';
```

```
    %format long g paras formaatti
    %num2str(freqMat(1,20:-1:11)) taajuudet
         %num2str(1200*(log(freqMat(1,20:-1:11))-log(440))/log(2))
tästä sentit
    %num2str(mod((1200*(log(freqMat(1,20:-1:11))-
log(440))/log(2)),1200))
    %ja tästä modulo 1200
    %data exceliin komennolla wk1write('tiedosto',editoituFreqMat);

    %disp('pausing... press any key, or e.g Control-C');
    %pause

    vastaus = input('Anna 0 lopettaaksesi tai mitä tahansa
jatkaaksesi ');

    if vastaus == 0
       break
    end


end

korkeus=nnz(pointMat);
tulokset=fliplr(freqMat(1:korkeus,:));
tCent=1200*(log(fliplr(freqMat(1:korkeus,:)))-log(440))/log(2);
tMod=mod(tCent,1200);

tuloksetAll=[pointMat(1:korkeus) tulokset;
   pointMat(1:korkeus) tCent;
   pointMat(1:korkeus) tMod];
tiedNimi=input('Anna tiedoston nimi :','s');
if ischar(tiedNimi) & ~isempty(tiedNimi)
   wk1write(tiedNimi, tuloksetAll);
end

%figure(2); clf; contour(points/dingFs, freq, freqMat', 30);
%figure(2); clf; mesh(points/dingFs, freq, freqMat');
%tämä oli käytössä figure(2); clf; imagesc(points/dingFs, freq,
freqMat');
%ennenkuin freqMat muutettiin
%colormap(JET);
%xlabel('aika [s]');
%ylabel('freq [Hz]');
```

**ourFft.m**

```
function [freq, amp] = ourFft(dingYorig, dingFs)

dingY = sum(dingYorig,2);
dingF = fft(dingY);

len = length(dingF);
power = dingF.* conj(dingF) / len;
freq = (dingFs*(0:len/2)/len)';
amp = power(1:length(freq));
```