

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

Argo Ers
Tarkvara koorilaulu häälepartiide omandamise
abistamiseks
Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja:
Sven Aller, MSc

Tartu 2025

Tarkvara koorilaulu häälepartiide omandamise abistamiseks

Lühikokkuvõte:

Koorilauljad peavad sageli õppima oma partiisid iseseisvalt, kuid puuduvad tööriistad, mis pakuksid täpset tagasisidet. Bakalaureusetöö eesmärk oli uurida ja analüüsida, millised tehnoloogilised vahendid leiduvad laulmise iseseisvalt õppimiseks, ning luua selle põhjal sobiv tarkvara. Töö käigus võrreldi traditsioonilisi ja digitaalseid õppemeetodeid, analüüsiti olemasolevaid abivahendeid ning töötati välja uus lahendus. Tulemusena valmis lokaalselt ilma internetiühenduseta töötav rakendus, mis aitab koorilauljatel iseseisvalt omandada häälepartiisid, pakkudes visuaalset tagasisidet helikõrguste täpsuse kohta. Testimine näitas, et loodud tarkvara on kasutajasõbralik ja toetab tõhusalt õppimist.

Võtmesõnad: koorilaul, digitaalsed õppevahendid, visuaalne tagasiside, MusicXML

CERCS: P170 Arvutiteadus, arvutusmeetodid, süsteemid, juhtimine (automaatjuhtimisteooria)

Software to Assist in Learning Choir Vocal Parts

Abstract:

Choir singers often need to learn their vocal parts independently, yet there is a lack of tools that provide accurate feedback. The aim of this bachelor's thesis was to explore and analyze which technological solutions exist to support independent singing practice and to develop suitable software based on that analysis. The work compared traditional and digital learning methods, analyzed existing tools, and led to the creation of a new solution. The resulting application runs locally without an internet connection and helps singers learn their parts by providing visual feedback on pitch accuracy. Testing showed that the software is user-friendly and effectively supports learning.

Keywords: choir singing, digital learning tools, visual feedback, MusicXML

CERCS: P170 Computer science, numerical analysis, systems, control

Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Kasutatavad mõisted ja terminid.....	6
2. Koorilaul	7
2.1 Koorilaulu tähtsus	7
2.2 Partiide õppimine	8
2.3 Digilahenduste kasutamine	8
2.4 Meetodite integratsioon	9
3. Sarnaste rakenduste analüüs.....	10
3.1 Noodigraafikaprogrammid.....	10
3.2 Hääletreeninguprogrammid	10
3.3 Kokkuvõte ja võrdlus	11
4. Tarkvara koorilaulu häälepartiide omandamise abistamiseks	12
4.1 Tarkvara kirjeldus	12
4.2 Tarkvara töövoog	13
4.2.1 Ettevalmistus laulmiseks.....	13
4.2.2 Oma esituse salvestamine	14
4.2.3 Hinnang esitusele	16
5. Kasutatud tööriistad ja teegid.....	20
5.1 Eesliides	20
5.1.1 Vue.js	20
5.1.2 Chart.js	20
5.2 Tagaliides	21
5.2.1 Flask.....	21
5.2.2 Music21.....	21
5.2.3 Sounddevice	22
5.2.4 Librosa	22
5.2.5 NumPy	23
5.2.6 PyInstaller	23
6. Tarkvara testimine.....	24
6.1 Metoodika	24
6.2 Tulemused ja analüüs.....	24

6.3	Tagasiside programmile.....	25
7.	Edasiarendamise võimalused	27
	Kokkuvõte.....	29
	Viidatud kirjandus.....	30
	Lisad.....	33
	I. MusicXML-faili ülesehitus ja esitus noodikirjas.....	33
	II. Testimise tulemused.....	35
	III. Tarkvara koorilaulu häälepartiide omandamise abistamiseks	37
	Litsents	38

Sissejuhatus

Koorilaul on Eestis pikaajalise traditsiooniga ning omab olulist rolli nii kultuurilises identiteedis kui haridusprotsessis. Osalemine koorides on olnud oluline osa üldharidusest, huvitegevusest ja rahvakultuuri kandmisest. Kooriproovis rõhutatakse kooslaulmist ja täpset partiide omandamist, milleks on vaja nii ühist proovitööd kui ka individuaalset ettevalmistust. Enne kooslaulmist peab iga laulja õppima oma häälepartii võimalikult hästi selgeks, sest koorilauljad esitavad erinevaid partiisid ning saatehääled, mis toetavad melodiat, pole alati intuiitiivsed ega kergesti meelde jäävad.

Kooripartiide õppimine toimub tavaliselt dirigendi või koormeistri poolt juhitud gruppides, kus lauljaid juhendatakse korraka. Sellises õppevormis jääb aga sageli puudu individuaalsest tagasisidest ning võimalusest harjutada just neid löike, mis vajavad rohkem tähelepanu. Suur osa harjutamisest peab toimuma väljaspool kooriproove, seega on oluline, et lauljal oleksid selleks sobivad vahendid.

Tänapäeval kasutatakse õppimisel järjest enam digitaalseid töövahendeid, mis võimaldavad iseseisvat harjutamist ja tagasiside saamist. Muusikaõppes on sellised lahendused muutumas järjest kättesaadavamaks, kuid koorilauljatele mõeldud tööriistu on seni vähe. Digitaalsed abivahendid võiksid pakkuda just koorilauljale kohandatud võimalusi, näiteks partituuri ja salvestise võrdlust.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärk on luua tarkvara, mis toetab koorilauljaid häälepartiide omandamisel, võimaldades iseseisvalt harjutada ning saada visuaalset tagasisidet esituse täpsuse kohta. Tarkvara peaks olema mugav kasutada, interaktiivne ning rakendatav ilma eelneva keerulise seadistuse ja internetiühendusega.

Töö koosneb seitsmest peatükist: esimeses peatükis tutvustatakse mõisteid ja termineid, teises käsitletakse koorilaulu ja selle õppimist, kolmandas analüüsitakse olemasolevaid rakendusi, neljandas kirjeldatakse loodud tarkvara funktsionaalsust, viiendas kasutatakse tehnoloogiaid, kuuendas kirjeldatakse testimist ja tulemusi ning seitsmendas pakutakse ideid tarkvara edasiarendamiseks. Lisadena on esitatud MusicXML-faali struktuur, detailne testitulemuste analüüs, loodud tarkvara info ning kasutatud litsents.

1. Kasutatavad mõisted ja terminid

Noot — noodikirjas heli tähistav märk [1].

Rütm — helivältuste järgnevuse muster [2].

Löök — ajaühik helikestuste või helivältuste rühmitamiseks [3].

Metronoom — seade, mis teeb korrapäraselt korduvat kellale sarnast heli, aidates muusikutel mängida muusikat kindlal kiirusel¹.

Tempo — esituse kiirus. Pärast metronoomi patenteerimist 1815. aastal kasutatakse ka metronoominäitu „lööki minutis“ tempo tähistamiseks [4].

Takt — muusikas helitöö osa, mis algab meetrumi rõhulisest üksusest ja lõpeb enne järgmist rõhulist osa².

Taktimõõt — struktuur, mis määrab takti rõhuliste ja rõhutute osade arvu ja vältuse².

Partii — ansambli-, koori- või orkestrimuusikas ühe laulja või lauljate rühma, ühe muusikainstrumenti või instrumentide rühma poolt esitatav muusikaline materjal või selle väljakirjutus [5].

Diskreetimissagedus — väärtuste salvestamise sagedus lugemitena sekundis³.

Kompileerimine — kõrgkeeles väljendatud programmi transleerimine programmiks, mis on väljendatud vahekeeles, assemblerkeeles või masinakeeles³.

Täitmisfail — fail, mis sisaldab selliste käskude jada, mida arvuti protsessor saab otse täita³.

Port — liides suhtluseks võrgu kaudu³.

Tsent (ingl *cent*) — helikõrguse mõõtühik, mis põhineb võrdselt häälestatud oktavil, kus üks pooltoon vastab 100 tsendile [6].

MusicXML — universaalne vahetus- ja levitusvorming tavapärase läänemaailma muusikanotatsiooni jaoks [7].

Toonika — diatoonilise helirea esimene aste, mis määrab muusikateose helistiku¹.

¹ <https://dictionary.cambridge.org/>

² <http://entsyklopeedia.ee/>

³ <https://akit.cyber.ee/>

2. Koorilaul

Koorilaul on Eestis laialdaselt levinud muusikaline tegevus, millel on oluline roll nii kultuuris kui ka hariduses. See peatükk käsitleb koorilaulu tähtsust, selle õppimise viise ja tänapäevaseid arengusuundi.

2.1 Koorilaulu tähtsus

Koorilaulul on Eestis keskne roll rahvusliku identiteedi kujundamisel ja säilitamisel. Alates esimesest üldlaulupeost 1869. aastal on koorilaul olnud eesti rahva jaoks ühendavaks jõuks, kandes edasi keelt, vaimsust ja kogukondlikku kuuluvust. Rebase [8] analüüsi järgi oli ka nõukogude ajal koorilaul üks väheseid kultuurivorme, mille kaudu säilitati rahvuslikku iseteadvust. Koorilaul pakkus võimalust passiivseks vastupanuks ja kultuurilise identiteedi hoidmiseks.

Koorilaul on üks lihtsamaid viise muusikaga tegelemiseks, kuna see ei eelda varustust ega tehnilist ettevalmistust nagu pillimäng. Võrreldes soololauluga ei ole vajalikud ka erilised vokaalsed eeldused — piisab soovist osaleda ja õppida. Demorest jt [9] toovad oma artiklis esile, et paljud inimesed usuvad ekslikult, et nad ei suuda laulda, kuigi laulmisvõime on enamikul juhtudel õpitav ja arendatav. Koorilaul loob võimaluse aktiivseks musitseerimiseks ka neile, kes muidu ei pea end muusikaliselt võimekaks.

Hariduslikus plaanis on koorilaulul oluline roll õpilaste muusikaliste, sotsiaalsete ja kognitiivsete oskuste arendamisel. Kangron [10] rõhutab, et üldhariduskoolis toetab koorilaul emotsionaalse ja esteetilise taju arengut, soodustab keelelist väljendusoskust ning arendab keskendumis- ja kuulamisvõimet. Samuti aitab laulmine õpilastel end paremini väljendada ning tugevdab enesekindlust, koostööoskust ja muusikalist kirjaoskust.

Lisaks hariduslikule ja kultuurilisele tähendusele on koorilaulul ka isiklikku heaolu toetav mõju. Kooris laulmine pakub paljudele inimestele tähenduslikke kunstilisi kogemusi, vaheldust argipäevast ning tugevat kogukonnatunnet. Tanner [11] märgib oma artiklis, et koorilaul pakub emotsionaalset laengut, mis aitab maandada pingeid ning loob sotsiaalselt turvalise keskkonna, kus kogetakse muusikalist ühtekuuluvust.

2.2 Partiide õppimine

Partiide õppimisel on dirigendil keskne roll lauljate juhendamisel ja muusikalise esituse kujundamisel. Õppimine toimub enamasti rühmas, mille käigus lauljad omandavad muusikalised fraasid, rütmid ja intonatsioonid läbi kordamise ja jäljendamise. Kooriproovid on kindla ülesehitusega, alustades lühematest ja lihtsamatest fraasidest ning liikudes järk-järgult keerukamate elementideni.

Sellised meetodid toimivad hästi just repertuaari õppimisel, kus dirigent tegutseb esmase teadmise kandjana ja kontrollib kogu protsessi kulgu. Antud lähenemise puuduseks on isikupärastatud tagasiside võimalused, kuna suure grupi puhul ei ole võimalik kõiki lauljaid individuaalselt toetada.

Varvarigou [12] väitel põhinevad tõhusad partiide õppimise praktikad kognitiivse õpipoisiõppe ja situatsioonipõhise õppimise mudelitel. Tema sõnul on kognitiivse õpipoisiõppe puhul oluline dirigendi eeskuju ja vahetu demonstratsioon, mille käigus lauljad jäljendavad dirigendi tegevusi, õppides sel moel muusikalisi ja tehnilisi oskusi praktiliselt.

Varvarigou [12] rõhutab ka reflektiivse praktika ja dirigendi suhtlemisoskuste tähtsust koorimuusika õppimisel, kuna see soodustab lauljate iseseisvat mõtlemist ja probleemide lahendamise oskust. Tema uuring toob samas välja ka, et liiga intensiivne dirigendi kontroll võib piirata lauljate enesekindlust ja iseseisvust. Seetõttu peab dirigent leidma hea tasakaalu, kui palju ta suunab ja kui palju annab lauljatele vabadust.

2.3 Digilahenduste kasutamine

Viimastel aastatel on muusikaharidusse jõudnud mitmeid digitaalseid lahendusi, mis pakuvad uusi võimalusi individuaalseks õppimiseks. Digitaalsed tööriistad võimaldavad näiteks laulja soorituse reaalajas salvestamist ja analüüsi, mis muudab õppeprotsessi tunduvalt paindlikumaks. Lisaks saavad õppijad kasutada interaktiivseid rakendusi, mille abil võib harjutada noodilugemist või erinevate häälepartiide eristamist.

Ban jt [13] uurisid digitaalse audiotehnoloogia mõju vokaalõppes, tuues välja, et see tehnoloogia suurendab märkimisväärselt õppetöö efektiivsust, lauljate motivatsiooni ning võimaldab täpset ja objektiivset tagasisidet lauljate tehniliste oskuste, nagu intonatsiooni, rütmi ja tämbri kohta.

Rexhepi jt [14] leidsid samuti, et digitaalsete vahendite kasutamine muusikahariduses aitab parandada õpilaste õppimistulemusi, suurendab nende loomingulisust ning motiveerib õppimist. Uuring näitas, et digitehnoloogia toetab individuaalset õpet, võimaldades kohandada õppematerjale vastavalt õppijate vajadustele ja oskustele, ning aitab õpilastel paremini mõista keerulisi muusikalisi struktuure.

Tuleb siiski arvestada, et tehnoloogia ise ei lahenda kõiki hariduslikke väljakutseid. Rexhepi jt [14] rõhutasid, et tehnoloogia efektiivne kasutamine eeldab õpetajate asjatundlikku juhendamist ja tasakaalustatud lähenemist, kuna pelgalt tehnoloogia rakendamine ilma õige juhendamiseta võib piirata õppimise tõhusust. Selle tõhusus sõltub suuresti õpetaja oskusest valida sobivad tööriistad ja integreerida need õppeprotsessi. Lisaks võivad mõningad õppijad vajada tuge, et tehnoloogiaid mugavalt ja enesekindlalt kasutada [14].

2.4 Meetodite integratsioon

Tänapäevane õppimine toimub üha enam hübriidses vormis, kus digitehnoloogia täiendab traditsioonilisi meetodeid. Eriti muusikahariduses pakub tehnoloogia võimalusi individuaalseks harjutamiseks väljaspool kooriproove. Samas jääb dirigendi roll endiselt oluliseks just muusikalise väljendusrikkuse ja grupidünaamika kujundamisel.

Rexhepi jt [14] toovad välja, et parima tulemuse saavutamiseks soovitatakse kasutada traditsiooniliste ja digitaalsete meetodite integreeritud lähenemist. Artiklis kajastub, et selline kombinatsioon võimaldab arendada nii tehnilisi kui ka loomingulisi oskusi ning tugevdab grupisest koostööd ja individuaalset vastutust õppimises.

Kokkuvõttes tagab integreeritud kasutamine efektiivse ja tasakaalustatud koorimuusika õppimiskogemuse, kus dirigendi juhendamine ja digitehnoloogia toetus üksteist täiendavad.

3. Sarnaste rakenduste analüüs

Selles peatükis uuritakse olemasolevaid programme, mis on loodud koorilauljate häälepartiit õppimist toetama. Need tööriistad pakuvad visuaalset või auditiivset tuge, aidates lauljatel tõhusamalt harjutada, eriti keerulisi koorimuusikateoseid. Saadaval on mitmesuguseid tööriistu häälepartiitide õppimiseks, mis keskenduvad erinevatele praktilistele aspektidele.

3.1 Noodigraafikaprogrammid

Noodigraafikaprogramme, nagu näiteks Sibelius⁴ ja MuseScore⁵, kasutatakse koorimuusika koostamiseks ja esitamiseks. Lisaks kvaliteetsele nooditrükile on neil mitmeid kasulikke funktsioone, mis toetavad koorimuusika esitajaid, sealhulgas võimalus kuulata üksikuid häälepartiitid eraldi või koos saatemeloodia ja orkestriga. Noodigraafikaprogrammide suureks tugevuseks on professionaalne partituuri koostamine ja paindlikkus osade eraldamisel, mis on olulised prooviprotsessis. Samuti on nendes võimalik nii importida kui eksportida MusicXML-faile. Siiski on nende suurim piirang hääle kõrguse analüüsi ja tagasiside puudumine, mis piirab oluliselt selle efektiivsust individuaalsel harjutamisel. MuseScore'i eeliseks on tasuta kättesaadavus, samas kui Sibelius on tasuline. Võrreldes MuseScore'iga saab Sibeliuses täpselt partituure kujundada, mis on suunatud elukutselistele heliloojatele, kuid lihtsamad funktsionaalsused kattuvad suuresti.

3.2 Hääletreeninguprogrammid

Hääletreeningule keskenduvad rakendused, nagu näiteks Vocal Coach⁶ ja Vanido⁷, keskenduvad individuaalsete harjutuste ja kõrguse analüüsimisele. Need pakuvad erinevaid harjutusi, mis aitavad lauljatel arendada hääleulatust ja täpsust. Rakenduste suurim eelis on just kõrguse analüüs ja tagasiside, mis võimaldab lauljatel tehniliselt täpselt oma häält arendada. Vocal Coach annab tagasisidet etteantud laulmisharjutuste põhjal, samas kui Vanido võimaldab harjutada kasutaja valitud Spotify laulude järgi. Hääletreeninguprogrammide piiranguks koorilauljate jaoks on koorimuusika spetsiifiliste harjutuste ja funktsioonide puudumine, näiteks konkreetsete kooriteoste ja häälepartiitide eraldi õppimise võimalus, mistõttu on selle kasutus koorilauljatele pigem toetav kui täielik lahendus.

⁴ <https://www.avid.com/sibelius>

⁵ <https://musescore.org/>

⁶ <https://vocalcoach.com/>

⁷ <https://vanido.io/>

3.3 Kokkuvõte ja võrdlus

Analüüsitud rakendused pakuvad erinevaid funktsioone, mis toetavad muusika õppimist, kuid mitte ükski neist ei vasta täielikult koorilaulja vajadustele häälepartiide õppimisel. Kuigi iga rakendus pakub teatud olulist funktsionaalsust, puudub tööriist, mis võimaldaks nii kooriteoseid importida kui ka hääle kõrguse analüüsi tagada. Lõputöös loodud tarkvara püüabki need vajadused ühendada, pakkudes kasutajale terviklikku ja interaktiivset õpikeskkonda, mis põhineb koorilaulja tegelikel vajadustel ning toetab iseseisvat harjutamist.

4. Tarkvara koorilaulu häälepartiide omandamise abistamiseks

Selles peatükis kirjeldatakse loodud tarkvara eesmärke, funktsioone ja tööpõhimõtteid. Esmalt tutvustatakse rakenduse üldist ülesehitust ning seejärel antakse ülevaade tarkvara töövoost.

4.1 Tarkvara kirjeldus

Nagu eelnevas analüüsis selgus, ei kata ükski olemasolevatest tööriistadest terviklikult koorilauljate vajadusi häälepartiide iseseisval õppimisel. Sellepärast tehti bakalaureusetöö raames tarkvara, mis ühendab mõlema kategooria tugevused.

Enne rakenduse loomist viidi läbi eeluuring kolme koorilauljaga, et kaardistada kasutajate ootusi ja selgitada välja, milliseid funktsionaalsusi tarkvara peaks sisaldama. Olulisima tähelepanekuna selgus, et kasutajad ei soovi reaajas tagasisidet. Kui algselt planeeriti arendada lahendus, mis kuvaks helikõrguse täpsust kohe laulmise ajal, siis eeluuringust ilmnnes, et reaajas visuaalne tagasiside võib lauljat esitusel segada ja tähelepanu hajutada. Selle põhjal otsustati keskenduda järelanalüüsil põhinevale tagasiside süsteemile, mis võimaldab esitatud materjali rahulikult ja keskendunult üle vaadata.

Lähtudes olemasolevate rakenduste piirangutest ja koorilauljate vajadustest, püstitati tarkvarale järgmised funktsionaalsed nõuded:

1. MusicXML-formaadi tugi, mis võimaldab sisuliselt noodistatud formaadis muusikateoste importi;
2. häälepartii valimine, et kasutaja saaks keskenduda just oma partiile;
3. taktivahemiku määramine harjutamiseks, et võimaldada õppimist lõikude kaupa;
4. tempo reguleerimine protsentuaalselt, mis toetab õppimist erinevatel kiirustel;
5. metronoomi kasutamine tempo etteandmiseks või kogu esituse vältel;
6. võimalus kuulata esimest nooti enne salvestamist, et alustada õigelt kõrguselt;
7. võimalus kuulata teost enne salvestamist;
8. esituse salvestamine koos noote visualiseeriva animatsiooniga;
9. kaks erinevat tagasisidevaadet: üks detailne täpsuse hindamiseks, teine ülevaatlik trendide hindamiseks;
10. kasutajasõbralik veebiliides, mis töötab lokaalselt ning ei vaja internetiühendust ega keerukat seadistust.

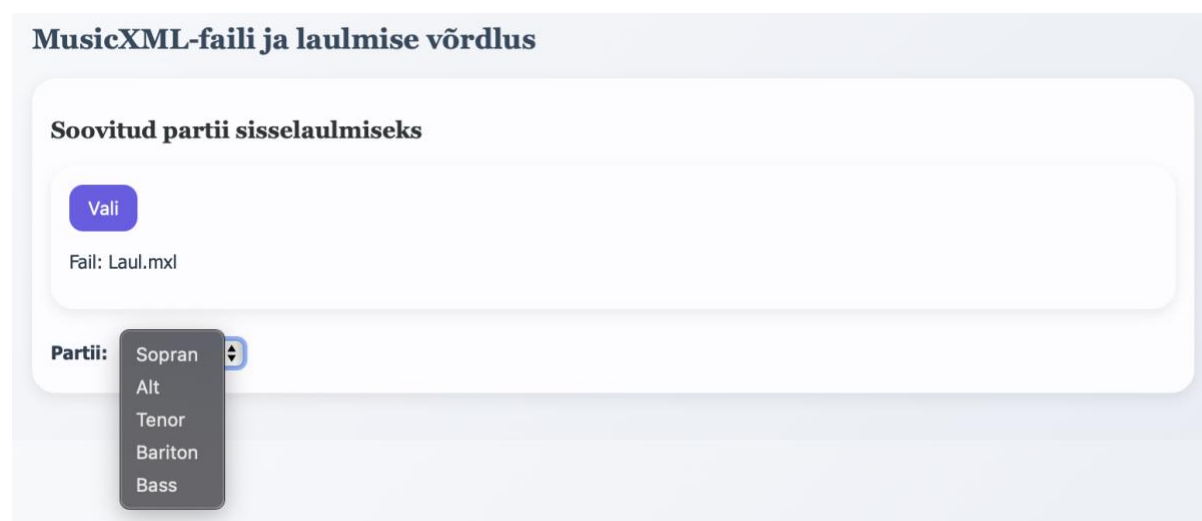
Töö käigus luuakse rakendusena interaktiivne õpikeskkond, mis aitab koorilauljatel iseseisvalt oma häälepartiide õppimist tõhustada. Kasutaja saab importida kooriteose, valida soovitud häälepartii ja harjutatava lõigu, laulda selle järgi ning saada visuaalset tagasisidet oma esituse täpsuse kohta. Rakendus ühendab nootide visualiseerimise, salvestamise ja analüüsi funktsioonid, pakkudes lauljale kasutajasõbralikku harjutamise kogemust. Kuigi tegemist on veebirakendusega, kompileeritakse programm eraldiseisvaks käivitatavaks failiks, mis ei nõua eraldi paigaldamist ega internetiühendust. Täitmisfailid luuakse kahe operatsioonisüsteemi jaoks: Windows ja macOS.

4.2 Tarkvara töövoog

Tarkvara töövoog on jagatud loogilisteks sammudeks, mis järgivad laulja harjutusprotsessi. Järgnevalt tuuakse detailselt välja iga sammu funktsionaalsus ja kasutusviis.

4.2.1 Ettevalmistus laulmiseks

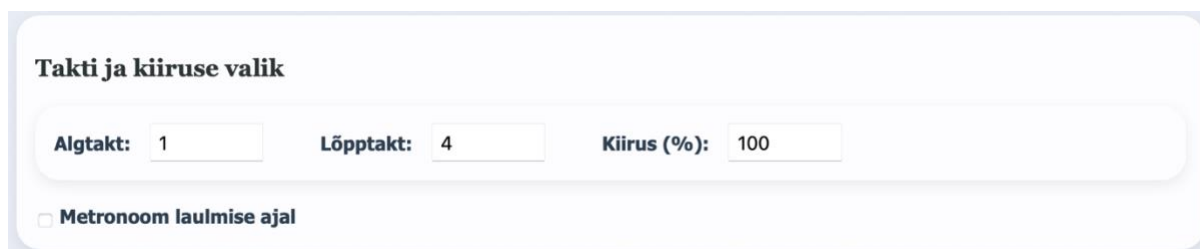
Rakenduse tööle panemiseks tuleb käivitada täitmisfail, mille järel avaneb arvutis vaikeveebibrauseris leht, kus programmi kasutada saab. Joonisel 1 on näidatud vaade, mis avaneb kui käivitada programm.



Joonis 1. MusicXML-faili ja partii valimine.

Kõigepealt saab valida MusicXML-faili, milles sisaldub partii, mida soovitakse ette laulda. Kui valida teises formaadis fail, ilmub punases kirjas teade „Vali MusicXML-fail!“. Peale korrektse faili valimist on võimalik avada rippmenüü, kus avaneb failis olevate partiide valik. Vajutades sobiva partii peale, antakse info edasi tagaliidesesse. Seal loetakse failist sisse vastava partii

info, mille käigus eraldatakse kõik noodid, tempomuutused ja taktimõõdu vahetused. Järgmisena tekib sektsioon „Takti ja kiiruse valik“, mida on näha joonisel 2.



Takti ja kiiruse valik

Algtakt: 1 Lõpptakt: 4 Kiirus (%): 100

Metronoom laulmise ajal

Joonis 2. Taktide ja kiiruse valimine.

Sektsioonis asub kolm sisestusvälja:

- algtakt ehk takt, millest alates soovitakse laulda, vaikeväärtuseks on 1;
- lõpptakt ehk takt, milleni soovitakse laulda, vaikeväärtuseks on viimase takti number;
- kiirus protsentides ehk millise kiirusega, võrreldes originaaliga, soovitakse sisse laulda, vaikeväärtus on 100.

Kui kasutaja muudab ükskõik millist nendest väärtustest, siis tehakse sisendile kontroll. Taktidel taastatakse vaikeväärtus juhul, kui sisestatud väärtus pole numbriline või asub väljaspool vahemikku. Kiiruse puhul seatakse vaikeväärtus siis, kui kasutaja sisend on mittepositiivne või pole numbriline.

Allpool samas sektsioonis on märkeruut, kus lauljal on võimalik valida, kas ta soovib, et laulmise ajal tiksuh kaasa metronoom. Kui jätta kast tühjaks, mängib metronoom kaasa vaid kuni salvestamise alguseni. Metronoomi esimene löök on rõhutatult valjem ning ülejäänud vaiksemad, et laulja suudaks löökide järgi aru saada, millal teos on jõudnud uude takti.

4.2.2 Oma esituse salvestamine

Järgmisena ilmub sektsioon „Sisselaulmine“, mis on kujutatud joonisel 3. Sektsioonis asub animatsioon, millel on kujutatud noodid sisestatud taktide vahel. Lehe suuruse tõttu ei pruugi kõik noodid nähtavad olla. Näiteks on joonisel 3 toodud animatsiooni algvaates näha täielikult vaid takte 1 ja 2, kuigi joonisel 2 on näha, et valiti taktid 1–4.

Noodid on joonistatud horisontaalsete ribadena, kus igaühe peal on märgitud noodi nimi koos oktaviga. Samuti on animatsioonil kahte värvi püstkriipsud. Punase joonega on märgitud animatsiooni järg, mille abil on aru saada, kui kaugel ollakse antud hetkel laulu salvestamisega.

Tumehallide kriipsudega on märgitud iga takti lõpp. Kui valitud partiil pole ühtegi nooti antud taktivahemikus, ilmub selle kohta teade ja animatsiooniväli jääb tühjaks.



Joonis 3. Nootide animatsiooni algvaade.

Vajutades nuppu „Mängi esimest nooti“, on enne salvestamist võimalik panna kõlama loo esimene noot kaheks sekundiks. See aitab lauljal lihtsamalt õigelt kõrguselt alustada. Vajutades nuppu „Mängi lõik ette“, saab kuulata valitud lõiku inimese häälele sarnase tämbriga. Joonisel 4 on kujutatud vaade, mis tekib kui lõigu ettemängimine käivitada. Ettemängimist on võimalik peatada nupuga „Peata lõigu mängimine“.



Joonis 4. Nootide animatsioon lõige ettemängimisel.

Joonisel 5 on kujutatud nupp „Jätka lõigu mängimist“, mille abil saab lõigu mängimist jätkata täpselt sealt, kust enne pooleli jäi. Nii joonisel 4 kui ka joonisel 5 on näha nupp „Lõik algusesse tagasi“, mille abil saab mängimise järje suunata tagasi algusesse. Kui enne selle vajutamist pole

heli esitamine peatatud, siis jätkub lõigu mängimine vahepeal katkestamata algusest uuesti. Kui heli on peatatud, siis peab lõigu mängimise pärast uuesti käivitama nupust „Mängi lõik ette“.



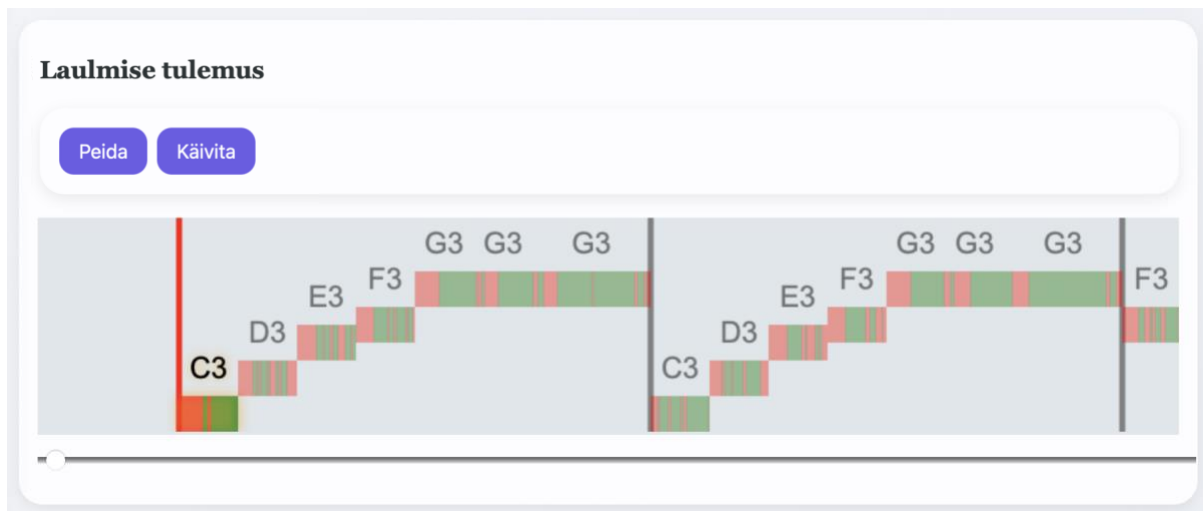
Joonis 5. Nootide animatsiooni vaade lõigu peatamisel.

Kui kasutaja soovib alustada sisselaulmist tuleb vajutada nupul „Alusta salvestamist“. Salvestamist on võimalik alustada, kui parajasti ei mängita ette esimest nooti või soovitud lõiku. Kõigepealt mängitakse metronoomiga kahe takti võrra lööke ette koos metronoomiga vastavas tempos ja taktimõõduga, millega soovitud lõik algab. Seejärel algab salvestamine ning käivitub animatsioon, kus noodid hakkavad liikuma. Sisselaulmist on iga hetk võimalik katkestada nupust „Lõpeta salvestamine“.

Kasutaja eesmärk on laulda vastavalt nootide liikumisele. Hetkel aktiivne noot on animatsioonis kollast värvi. Nootide liikumise kiirus vaheldub, kui tempo loo jooksul vahetub. Samamoodi vahetub ka metronoomi tiksumine, kui taktimõõd muutub. Kui viimase noodi lõpp on jõudnud punasest püstkriipsust edasi, siis on lõik salvestatud. Animatsiooni kohale ilmub tekst „Loen sisse salvestuse infot“.

4.2.3 Hinnang esitusele

Peale salvestamist ilmub kaks vaadet, mis annavad tagasisidet, kuidas laulmine läks. Esimene vaade, mis on kujutatud joonisel 6, on sarnane salvestamise animatsioonile, kus on noodid taktide kaupa välja toodud.



Joonis 6. Laulmise tagasiside animatsiooni algvaade.

Salvestus jäädvustatakse diskreetimissagedusega 22050 Hz, mis on Librosa teegi vaikeväärtus. See on pool CD-kvaliteediga heli diskreetimissageduse standardist 44100 Hz [15]. Väärtus on väiksem standardist, kuna kõrgeimad lauldavad sagedused on umbes 8000 Hz juures. Vastavalt Nyquisti teoreemile peab diskreetimissagedus olema vähemalt kaks korda suurem kui kõrgeim salvestatav heli võnkumissagedus, et vältida moonutamist [16]. Vaikeväärtus suudab tuvastada varuga helisid kuni 11025 Hz. Sellest kõrgemad helid ei anna märkimisväärset lisainfot semantilise analüüsi ülesannete jaoks, nagu näiteks akordide äratundmine, rütmianalüüs või instrumentide tuvastamine [16].

Noodid on jaotatud mitmeks vahemikuks, kus iga vahemiku pikkus t on arvutatud valemiga 1.

$$t = \frac{512}{22050} \approx 0,023 \text{ s} \quad (1)$$

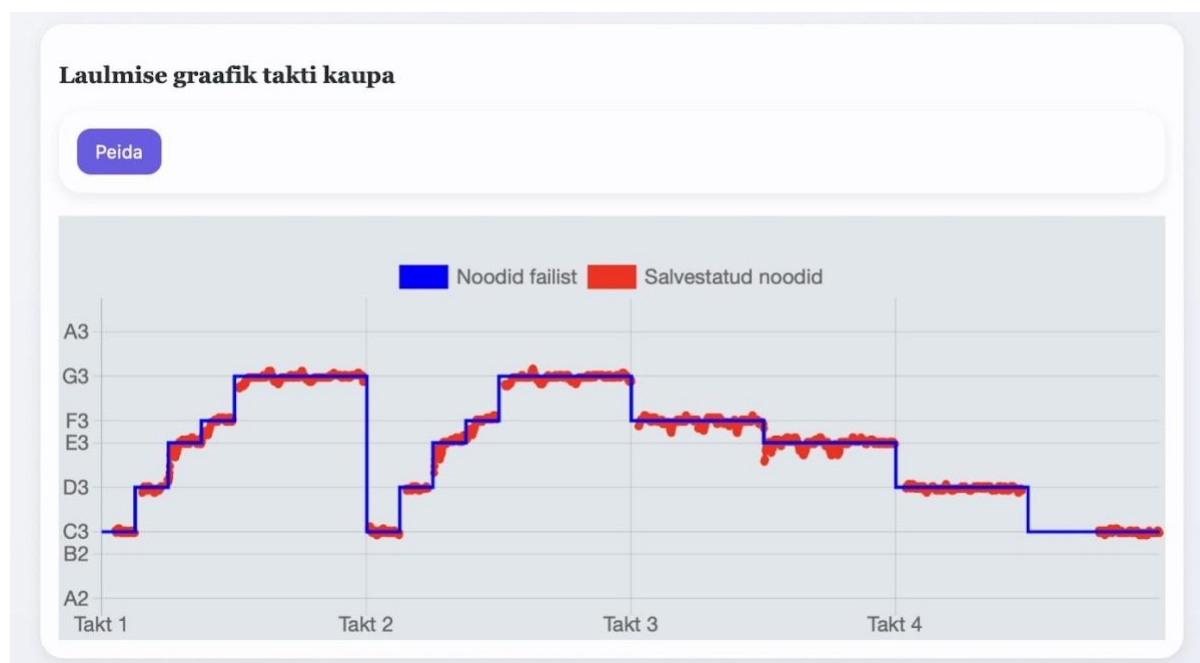
Võeti iga 512. mõõtepunkti sagedus, et infot ei oleks liiga palju. Iga vahemik on kas punast värvi, kui lauldi mööda, või rohelist värvi, kui lauldi õigesti. Korrektselt laulmise eksimismääraks on lubatud kuni 5 tsendi. Loeffler [17] on oma töös välja toonud, et vähemalt nii palju peab laulja eksima, et enamik inimesi suudaks seda tajuda. Vaadet on võimalik panna tööle nupust „Käivita“, kui tahta seda jooksutada samas tempos nagu salvestamisel. Kiiremaks ülevaateks saab animatsiooni kerimisriba abil läbi vaadata.

Teine vaade, mis annab tagasisidet esituse kohta, on kujutatud joonisel 7. Tegemist on graafikuga, millel on kuvatud kogu salvestatud esituse helikõrgused võrrelduna noodifailist tuvastatud nootidega. Inimesed tajuvad helisid eksponentsiaalsel skaalal, seega poleks

otstarbekas graafikul kasutada otseselt helisagedusi hertsides. Seetõttu teisendatakse nii salvestatud esituse kui ka referentsnootide sagedused MIDI-skaalale valemiga 2, kus f_n on heli võnkumissagedus ja m on vastav MIDI number [18].

$$m = 12 * \log_2 \left(\frac{f_n}{440} \right) + 69 \quad (2)$$

Nii vastab iga pooltoon vastab täpselt ühele ühikule. See muudab graafiku visuaalselt selgemaks ning võimaldab intuiitselt jälgida esituse ja partituuri vastavust.



Joonis 7. Laulmise tagasiside graafik taktide kaupa.

Horisontaalteljel on märgitud taktid, kus iga takti vahemik on määratud löögi pikkuste, mitte aja järgi. See teeb graafiku loetavamaks, sest tempomuutuste korral võib üks takt olla teisest palju pikem. Kuna laulja jälgib nooti, mis on jagatud taktideks, mitte ajaühikuteks, toetab selline kujutus ka loomulikku lugemisviisi. Vertikaaltelje skaala väärtusteks on seatud alushelid [19] ehk kõrgused, mis on klaveri valgetel klahvidel.

Esimene vaade on kasulik siis, kui laul on juba üsna selge. Selle põhjal ei saa hinnata, kas nooti tabati täpselt õigel hetkel, vaid sobib hästi kõrguste peenhäälestamiseks. Teine vaade on sobilik teost õppima hakates, kuna näitab suuremat trendi taktide lõikes. Nii saab kasutaja aru, kui ta salvestamisel oli tempost ees või maas.

Peale kasutamist peaks rakenduse kinni panema nupust „Sulge rakendus“. Vajutades suletakse brauseri aken ja port 5001, millel programm töötab. Kui sulgeda enne ise brauseri aken, jääb port aktiivseks ning rakendus töötab edasi.

5. Kasutatud tööriistad ja teegid

Rakenduse loomiseks kasutati erinevaid kaasaegseid tarkvaraarenduse tehnoloogiaid, mis valiti põhiliselt autori varasema kogemuse tõttu. Järgnevalt antakse ülevaade valitud raamistikest ja teekidest, tuues välja nende olulisus rakenduse eri komponentide toimimisel ja koostöös. Samuti nimetatakse ka kõrvale jäetud alternatiivid koos põhjendustega.

5.1 Eesliides

Tarkvara visuaalse poole eesmärk oli luua intuitiivne kasutajaliides, mis toetaks õppimisprotsessi ilma tehnilise keerukuseta. Järgnevalt käsitletakse eesliidese loomisel kasutatud raamistikke ja visualiseerimisvahendeid.

5.1.1 Vue.js

Rakenduse eesliidese raamistikuks on Vue.js — JavaScripti raamistik, mis on loodud selleks, et lihtsustada kasutajaliideste loomist [20]. Vue.js-i eripära seisneb selle reaktiivses andmemudelil ja komponentidel põhinevas arhitektuuris, mis võimaldab rakendust loogiliselt struktureerida. See teeb Vue.js-ist sobiva valiku projektide jaoks, kus kasutajaliides peab kiiresti reageerima andmete muutustele. Antud projektis kasutatakse Vue.js-i näiteks selleks, et kuvada animatsioone, mis visualiseerivad salvestatud helide ja andmete võrdlust. Lisaks võimaldab Vue.js moodulite kaupa üles ehitatud struktuur lihtsat hooldust ja tulevikus ka potentsiaalset funktsioonide laiendamist.

Võimalikeks alternatiivideks oleksid olnud näiteks React⁸ ja Angular⁹, mis on samuti populaarsed JavaScripti raamistikud kasutajaliideste loomiseks. Vue.js osutus valituks peamiselt autori eelneva kogemuse tõttu, mis võimaldas kiiremat arendusprotsessi ning paremat koodi haldamist.

5.1.2 Chart.js

Chart.js on JavaScripti teek, mis võimaldab luua erinevat tüüpi andmevisualiseeringuid, sealhulgas joon-, tulp- ja radardiagramme [21]. Kuna muusikalised andmed on mõõdetavad, on Chart.js ideaalne nende visualiseerimiseks. Antud rakenduses kasutatakse seda kasutajale tagasiside andmiseks, muutes nähtavaks esitatud ja referentsnootide vahelised erinevused.

⁸ <https://react.dev>

⁹ <https://angular.dev/>

Chart.js eelis seisneb selles, et see integreerub hästi Vue.js-iga ning võimaldab kohandada diagramme vastavalt vajadusele.

Võimalikud alternatiivid oleks olnud D3.js¹⁰. D3.js võimaldab väga paindlikke visualiseeringuid, ent selle keerukam seadistus ei sobitunud projekti ajaraamidesse ning sellepärast valiti Chart.js.

5.2 Tagaliides

Lisaks kasutajaliidesele on tarkvara oluline komponent tagaliides, mis tegeleb sisuliste toimingutega nagu helisalvestus, noodifailide töötlemine, andmete analüüs ja suhtlus andmestruktuuride vahel. Järgnevalt tutvustatakse peamisi tööriistu ja teeke, mis tagaliidese loomiseks valiti.

5.2.1 Flask

Rakenduse serveri pool on üles ehitatud Flaski peale, mis on minimalistlik, kuid laiendatav Pythonis kirjutatud veebiraamistik [22]. Kuigi eesliides on loodud Vue.js-iga, mis põhineb JavaScriptil, valiti serveri poole jaoks Flask, kuna seal on helitöötluste ja noodianalüüsi jaoks vastavad teegid.

Flask võimaldab API loomist, mille kaudu Vue.js kasutajaliides suhtleb serveri poolega. API kaudu hallatakse näiteks salvestatud helifailide töötlemist ja MusicXML andmete sünkroniseerimist. Flaski kasuks räägib ka selle paindlikkus: arendaja saab ise valida ja lisada ainult need moodulid, mida konkreetne projekt vajab, mis on oluline just väiksemahuliste ja kiiresti arendatavate rakenduste puhul.

Alternatiivina oleks saanud kasutada ka Django¹¹. Django sobib paremini suurematele projektidele, kus on vajalikud näiteks sisseehitatud autentimissüsteemi ja, andmebaasimudelid. Flask valiti seetõttu, et on mõeldud väiksema mahuga rakenduste arendamiseks ning võimaldab kaasata ainult vajalikke komponente.

5.2.2 Music21

Music21 on Massachusettsi Tehnoloogiainstituudis arendatud Pythoni põhine teek muusikalise süntaksi ning struktuuri analüüsimiseks, töötlemiseks ja visualiseerimiseks [23]. Antud töö

¹⁰ <https://d3js.org/>

¹¹ <https://www.djangoproject.com/>

raames kasutatakse music21 teeki, et analüüsida MusicXML-faile. MusicXML-faili partii ja nootide osa ülesehituse näide ning sellele vastav kuju noodikirjas on välja toodud lisas I (vt joonis 8 ja 9).

Music21 abil saab tuvastada partituuri parameetreid, näiteks taktimõõt, tempo, taktid, noodid ning nende ajastatus. MusicXML-failide info lugemiseks Pythonis rohkem nii kasutajasõbralikke teeki ei eksisteeri. Peamine võimalus teisiti failist infot saada oleks olnud sõnetöötlaste abil.

5.2.3 Sounddevice

Sounddevice on Pythoni teek, mis võimaldab kasutada arvuti heli sisend- ja väljundseadmeid [24]. Seda kasutatakse projekti raames salvestamiseks: kasutaja saab rakenduses salvestada oma hääle, mida seejärel analüüsitakse. Teegi tugevuseks on lühike ooteaeg salvestamise alustamisel ning lihtne kasutajaliides, mis võimaldab täpset ja stabiilset helikogumist erinevates süsteemides. Lisaks toetab Sounddevice nii mono- kui ka stereoformaati, erinevaid diskreetimissagedusi ning võimalust kasutada mitut sisendseadet.

Võimalik alternatiiv oli PyAudio¹², mis samuti toetab helisalvestust. Siiski jäi see kõrvale, kuna Sounddevice'iga oli hiline mine salvestuse alustamisel väiksem ning oli lihtsamini integreeritav NumPy ja Librosaga.

5.2.4 Librosa

Librosa on spetsialiseerunud Pythoni teek muusika- ja helisignaali analüüsiks [25]. See pakub tööriistu heli omaduste eraldamiseks nagu näiteks helikõrgus, tempo, taktimõõt, rütmilised tunnused ja spektrogrammid. Antud projektis kasutatakse Librosat laulja esitusest sageduste info ajas eraldamiseks. Teek on hästi dokumenteeritud ning loodud töötama käsikäes NumPyga, mis võimaldab suuremahuliste signaalide töötlemist kiirelt ja usaldusväärset. Alternatiivina kaaluti Essentia¹³ teeki, kuid see oli keerukam seadistada ning vähem dokumenteeritud võrreldes Librosaga.

¹² <https://pypi.org/project/PyAudio/>

¹³ <https://essentia.upf.edu/>

5.2.5 NumPy

NumPy on peamine teek teaduslikuks arvutamiseks Pythonis [26]. Seda kasutatakse massiivide loomiseks ja töötlemiseks, pakkudes hulgaliselt matemaatilisi funktsioone, mis võimaldavad efektiivset andmetöötlust. Muusikaanalüüsis kasutatakse NumPyd signaalide töötlemiseks, näiteks ajas varieeruvate omaduste väljaselgitamiseks ning Fourier' teisenduste (FFT) tegemiseks, et eraldada spektraalseid tunnuseid. Sarnase funktsionaalsuse oleks andnud ka SciPy¹⁴, kuid kuna NumPy kattis ära vajaliku funktsionaalsuse ja autor oli seda varem kasutanud, siis valiti NumPy.

5.2.6 PyInstaller

PyInstaller on tööriist, mis pakib kogu Pythonis kirjutatud rakenduse ühte täitmisfaili koos vajalike teekide ja sõltuvustega [27]. See tähendab, et kasutaja ei pea rakenduse kasutamiseks Pythonit eelnevalt paigaldama. Lõputöös kasutatakse PyInstallerit selleks, et teha tarkvara hõlpsasti jagatavaks ja kasutatavaks lõppkasutajatele. Teised võimalikud teegid oleksid olnud näiteks cx_Freeze¹⁵ ja py2exe¹⁶. Kuna autor oli eelnevalt PyInstallerit kasutanud, siis otsustati selle kasuks.

¹⁴ <https://scipy.org/>

¹⁵ <https://cx-freeze.readthedocs.io/en/stable/>

¹⁶ <https://www.py2exe.org/>

6. Tarkvara testimine

Arendatud tarkvara toimivuse hindamiseks viidi läbi testimine. Järgnevalt tutvustatakse testimise metoodikat, tulemusi ja kasutajate tagasisidet.

6.1 Metoodika

Valminud rakenduse hindamiseks viidi läbi testimine kuue kasutajaga. Testijateks olid kolm meest ja kolm naist vanuses 22–24. Testijad valiti nii, et kummastki soost oleks üks inimene järgnevatel tingimustel:

- koorilauluga hetkel aktiivselt tegelev;
- koorilauluga eelnevalt tegelenud;
- viisi pidav, kuid koorilaulu kogemusega.

Testimiseks valiti „Laul Põhjamaast“, mille jaoks leiti fail MuseScore keskkonnast [28]. Valiti antud teos, kuna selle sõnu ja viisi tundsid kõik osalised. Kasutajatel paluti kaasa laulda kaheksa esimest takti, kuna nii pikalt suutsid ka vähem kogenumad lauljad oma parima võimekuse juures laulda enne, kui hingamispausid esitust mõjutama hakkasid. Osalistel paluti laulda neljal erineval moel. Kombineeriti kahte tempot (originaaltempo ja 2 korda kiirem) ning kahte esitusviisi (ümisemine ja sõnadega laulmine), et näha kas nootide salvestamist võib mõjutada kiirus või laulmise esitusviis. Iga varianti salvestati kolm korda, et oleks võimalik valida parim esitus. Viimaks viidi läbi struktureerimata intervjuu, mille eesmärk oli saada põhjalikum arusaam kasutajate kogemustest rakenduse funktsionaalsuse osas. Intervjuu vorm võimaldas osalejatel vabalt väljendada oma mõtteid ja hinnanguid, tuues esile nii positiivsed aspektid kui ka rakenduse kasutamisel ilmnunud puudused. Intervjueerija suunas vestlust üldiste temade kaudu, ent täpsemad küsimused kujunesid vastavalt osalejate vastustele ja arutelu käigule. Selline lähenemine soodustas loomulikku dialoogi, mis aitas esile tuua kasutajakogemuse subjektiivseid nüansse.

6.2 Tulemused ja analüüs

Analüüsiks valiti iga variandi puhul salvestis, kus oli kõige suurem õigete sageduste lõikude osakaal, sest nii sai testijate vahel võrrelda kõige täpsemalt järgilauldud esitust. Tulemuste (vt lisa II tabel 1) põhjal saab öelda, et kõige täpsemad esitused tulid nii meeste kui naiste puhul ümisesedes ja originaaltempo. Nähtavalt mõjutas tulemust kogemus, kuid laulmise kiirus üldse

mitte. Peamine tegur, mis laulmise täpsust kõrgemaks muutis, oli ümiseses laulmine. Kui ümiseses jäid tulemused vahemikku 61–70%, siis sõnadega lauldes langes see 46–55%-ni.

Põhjus, miks sõnadega laulmine oli ebatäpsem, võib olla selles, et sõnades leiduvad foneetiliselt kõrged ja madalad vokaalid [29]. Selleks, et tuvastada, kas need võivad mõjutada nootide täpsust, uuriti põhjalikumalt kõiki esitusi silpide lõikes. Analüüs keskendus häälikutele „u“ ja „a“ järgmistel põhjustel:

- need erinevad foneetilise kõrguse poolest, „u“ on kõrge ja „a“ madal;
- need ei erine suuhoiaku poolest, kuna mõlemad on tagavokaalid;
- nende jaoks leidsid piisavalt pikad noodid, mille kõrgused olid lähedased.

Võrdlemiseks võeti silbid „tuu“ ja „maa“. Tulemuste (vt lisa II tabel 2) põhjal saab öelda, et kõrged ja madalad vokaalid mõjutasid nootide täpsust. Võib ka väita, et rohkem olid mõjutatud need, kes aktiivselt koorilauluga ei tegele. Koorilauljate puhul jäid erinevused keskmiselt alla 5 tsenti, endistel koorilauljatel oli ligikaudu 10 tsenti ning koorikogemuseta osalejatel kuni 15 tsenti.

Tuleb siiski rõhutada, et kuna ümin ja sõnadega laulmine olid erinevad esitused, mõjutas tulemusi ka see, kui sarnased olid vastavad lõigud tooniliselt. Kui esitus ei olnud piisavalt sarnane, võis tekkida täiendav kõikumine, mis ei tulenenud otseselt häälikust. Kokkuvõttes võib öelda, et vokaalide vaheldumine raskendab täpse sageduse hoidmist igal noodil ning kogenumad lauljad suudavad sellega paremini toime tulla.

6.3 Tagasiside programmile

Kasutajad tõid positiivse aspektina esile rakenduse selge ja kasutajasõbraliku liidese, mis võimaldas lihtsat ligipääsu kõikidele vajalikele funktsioonidele. Samuti hinnati kõrgelt visuaalse tagasiside süsteemi, mis andis kasutajatele võimaluse hinnata helikõrguste täpsust järelanalüüsi käigus. Lisaks leiti, et salvestusprotsess oli sujuv ja toimis ilma tehniliste tõrgeteta, pakkudes loogilist ja kasutajasõbralikku töövoogu.

Kriitilise tagasisidena toodi esile, et hetkel puudub võimalus erinevaid salvestusi omavahel võrrelda, et kasutaja saaks jälgida oma esituste arengut või valida nende seast parim sooritus. Salvestuste võrdlemise võimalus eeldaks lokaalse andmebaasi loomist ning kasutajaspetsiifiliste andmete haldust, mis tähendaks kogu rakenduse arhitektuuri oluliselt keerukamaks muutmist.

Sooviti ka, et lehel oleks kuvatud loo originaaltempo, pealkiri, autor ning muud üldandmed noodifaili kohta, mitte ainult faili nimi. Teose metainfo, nagu pealkiri, autor ja tempo, kuvatavaks tegemine nõuaks MusicXML-failide sisulist valideerimist ning erandjuhtumite käsitlemist, sest vastav info ei ole failides alati ühtlaselt struktureeritud ega usaldusväärset esitatud.

Kasutajatele oleks meeldinud samuti mingisugune numbriline skoor, mis oleks andnud neile lihtsa aluse, mille abil tulemusi võrrelda. Numbrilise skoori lisamine näib esmalt lihtne, kuid tegelikult eeldab see selget hindamismudelit ja muusikalist metoodikat, et vältida eksitava või liiga lihtsustatud tagasiside andmist. Visuaalne tagasiside võimaldab kasutajal oma esitust analüüsida paindlikumalt ja nüansirikkamalt ning sobis seetõttu paremini töö eesmärgiga.

Kasutajatelt saadud tagasiside tõi esile mitmeid väärtuslikke arendusettepanekuid. Paraku olid igapäevaelu rakendamise seotud raskused, mistõttu ei olnud võimalik neid käesoleva töö raames realiseerida. Kõik esitatud ettepanekud on siiski asjakohased ning neid võiks käsitleda edasiste arenduste loomuliku suunana.

7. Edasiarendamise võimalused

Bakalaureusetöö raames arendatud tarkvaral on mitmeid võimalikke edasiarendusi. Järgnevalt on kirjeldatud ideid, mille rakendamine aitaks muuta lahendust kasutajasõbralikumaks, mugavamaks ning toetaks veelgi paremini laulja õppeprotsessi.

Üheks oluliseks edasiarenduse suunaks on testijate soovitusel andmebaasi ja kasutajakontode süsteemi loomine, mis võimaldaks kasutajal salvestada oma varem üleslaetud failid, sisselauldud esitused koos vastava tagasisidega ning ka helifailid. Selline funktsionaalsus annaks kasutajale võimaluse võrrelda erinevaid salvestusi, jälgida oma arengut ning kuulata varasemaid esitusi. Isiklik salvestusajalugu looks eeldused ka individuaalsemaks lähenemiseks ja pikemaajaliseks kasutamiseks. Salvestuse esitused võiksid olla ettemängitavad koos kordusanimatsiooniga nii nagu hetkel referentshelid koos salvestamise animatsiooniga.

Tarkvara võiks samuti pakkuda reaalses tagasiside võimalust lauljale esituse ajal. Kasutajale võiks anda võimaluse valida, kas reaalses tagasiside on sisse või välja lülitatud. Nii saaks funktsionaalsust kohandada vastavalt kasutaja eelistustele ja kogemustasemele — algajale võib vahetu visuaalne tugi olla kasulik, samas kui edasijõudnud laulja võib eelistada hilisemat analüüsi. Reaalses tagasiside võiks hõlmata näiteks kõrguse, rütmi või dünaamika visuaalset esitust.

Hetkel võimaldab programm enne laulmist kuulata valitud lõigu esimest nooti. Kuigi see aitab lauljal alustada õige helikõrgusega, ei valmista esimene noot ette teose üldiseks tonaalsuseks. Jordan [30] toob oma artiklis välja, et toonika sisemise kuulmise puudumisel jääb intonatsioon parimal juhul ligikaudseks. Seetõttu võiks lisada võimaluse kuulata teose põhihelistiku akordi, näiteks toonika kolmkõla. Sellise funktsiooni rakendamine eeldab aga helistiku täpset tuvastamist. Tavaliselt saab helistiku määrata võtmemärkide ja lõpuakordi põhjal, ent olukord muutub keerukaks juhul, kui teoses esineb modulatsioon ehk helistiku vahetus. Sellisel juhul ei pruugi viimane akord enam vastata algsele helistikule, mistõttu pole olemas universaalselt toimivat lahendust.

Graafikul võiks olla võimalus kitsendada veelgi taktide valikut. Näiteks kui salvestati taktid vahemikus 1–50, siis kasutaja võiks saada omakorda veel valida, kas soovib näha ainult 3. takti või näiteks vahemikku 4–5. Nii on lihtsam filtreerida olukorras, kus on sisse lauldud suur hulk

takte, sest sellisel juhul on graafik üsna tihedalt andmeid täis. See muudaks konkreetse vahemiku jaoks info lugemise jaoks palju lihtsamaks.

Kokkuvõte

Töö eesmärk oli luua tarkvara, mis aitaks koorilauljaid häälepartiide iseseisval omandamisel, pakkudes interaktiivset ja kasutajasõbralikku keskkonda, kus lauljad saavad visuaalset tagasisidet oma esituse täpsuse kohta. Bakalaureusetöös analüüsi esmalt koorilaulu tähtsust Eestis, partiide õppimise traditsioonilisi meetodeid ning digilahenduste kasutamist muusikaõppes. Lisaks viidi läbi olemasolevate sarnaste rakenduste analüüs, et selgitada välja nende tugevused ja piirangud.

Töös arendati välja tarkvara, mis võimaldab importida MusicXML-formaadis kooriteoseid, valida harjutamiseks konkreetseid häälepartiisid ja taktivahemikke ning muuta harjutamise tempot. Tarkvara annab lauljatele võimaluse salvestada oma esitust ning saada koheselt visuaalset tagasisidet helikõrguste täpsuse kohta kahe erineva analüüsivaate abil: detailne noodilõikude täpsus ning suuremaid trende kajastav graafiline ülevaade. Rakendus ei vaja paigaldamist ning töötab lokaalselt, mis võimaldab programmi kasutada ilma internetiühenduseta.

Tarkvara loomise käigus ühendati mitmed erinevad tehnoloogilised vahendid ja raamistikud, sealhulgas Vue.js kasutajaliidese jaoks, Flask serveripoolsete funktsioonide haldamiseks ning Librosa, Music21 ja Sounddevice helitöötuse ja noodianalüüsi teostamiseks. Erilist tähelepanu pöörati partituuri täpsele tõlgendamisele, helikõrguse määramisele ajas ning intuiitivse tagasiside loomisele. Tehniline teostus võimaldas saavutada sujuva töövoogu, kus muusikaanalüüs ja visuaaliseerimine on integreeritud toimivaks õppevahendiks.

Tarkvara testiti kuue kasutajaga, et hinnata selle efektiivsust ja kasutusmugavust. Testimise käigus leiti, et loodud rakendus toetab efektiivselt häälepartiide õppimist ning eriti kasulikuks peeti visuaalse tagasiside võimalust. Kasutajad hindasid kõrgelt tarkvara selget ja loogilist töövoogu, kuigi töid välja ka võimalikke parandusvõimalusi, näiteks salvestuste omavaheline võrdlemine ning täiendava informatsiooni kuvamine noodifaili kohta.

Töö käigus täideti seatud eesmärk edukalt, arendades välja praktilise tarkvara, mis vastab koorilauljate vajadustele ning aitab neil tõhusamalt individuaalselt oma partiisid omandada.

Viidatud kirjandus

- [1] Kallastu A. Noot. *Sisuloome e-koolikott*, 2022. <https://sisuloome.e-koolikott.ee/node/11055> (15.05.2025).
- [2] Kallastu A. Rütm. *Sisuloome e-koolikott*, 2022. <https://sisuloome.e-koolikott.ee/node/11096> (15.05.2025).
- [3] Kallastu A. Lök. *Sisuloome e-koolikott*, 2022. <https://sisuloome.e-koolikott.ee/node/11065> (15.05.2025).
- [4] Kallastu A. Tempo. *Sisuloome e-koolikott*, 2022. <https://sisuloome.e-koolikott.ee/node/11100> (15.05.2025).
- [5] Kallastu A. Partii. *Sisuloome e-koolikott*, 2022. <https://sisuloome.e-koolikott.ee/node/13022> (15.05.2025).
- [6] HyperPhysics. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Music/cents.html> (14.04.2025).
- [7] Good M. D. MusicXML: The First Decade. <https://michaelgood.info/publications/music/musicxml-the-first-decade/> (14.04.2025).
- [8] Rebas H. Eesti koorilaulu lõhestatusest nõukogude aastail. *Mäetagused*, 2016, 63, 129–150.
- [9] Demorest S. M., Kelley J., Pfordresher P. Q. Singing ability, musical self-concept, and future music participation. *Journal of Research in Music Education*, 2017, 65(4), 473–490.
- [10] Kangron E. Üldhariduskooli muusikaõpetus tänapäeval ja tulevikus. *Sirp*, 2020. <https://sirp.ee/s1-artiklid/c5-muusika/uldhariduskooli-muusikaopetus-tanapaeval-ja-tulevikus/> (12.04.2025).
- [11] Tanner K. Mõtteid koorimuusika-aastast 2010. *Sirp*, 2011. <https://www.sirp.ee/s1-artiklid/c5-muusika/motteid-koorimuusika-aastast-2010/> (12.04.2025).
- [12] Varvarigou M. Modelling effective choral conducting education through an exploration of example teaching and learning in England. UCL haridusteaduste instituudi doktoritöö. 2009. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10019884> (14.12.2024).

- [13] Ban J., Md Noor A. R. B., Goh Y. Enhancing vocal pedagogy through digital audio technology: a case study of popular singing education at Sichuan Conservatory of Music, China. *Borneo Akademika*, 2024, 8(2), 163–175.
- [14] Rexhepi F. G., Breznica R. K., Rexhepi B. R. Evaluating the effectiveness of using digital technologies in music education. *Journal of Educational Technology Development and Exchange (JETDE)*, 2024, 17(1), 273–289.
- [15] Savage S. *The Art of Digital Audio Recording: A Practical Guide for Home and Studio*. New York: Oxford University Press. 2011.
- [16] Librosa. Why resample on load? <https://librosa.org/blog/2019/07/17/resample-on-load/> (12.04.2025).
- [17] Loeffler D. B. Instrument timbres and pitch estimation in polyphonic music. Georgia Tehnoloogiainstituudi elektri- ja arvutitehnika kooli magistritöö. 2006. <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/6fe78bf0-ea7c-49e2-ba03-2690dd669f85/content> (04.04.2025).
- [18] University of New South Wales. Note names, MIDI numbers and frequencies. <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/notes.html> (13.04.2025).
- [19] Kallastu A. Alusheli. *Sisuloome e-koolikott*, 2022. <https://sisuloome.e-koolikott.ee/node/11096> (15.05.2025).
- [20] Vue.js. <https://vuejs.org/> (08.04.2025).
- [21] Chart.js. <https://www.chartjs.org/> (08.04.2025).
- [22] Grinberg M. *Flask Web Development: Developing Web Applications with Python*. 2nd ed. Sebastopol (CA): O'Reilly Media. 2018.
- [23] Cuthbert M. S., Ariza C. music21: A Toolkit for Computer-Aided Musicology and Symbolic Music Data. *Proceedings of the International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR)*, 2010.
- [24] Sounddevice. <https://python-sounddevice.readthedocs.io/> (08.04.2025).

- [25] McFee B., Raffel C., Liang D., Ellis D. P., McVicar M., Battenberg E., Nieto O. librosa: Audio and music signal analysis in Python. *Proceedings of the 14th Python in Science Conference*, 18–25.
- [26] Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., Gommers R., Virtanen P., Cournapeau D., Wieser E., Taylor J., Berg S., Smith N. J., Kern R., Picus M., Hoyer S., van Kerkwijk M. H., Brett M., Haldane A., del Río J. F., Wiebe M., Peterson P., Gérard-Marchant P., Sheppard K., Reddy T., Weckesser W., Abbasi H., Gohlke C., Oliphant T. E. Array programming with NumPy. *Nature*, 2020, 585(7825), 357–362.
- [27] PyInstaller. <https://pyinstaller.org/> (08.04.2025).
- [28] MuseScore. Laul Põhjamaast. <https://musescore.com/user/1886256/scores/7362830> (06.04.2025).
- [29] Eesti keele käsiraamat. Häälikud ja foneemid. <https://arhiiv.eki.ee/books/ekk09/index.php?p=2&p1=5> (12.04.2025).
- [30] Jordan J. M. The pedagogy of choral intonation: Efficient pedagogy to approach an old problem. *The Choral Journal*, 1987, 27(8), 9–16.

Lisad


I. MusicXML-faili ülesehitus ja esitus noodikirjas

```
<score-part id="P1">
  <part-name>Baritone</part-name>
  <part-abbreviation>Bar.</part-abbreviation>
  <score-instrument id="P1-I1">
    <instrument-name>Baritone</instrument-name>
    <instrument-sound>voice.baritone</instrument-sound>
  </score-instrument>
  <midi-device id="P1-I1" port="1"></midi-device>
  <midi-instrument id="P1-I1">
    <midi-channel>4</midi-channel>
    <midi-program>53</midi-program>
    <volume>78.7402</volume>
    <pan>0</pan>
  </midi-instrument>
</score-part>
</part-list>
<part id="P1">
  <measure number="1" width="150.47">
    <print>
      <system-layout>
        <system-margins>
          <left-margin>50</left-margin>
          <right-margin>0</right-margin>
        </system-margins>
        <top-system-distance>170</top-system-distance>
      </system-layout>
    </print>
    <attributes>
      <divisions>1</divisions>
      <key>
        <fifths>0</fifths>
      </key>
      <time>
        <beats>2</beats>
        <beat-type>4</beat-type>
      </time>
      <clef>
        <sign>F</sign>
        <line>4</line>
      </clef>
    </attributes>
    <direction placement="above" system="only-top">
      <direction-type>
        <metronome parentheses="no" default-x="-37.67" relative-y="20">
          <beat-unit>quarter</beat-unit>
          <per-minute>30</per-minute>
        </metronome>
      </direction-type>
      <sound tempo="30"/>
    </direction>
    <note default-x="82.97" default-y="-25">
      <pitch>
        <step>C</step>
        <octave>3</octave>
      </pitch>
      <duration>1</duration>
      <voice>1</voice>
      <type>quarter</type>
      <stem>up</stem>
    </note>
    <note default-x="111.22" default-y="-20">
      <rest/>
      <duration>1</duration>
      <voice>1</voice>
      <type>quarter</type>
    </note>
    <barline location="right">
      <bar-style>light-heavy</bar-style>
    </barline>
  </measure>
</part>
```

Joonis 8. MusicXML-faili partii ja nootide osa.

♩ = 30

Baritone



The image shows a musical staff for a Baritone instrument. The staff is in bass clef and 2/4 time. The first measure contains a quarter note on the second line (G2). The second measure contains a quarter rest. The piece ends with a double bar line.

Joonis 9. MusicXML-faili partii ja nootide osale vastav noodikiri.

II. Testimise tulemused

Tabel 1. Laulmise tulemused.

Sugu	Kogemus	Laulmisviis	Laulmise kiirus	Täpsete noodilõikude osakaal
Mees	koorilaulja	ümisedes	originaaltempo	70,1%
Naine	koorilaulja	ümisedes	2 korda kiirem	69,3%
Naine	koorilaulja	ümisedes	originaaltempo	68,7%
Mees	koorilaulja	ümisedes	2 korda kiirem	68,5%
Mees	endine koorilaulja	ümisedes	originaaltempo	66,4%
Naine	endine koorilaulja	ümisedes	2 korda kiirem	65,8%
Mees	endine koorilaulja	ümisedes	2 korda kiirem	64,8%
Mees	koorikogemuseta	ümisedes	originaaltempo	64,2%
Naine	endine koorilaulja	ümisedes	originaaltempo	63,9%
Naine	koorikogemuseta	ümisedes	originaaltempo	63,4%
Mees	koorikogemuseta	ümisedes	2 korda kiirem	62,0%
Naine	koorikogemuseta	ümisedes	2 korda kiirem	61,2%
Naine	koorilaulja	sõnadega	originaaltempo	55,3%
Naine	koorilaulja	sõnadega	2 korda kiirem	54,4%
Mees	koorilaulja	sõnadega	originaaltempo	54,3%
Mees	koorilaulja	sõnadega	2 korda kiirem	53,9%
Mees	koorikogemuseta	sõnadega	originaaltempo	51,1%
Naine	endine koorilaulja	sõnadega	originaaltempo	50,4%
Mees	endine koorilaulja	sõnadega	2 korda kiirem	49,7%
Naine	endine koorilaulja	sõnadega	2 korda kiirem	49,2%
Naine	koorikogemuseta	sõnadega	2 korda kiirem	48,8%
Mees	endine koorilaulja	sõnadega	originaaltempo	48,5%

Mees	koorikogemuseta	sõnadega	2 korda kiirem	47,1%
Naine	koorikogemuseta	sõnadega	originaaltempo	46,9%

Tabel 2. Kõrguste erinevused silpides sisalduvate häälikute ja ümismise vahel.

Sugu	Kogemus	Keskmine kõrguse erinevus võrreldes ümismisega silbiga „tuu“ (tsenti)	Keskmine kõrguse erinevus võrreldes ümismisega silbiga „maa“ (tsenti)
Mees	Koorilaulja	-3,2	+2,7
Naine	Koorilaulja	-4,5	+3,8
Mees	Endine koorilaulja	-9,1	+10,2
Naine	Endine koorilaulja	-10,7	+9,6
Mees	Koorikogemusta	-14,5	+13,8
Naine	Koorikogemusta	-13,2	+14,9

III. Tarkvara koorilaulu häälepartiide omandamise abistamiseks

Valminud tarkvara lähtekood on kättesaadav lingilt <https://github.com/argoers/SingingHelper>.

Käivitusjuhend ning operatsioonisüsteemipõhised täitmisfailid on ligipääsetavad lingilt <https://github.com/argoers/SingingHelper/releases>.

Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Argo Ers,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **Tarkvara koorilaulu häälepartiide omandamise abistamiseks**, mille juhendaja on Sven Aller, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
2. annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni;
3. olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
4. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Argo Ers

15.05.2025