

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

NH90-KULJETUSHELIKOPTERIN TUOTTAMA MATALATAAJUUSVÄRÄHTELY

Pro gradu -tutkielma

Yliluutnantti
Kallejuhani Hirvonen

Sotatieteiden maisterikurssi 7
Maasotalinja

Huhtikuu 2018

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 7	Linja Maasotalinja
Tekijä Yliluutnantti Kallejuhani Hirvonen	
Tutkielman nimi NH90-KULJETUSHELIKOPTERIN TUOTTAMA MATALATAAJUUSVÄRÄHTELY	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2018	Tekstisivuja 64 Liitesivuja 9
TIIVISTELMÄ <p>Tutkimuksen päämääränä oli selvittää NH90-helikopterin roottorilapojen tuottaman matalataajuusvärähtelyn laatua ja voimakkuutta helikopterihallissa. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin matalataajuusvärähtelyn vaikutusta työsuojeluun.</p> <p>Värähtelymittaukset suoritettiin kesäkuussa 2017 Utin jääkärirykmentin 3-hallilla. Tutkimuksen empiirinen aineisto kerättiin kaksivaiheisessa, yhteensä 65 minuutin pituisessa mitaustapahtumassa, jossa helikopteri oli käynnissä sotilasarasematasen konepaikalla myöhemmin siirtyen helikopterihallin edustalle. Näiden kahden vaiheen aikana mittauksia suoritettiin helikopterihallin sisätiloissa kolmesta eri mittauspisteestä hallin nosto-oven ollessa avoinna ja suljettuna.</p> <p>Tutkimus oli tutkija- ja metoditriangulaatiota hyödyntävä monimenetelmätutkimus, jossa aineisto kerättiin mittaamalla ja mittaustuloksia tarkasteltiin kirjallisuustutkimuksen kautta. Tutkimuksen johtopäätökset muodostettiin objektiivisen havainnoinnin sekä työsuojelun näkökulmasta.</p> <p>Tutkimuksessa saatiin selville NH90-helikopterin roottorilapojen aiheuttavan voimakasta, äänenpainetasoltaan yli 80dB:n matalataajuusvärähtelyä helikopterihallin sisätiloissa. Helikopterihallin akustisten ominaisuuksien seurauksena värähtelyn voimakkuus vaihteli suuresti hallin mittauspisteiden välillä. Hallin nosto-ovi ei rakenteensa takia kyennyt vaimentamaan alle 200Hz:n taajuuksia.</p> <p>Työsuojelun näkökulmasta matalataajuusvärähtelyn laatu aiheutti haasteita värähtelyltä suojautumiseen, sekä muodosti jatkotutkimustarpeen meluvaikutuksen esiintymisestä sekä värähtelyn vaimennustoimenpiteistä. Kun mitattua värähtelyä tarkasteltiin meluna, ei perusteltuja johtopäätöksiä mitatun värähtelyn aiheuttamista negatiivisista terveysvaikutuksista pystytty muodostamaan aiemmin laaditun vertailukelpoisen tutkimuksen puutteen vuoksi. Mahdollisia värähtelystä aiheutuvia terveyshaittoja ei kuitenkaan voitu sivuuttaa. Jatkossa olisi syytä tutkia melun vaikutuksia henkilöstön työhyvinvointiin ja terveyteen sekä mahdollisuuksia vaimentaa matalataajuisen melun välittymistä asematasolta hallin sisätiloihin.</p>	
AVAINSANAT NH90, Työsuojelu, Helikopteri, Matalataajuusvärähtely, Melu, Ääni, Akustiikka	

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO.....	1
1.1.	Esittely	1
1.2.	Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset.....	3
1.3.	Tutkimuksen rakenne.....	3
1.4.	Tutkimusmenetelmät ja lähdekritiikki.....	5
1.5.	Työn tutkimusasetelma, rajaukset ja aikaisempi tutkimus.....	7
2.	ÄÄNI JA MELU.....	10
2.1.	Ääni fysikaalisena ilmiönä.....	10
2.2.	Desibeli	11
2.3.	Taajuus, aallonpituus ja amplitudi.....	13
2.4.	Värähtelyjen yhdistyminen	15
2.5.	Akustiikka, äänitila, heijastukset ja jälkikaiunta	18
2.6.	Huonemoodit	22
2.7.	Analoginen signaali digitaalisessa ympäristössä.....	24
2.8.	1/12 Oktaavi	26
2.9.	Kuuloaisti ja äänen vaikutus ihmiseen.....	27
2.10.	Kriittiset kaistat ja peittoilmiö.....	30
2.11.	Melu	31
2.12.	Yhteenveto.....	35
3.	MITTAAMINEN.....	37
3.1.	Hyvä mittauskäytäntö	37
3.2.	Mitattava äänilähde ja mittausympäristö	38
3.3.	Mittauslaitteisto	44
3.4.	Mittausjärjestelyt ja mittausten kulku.....	45
3.5.	Mittausepävarmuudet.....	48
3.6.	Yhteenveto.....	50
4.	MITTAUSTULOKSET	52
4.1.	Yleistä	52
4.2.	Vaihe 1: Mittaukset helikopterin ollessa konepaikalla	52
4.3.	Vaihe 2: Mittaukset helikopterin ollessa rullausviivalla hallin edessä	56
4.4.	Yhteenveto.....	59
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	63

KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

1/12 Oktaavi: Oktaaveihin jaettu taajuusalue, jossa jokainen oktaavi on jaettu 12 osaan.

Desibeli (dB): Dimensioton yksikkö, joka vertaa tehosuureiden suhteita logaritmisella asteikolla.

Ekvivalenttitaso: Mittausjakson tehollisarvo, eli keskiäänitaso (L_{eq}).

FLIGHT-käyttöalueasetus: Moottorinohjausyksikkö kontrolloi työturbiinin nopeuden 100%:iin sopeuttaen moottorin tehon pääroottorin kuormitukseen.

Hertsi (Hz): Taajuuden yksikkö joka ilmaisee värähtelyn edestakaisen liikesyklien määrää sekunnin aikana.

Inframelu: Häiritseväksi tai epämiellyttäväksi koettu ihmisen kuuloalueen ulkopuolella aistittu matalataajuusvärähtely.

Infraääni: Jaksollinen painehäiriö, jonka taajuus on alhaisempi kuin ihmisen kuulokynnys.

Kuulokynnys: Ihmisen kuuloaistin keskimääräiset raja-arvot: 20Hz ja 20000Hz.

Käyttöhuolto: Ennen päivän ensimmäistä lentoa, lentojen välillä ja niiden jälkeen suoritettut kunnonvalvontatarkastukset, nestetäytöt sekä pienet vikakorjaukset.

Matalataajuusvärähtely: Alle 100Hz:n äänet jotka voidaan havaita kuulo- tai tuntoaistin avulla tai näiden yhdistelmällä.

Melu: Ääni, jonka ihminen kokee häiritsevänä tai epämiellyttävänä, tai joka on hänen terveydelleen tai hyvinvoinnilleen haitallista.

Meluvaikutus: Jokin melun, tai melulle altistumisen aiheuttamaksi tai seuraamukseksi katsottu mielikuvien, käyttäytymisen tai elintoimintojen vaste tai reaktio, eli havaittavissa oleva muutos.

SPL (Sound pressure level): Desibeliarvon tarkennus, joka ilmaisee arvon esittävän kuulokynnykseen suhteutettujen arvojen suhdetta.

Työsuojelu: Työnantajan ja työntekijöiden yhteistoiminnassa ylläpidettävää ja parannettavaa työturvallisuutta työpaikalla.

Äänes: Ääni joka muodostuu vain yhdestä taajuudesta; Harmoninen osasävel.

KUVAT

Kuva 1. Maanpuolustuskorkeakoulun sotatekniikan laitoksen tutkimuksen tyyppirakenteen mukainen rakenne tämän tutkimuksen näkökulmasta

Kuva 2. Tutkimusasetelma

Kuva 3. Harmonisen ääniaallon peruskäsitteet

Kuva 4. Aaltomuotojen vaiheistus

Kuva 5. Harmonisten osasävelten summautuminen perustaajuuteen

Kuva 6. Huoneresonanssien amplitudimuutokset

Kuva 7. Aksiaalinen, tangentialinen ja oblique-huonemoodit

Kuva 8. Mittausten näytteenottotaajuus

Kuva 9. Laskostumisen aiheuttama häiriöäänes

Kuva 10. Näyttökuvaa SAMURAI-ohjelmiston 1/12 oktaavin asetusarvoista

Kuva 11. ISO-standardin 3746 mukainen vakioäänekkyysskäyrästä

Kuva 12. Taajuuspainotukset

Kuva 13. Peittoilmiö

Kuva 14. Suorituskyvyn ja vireystilan riippuvuussuhde

Kuva 15. NH90-helikopterin mitat

Kuva 16. Hallin mallinnus

Kuva 17. Mallinnetut huoneresonanssit

Kuva 18. Mittauspisteet

Kuva 19. Helikopterin sijoittuminen mittausvaiheissa 1 ja 2

TAULUKOT

Taulukko 1. Esimerkki Sabinen taajuuskertoimista

Taulukko 2. Tulosten epävarmuus

Taulukko 3. Mittausoloja koskevat vaatimukset

KAAVIOT

Kaavio 1. Akustiikkamallinnuksen jälkikaiunta-aika (Sabine)

Kaavio 2. Vaihe 1, Piste1 ja tunnistetut äänekset

Kaavio 3. Vaihe 1, Piste 2

Kaavio 4. Vaihe 1, Piste 3

Kaavio 5. Vaihe 2, Piste 1

Kaavio 6. Vaihe 2, Piste 2

Kaavio 7. Vaihe 2, Piste 3

Kaavio 8. Perustaajuuksien voimakkuudet vaiheessa 1

Kaavio 9. Perustaajuuksien voimakkuudet vaiheessa 2

Kaavio 10. Voimakkuuden muutokset vaiheessa 1

Kaavio 11. Voimakkuuden muutokset vaiheessa 2

Kaavio 12. Nosto-oven vaimennuskyky

NH90-KULJETUSHELIKOPTERIN TUOTTAMA MATALATAAJUUSVÄRÄHTELY

1. JOHDANTO

1.1. Esittely

Tutkimuksen päämääränä on selvittää NH90-helikopterin roottorilapojen aikaansaaman matalataajuusvärähtelyn laatua ja voimakkuutta helikopterihallissa. Lisäksi tutkimuksessa tarkastellaan värähtelyn mahdollisia vaikutuksia työsuojeluun.

Helikoptereiden tuottamaa värähtelyä tarkastellaan usein tutkimuksissa, joiden päämääränä on selvittää helikopterin rakenteista lentomiehistöön välittyvän värähtelyn voimakkuutta ja laatua. Helikopteri tuottaa käynnissä ollessaan värähtelyä myös rakenteidensa ulkopuolelle ilman välityksellä. Värähtely syntyy pyörivien roottorilapojen aikaansaamasta aerodynaamisesta ilmiöstä, jossa roottorilavan jättöreunan turbulenssi aiheuttaa aistittavan painehäiriön [5, s. 3]. Helikopterin roottorilavat pyörivät normaalitoiminnassa tasaisella kierroslukuarvolla. NH90:n roottorilapojen pyörimisnopeuksista voidaan laskea niiden aiheuttaman painehäiriön painottuvan alle 100Hz:n taajuuksille.

Ihminen kykenee kuuloaistinsa avulla havaitsemaan muutoksia staattisessa ilmanpaineessa keskimäärin 20Hz-20kHz:n välillä. Painevaihteluiden havainnointi ei kuitenkaan rajoitu pelkästään kuuloaistiin. Ihminen kykenee havainnoimaan kuuloalueen ulkopuolella esiintyviä alle 20Hz:n taajuuksia tuntoaistinsa avulla, mikäli ne esiintyvät riittävän voimakkaina. Alle 20Hz:n ääniä kutsutaan infraääniksi. Aistittu kuultavissa oleva ääni tai infraääni voidaan merkityssisällöstään riippuen tulkita myös meluksi. [13, s. 8, s. 10].

Tutkimuksen kohteena on Maavoimien NH90 keskiraskaan kuljetushelikopterin aiheuttamat värähtelyt. Maavoimien helikoptereiden päätukikohta sijaitsee Utin jääkäriyrykmentissä. Päivittäisen toiminnan aikana helikoptereiden läheisyydessä työskentelee lentomiehistöjen lisäksi lentotekninen käyttöhuoltohenkilöstö, jonka tehtäviin kuuluvat lentokaluston päivittäiset kunnonvalvontatarkastukset. Käyttöhuoltohenkilöstö työskentelee helikopterihalleissa helikopterin tarkastusten, varustelun ja vikakorjausten aikana. Hallien läheisyydessä sijaitsevat Utin lentokentän sotilaskonepaikat, joissa lennolle lähtevälle helikopterille suoritetaan käynnistystoimenpiteet.

Lentoa edeltävien käyttöhuoltotarkastusten jälkeen helikopterit hinataan halleista asematason konepaikoille. Helikopterin käynnistystoimenpiteet suoritetaan kyseisillä konepaikoilla tarkastuslistan mukaisesti. Käynnistystoimenpiteiden tarkastuslistan mukaisista toimenpiteistä johtuen helikopteri on käynnissä konepaikalla useita minuutteja. Näiden minuuttien aikana halleissa työskentelevä henkilöstö altistuu kopterin aiheuttamalle matalataajuiselle värähtelylle. Helikoptereiden käytettävyyden kasvaessa myös tukikohdan lentointensiteetti kasvaa, mikä taas kasvattaa käynnistystoimenpiteiden määrää. Useamman helikopterin peräkkäiset lentokierrokset kasvattavat ajallisesti matalataajuusvärähtelyn määrää helikopterihalleissa ja muissa työtiloissa, jotka sijaitsevat konepaikkojen läheisyydessä.

Suomessa elinympäristön laadusta on säädetty muun muassa ympäristösuojelulaissa (YSL) ja maankäyttö- ja rakennuslaissa, joissa viihtyvyys on yksi laadun kriteereistä. [23, s. 15] Ympäristöministeriön laatimien raporttien perusteella voidaan todeta jatkuvan melun vähentävän työympäristön viihtyisyyttä. Työympäristön viihtyisyydellä on yhteys työntekijöiden vireystilaan. Vireystila voidaan liittää osaksi keskittymiskykyä ja näin ollen lentotekniikan työympäristön viihtyisyydellä voidaan osittain vaikuttaa lentoturvallisuuteen. Melun haittavaikutuksista ja niiden torjumisesta on olemassa lukuisia tutkimuksia ja säädöksiä, mutta melun esiintyessä ihmisen kuuloalueen ulkopuolella, aiheeseen liittyvä vertailukelpoinen tutkimustyö on huomattavasti vähäisempää. Mikäli helikopterin aiheuttama värähtely koetaan meluna, sillä saattaa olla vaikutusta henkilöstön työhyvinvointiin. Koettuna ilmiönä inframelu on kuitenkin varsin subjektiivinen ja lisätutkimusta vaativa kokonaisuus, joten tämän tutkimuksen painopisteinä ovat värähtelyn laadun ja voimakkuuden selvittäminen.

1.2. Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen päämääränä on selvittää Maavoimien NH90 keskiraskaan kuljetushelikopterin aikaansaaman matalataajuusvärähtelyn laatua ja voimakkuutta. Tutkimuksen pääkysymys on:

- **Millaista matalataajuusvärähtelyä asematasolla käynnissä oleva NH90 tuottaa helikopterihalliin?**

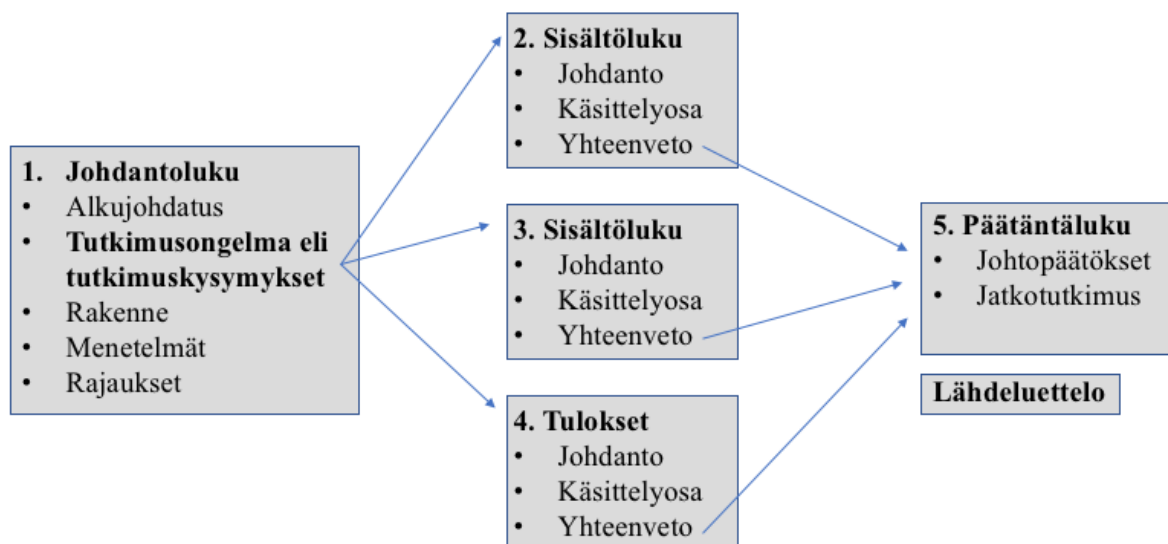
Tutkimuksen pääkysymykseen pyritään vastaamaan seuraavien apukysymysten avulla:

- **Miten helikopterin tuottama äänenvoimakkuus jakautuu ihmisen kuuloalueella 20-20 000Hz?**
- **Miten helikopterin roottoreiden tuottama äänenvoimakkuus jakautuu taajuusalueella 3,15-20000Hz?**
- **Miten eri mittauspisteet ja nosto-oven eri asennot vaikuttavat mittaustuloksiin taajuusalueella 3,15-20000Hz?**
- **Miten matalataajuusvärähtely vaikuttaa työsuojeluun?**

Ensimmäiseen apukysymykseen vastaamalla pyritään luomaan kokonaiskuva NH90-helikopterista ihmisen kuulemana ääni- ja melunlähteenä. Ensimmäinen apukysymys on rajattu, jotta tutkimuksessa tulisi huomioitua roottorilapojen lisäksi myös muut äänilähteinä toimivat helikopterin osakokonaisuudet. Toinen apukysymys on rajattu ainoastaan roottorilapojen aiheuttaman värähtelyn tarkasteluun. Vastaamalla toiseen apukysymykseen saadaan selville roottorilapojen aiheuttamat äänekset ja niiden voimakkuudet. Kolmannella apukysymyksellä selvitetään mitatun värähtelyn muutoksia ja helikopterihallin rakenteiden vaikutusta värähtelyyn. Neljännellä apukysymyksellä tarkastellaan mitatun värähtelyn mahdollisia vaikutuksia työsuojeluun. Mittausdatan tulkinta apukysymysten avulla muodostaa selkeän kuvan NH90:n aiheuttamasta värähtelystä ja sen muutoksista huomioiden myös sen mahdolliset vaikutukset ihmiseen. Lisäksi apukysymyksillä luodaan selkeät rajaukset tutkimusaineiston tarkasteluun.

1.3. Tutkimuksen rakenne

Tutkimuksen rakenne on johdettu maanpuolustuskorkeakoulun sotatekniikan laitoksen tutkimuksen tyyppirakenteen mukaisesta rakenteesta. Tutkimus sisältää johdannon, kolme tutkimuskappaletta ja johtopäätökset (kuva 1).



Kuva 1. Maanpuolustuskorkeakoulun sotatekniikan laitoksen tutkimuksen tyyppirakenteen mukainen rakenne tämän tutkimuksen näkökulmasta

Osa 1, Johdantoluku:

Johdantoluvussa käsitellään tutkimuksen taustat ja esitellään tutkimuskysymykset. Johdantolukuun sisältyy myös kuvaus tutkimuksen rakenteesta ja käytetyistä tutkimusmenetelmistä, validiustarkastelu sekä lähdekritiikki ja rajaukset.

Osa 2, Ensimmäinen sisältöluke: Ääni ja melu

Tutkimuksen ensimmäisessä varsinaisessa sisältöluvussa käsitellään mitattavan ilmiön, äänen fysikaaliset perusominaisuudet ja mitattavien suureiden tekniset määritelmät. Sisältöluvussa käsitellään myös akustiikan käsitteistöä ja akustiikan vaikutusta tutkimustuloksiin sekä äänen ja melun vaikutusta ihmiseen. Ensimmäisen sisältöluvun tarkoituksena on havainnollistaa ääni mitattuna ja koettuna ilmiönä sekä vakioita tutkimustulosten tulkinnan kannalta olennaisimmat suureet ja käsitteet.

Osa 3, Toinen sisältöluke: Mittaaminen

Toisessa sisältöluvussa esitellään tutkimuksen empiiriset mittaussuomenetelmät, kuvataan mittaussuomenjärjestelyt sekä otetaan kantaa mittaussuomenepävarmuuksiin. Sisältöluvun päätavoitteena on muodostaa tutkimuksen empiirinen mittaussuomenosuus ja kuvata se mahdollisimman tarkasti reliaabeliuden saavuttamiseksi. Lisäksi luvussa kuvataan mitattava kohde ja mittaussuomenympäristö sekä analysoidaan mittaussuomenympäristön akustiset ominaisuudet tutkimuksen kannalta oleellisessa laajuudessa. Sisältöluvut muodostavat tutkimuksen teoreettisen osuuden.

Osa 4: Tulokset

Tutkimuksen neljännessä osassa esitellään ja analysoidaan mitatut tulokset tutkimuksen rajausten ja tutkimuskysymysten mukaisesti.

Osa 5: Johtopäätökset

Viidennessä osassa muodostetaan tutkimuksen johtopäätökset teorian ja tulosten pohjalta. Johtopäätöksissä vastataan tutkimuskysymyksiin ja otetaan kantaa jatkotutkimuksen tarpeellisuuteen.

1.4. Tutkimusmenetelmät ja lähdekritiikki

Tutkimusongelma pyrittiin ratkaisemaan käyttämällä useampaa tutkimusmenetelmää, eli metodista triangulaatiota. Lisäksi tutkimuksen empiirisen aineiston keräämiseen osallistui useampi henkilö, jolloin käytettävä menetelmä voidaan määritellä tutkijatriangulaatioksi. [25, s. 215] Tutkimuksen teoriaosuus muodostettiin aiheeseen liittyvän kirjallisuuden avulla kirjallisuustutkimuksen menetelmällä. Menetelmänä kirjallisuustutkimus voidaan luokitella eri luokkiin. Yksi näistä luokista on kirjallisuusselvitys, jota hyödynnettiin tämän tutkimuksen johdanto- ja sisältöluvuissa. Kirjallisuusselvitystä luonnehditaan luettavaksi esitykseksi työn kannalta olennaisen asian osalta. [17, s. 42] Tutkimuksen teoriaosuuden lähdeaineistona käytettiin laajalti standardeja, käsikirjoja ja tutkimusraportteja, jotka Eero Valkolan mukaan [17, s. 45] ovat tyyppillisiä tekniikan kirjallisuusselvityksen lähteitä. Maanpuolustuskorkeakoulun [17] hyvän tieteellisen käytännön määritelmän mukaan lähdeaineiston tulisi olla vähintään tutkimuksen tasoista, joten alemman tason lähdemateriaaliin on viitattu harkiten ja huomioiden tutkimuksen empiirisen luonteen. Tutkimuksessa käsiteltävät äänen fysikaaliset ilmiöt ovat yleisesti hyväksytyjä, matemaattisesti todistettuja ilmiöitä, joten ilmiöiden alkuperäistutkimukseen viittamista ei nähty tarpeelliseksi. Tutkimuksen teorialukujen lähdemateriaali koostuu laajalti äänen, akustiikkaan, meluun ja mittaamiseen liittyvästä vertaisarvioidusta oppikirjallisuudesta, viranomaisraporteista sekä laitevalmistajien dokumenteista, joita voidaan kokonaisuudessaan pitää luotettavina.

Tutkimusongelmaan pyrittiin kirjallisuusselvityksen lisäksi löytämään ratkaisu mitattujen arvojen avulla, joten toiseksi tutkimusmenetelmäksi valikoitui mittaaminen. Tutkimuksen validiteetin [25, s. 213] kannalta mittaaminen on ainoa tutkimusmenetelmä, jolla saatiin käyttökelpoiset tulokset tukemaan vallitsevan tutkimusongelman ratkaisua. Tutkimuksen johtopäätöksiin vaadittava tiedonsaanti oli siis laajalti mittausten, eli kvantitatiivisen tiedon varassa. Pekka Tuovinen on artikkelissaan [17, s. 112] luokitellut mittaukset ja mittalaitteiden käytön kolmeen luokkaan:

- Prosessien ja toimintojen seuranta
- Prosessien ja toimintojen säätö
- Kokeellinen tutkimus.

Näistä kolmesta luokasta tutkimukseen soveltui parhaiten prosessien ja toimintojen seuranta. Prosessien ja toimintojen seurannalle ja samalla tälle tutkimukselle oli tyypillistä, että mittalaitteella mitataan oleellisesti jotakin suuretta. [17, s. 112] Tämän tutkimuksen osalta suureet olivat mitattu äänenpainetaso desibeleinä (dB) ja sen muutokset taajuusjakaumassa (Hz).

Toinen tutkimusmenetelmä oli siis määrällinen eli kvantitatiivinen. Määrällisen tutkimusmenetelmän luonnehditaan antavan vastauksia kysymyksiin *Kuinka paljon?* ja *Miten usein?* [26, s. 13]. Edellä mainitut kysymykset ovatkin olennaisessa roolissa mittaustulosten analysoinnissa.

Tutkimus on laadittu ja sen tieteellisyys on perusteltu upseerikoulutuksen tieteellisyyden arvioinnissa käytettyjen Piercen kriteerien [17, s. 7] kautta, jotka ovat:

1. Kriittisyys
2. Objektiivisyys
3. Itsensä korjaavuus
4. Julkisuus
5. Toistettavuus.

Tutkimuksessa ensimmäinen kriteeri täyttyy mittausepävarmuuksien ja lähteiden kriittisenä tarkasteluna. Tutkimuksen objektiivisuus säilytetään ohjaamis- ja seminaarikäytännöillä. Tällä tavoin mahdolliset tutkijan omakohtaiset mielipiteet ja assosiaatiot rajautuvat tutkimuksen ulkopuolelle. Itsensä korjaavuus ja samalla tutkimuksen toistettavuus toteutetaan mahdollisimman tarkalla mittausjärjestelyiden ja mittalaitteiden käytön dokumentoinnilla, jolloin mittaukset on mahdollista uusida samoilla järjestelyillä. Mittauksista ei laadittu liitteeksi erillistä mittauspöytäkirjaa, sillä mittausten toistettavuuden osalta oleellinen tieto on dokumentoitu tutkimuksen toiseen sisältöluukuun.

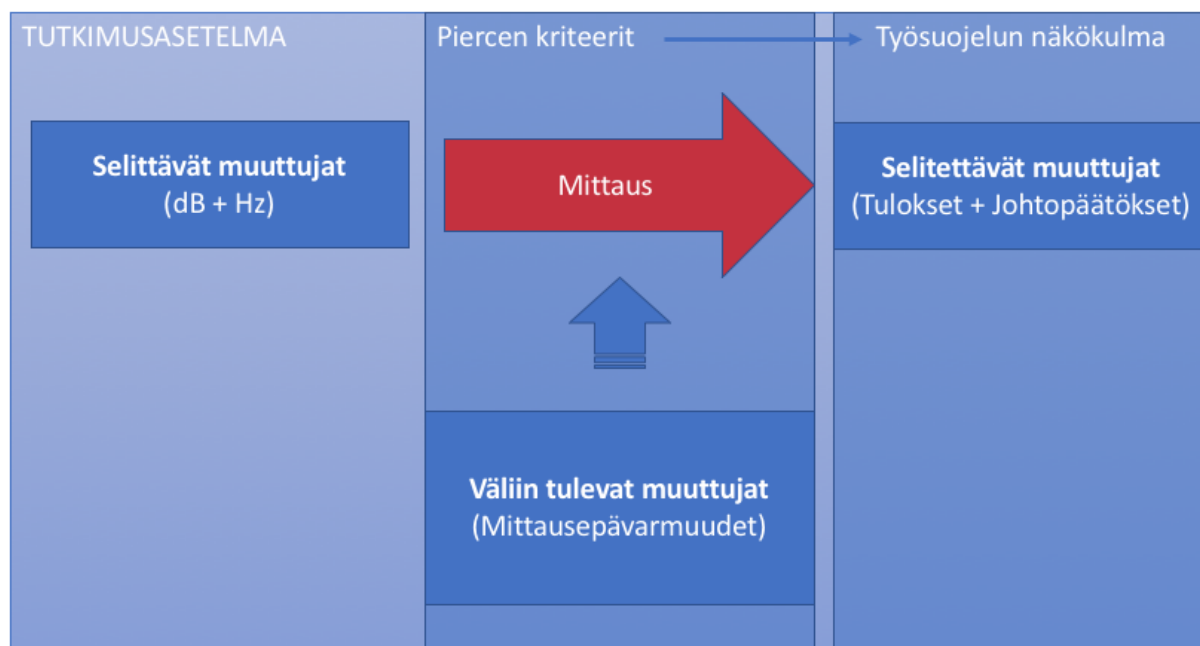
Tutkimuksen rakenteen ja teorialukujen tavoitteena on mahdollistaa tutkimustulosten oikea ja yhtenäinen tulkinta ilman aikaisempaa perehtyneisyyttä alan kirjallisuuteen. Tutkimus on laadittu sisällöltään julkiseksi. Tästä syystä tutkimuksessa ei esiinny yksityiskohtaisia kuvauksia puolustusvoimien tiloista tai kaluston suorituskyvyistä. Helikopterista mitattu äänisignaali on mitattu kaupallisilla mittausvälineillä, joten vastaavanlainen mittausdata on kerättävissä muun muassa lentonäytöksistä. Tällä tavoin tutkimuksen aineisto ei muodosta turvaluokiteltua sisältöä.

Tutkimusongelman ratkaisu muodostuu mittausdatan kautta, joka perustelee maltillisen lähdeaineistomäärän. Ääneen ja sen ilmiöihin liittyvä teoria on koostettu ammattilaiskirjallisuudesta varsinaisen tieteellisen tutkimuksen sijaan. Lähteinä käytetyn ammattilaiskirjallisuuden laatijat ovat olleet lähes poikkeuksetta korkeassa akateemisessa asemassa tai yliopiston opetustehtävissä. Meluun ja mittaamiseen liittyvä tutkimuksen teoria on koottu hyödyntämällä ammattilaiskirjallisuutta sekä kansallisen viranomaisen virallisia raportteja ja ohjeistuksia. Viranomaisraportit koostuvat kansallisen ministeriötason ja kansallisten tutkimusinstituutioiden, kuten Teknologian tutkimuskeskuksen (VTT):n laatimista raporteista. Raportit ovat julkisia ja luettavissa internetistä. Tutkimuksen lähteinä ei ole käytetty vahvasti retorisia tai tieteellisen yhteisön kyseenalaistamia lähteitä. Näin ollen lähdeaineistoa voidaan kokonaisuudessaan pitää luotettava.

1.5. Työn tutkimusasetelma, rajaukset ja aikaisempi tutkimus

Tässä tutkimuksessa empiirisen tiedon kerääminen ja analysointi on toteutettu tutkimusasetelman (kuva 2) avulla. Tutkimusasetelman tarkasteltavia muuttujaryhmiä ovat äänenpainetaso (dB) ja sen muutokset taajuusalueella (Hz). Mittaustulosten luotettavuuteen voidaan olettaa vaikuttavan mittausjärjestelyistä, säästä, mittalaitteista ja muista ulkopuolisista tekijöistä aiheutuvat mittausepävarmuudet.

Muuttujia ja niiden välistä vuorovaikutusta havainnoidaan tutkimukseen soveltuvalle mittauskalustolla. Mittausten tulokset analysoidaan jälkikäteen erillisillä tietokoneohjelmilla. Numeerinen mittausdata taulukoidaan graafiseen esitysmuotoon tulkinnan helpottamiseksi. Mittausdatan ja teoriaosuuksien avulla muodostetaan tutkimuksen johtopäätökset. Johtopäätökset muodostuvat värähtelyilmiön objektiivisen tarkastelun ja työsuojellisen tarkastelun näkökulmasta.



Kuva 2. Tutkimusasetelma

Tutkimus rajattiin käsittelemään yhden helikopterin aikaansaamaa värähtelyä. Helikopterihallissa olevien mittauspisteiden määrä rajattiin kolmeen eri sijaintiin. Mittauspisteiden määrä ja sijoittelu perustuivat henkilöstön yleisimpiin työskentelyalueisiin. Mittaukset suoritettiin helikopterin ollessa FLIGHT-käyttöalueasetuksella. Muiden käyttöalueasetusten tarkastelu rajattiin tutkimuksen ulkopuolelle. FLIGHT-käyttöalueasetuksella helikopterin roottorilavat pyörivät 100% normaalitoiminnan kierrosnopeuksista. Mittaukset toteutettiin kahdessa eri vaiheessa helikopterin ollessa konepaikalla sekä hallin edessä rullausviivalla (kuva 19).

Tutkimuksessa oletetaan helikopterin roottorilapojen aiheuttavan voimakkaimmat muutokset staattisessa ilmanpaineessa. Roottorilapojen pyörimisestä aiheutuvan painehäiriön jaksollisuus on laskettavissa, ja täten roottorilapojen kierrosnopeudet rajaavat tarkasteltavat taajuusalueet. Laskennan perusteella merkittävimmät muutokset ilmanpaineessa oletetaan esiintyvän alle 100Hz:n taajuuksilla. Alle 100Hz:n taajuudet määritellään tutkimuksessa matalataajuusvärähtelyksi. Kierrosnopeuksien suhde taajuuteen on esitelty tarkemmin luvussa 3.2.

Mittaustuloksien osalta tutkimuksessa tarkastellaan äänen jakautumista logaritmisesti kasvaavaan 12 oktaaviin jaettuun asteikkoon, jossa jokainen oktaavi edelleen on jaettu 12 osaan. Asteikkoa kutsutaan 1/12 oktaavin asteikoksi. Äänen voimakkuuden jakautumista tarkastellaan ilman taajuuspainotusta lineaarisella suodatuksella (dBZ), lineaarisella ekvivalenttitasolla (L_{eq}). Taajuuspainotukset on esitelty tarkemmin luvussa 2.10. Mikrofonin tekniset herkkyysominaisuudet (Liite 3) rajaavat mittaustulokset taajuusalueelle 3,15-20000Hz.

Yksittäisen mittaustapahtuman ajallinen kesto rajattiin yhteen minuuttiin, sillä helikopterin käyntimelu on pääosin tasaista maakäytön aikana. Moottoreiden käynnistyksen jälkeen helikopterin roottorilavat saavuttavat vakiokierrokset, jotka pysyvät suhteellisen muuttumattomina lentotilasta riippumatta.

Tutkimuksen johtopäätökset muodostuvat osittain myös työsuojelun näkökulmasta. Työsuojelun viitekehyksessä tarkastellaan matalataajuusvärähtelyn potentiaalista meluvaikutusta. Melu on käsitteenä varsin subjektiivinen, eikä tutkimuksen lähtökohtana oleteta lentoteknisen henkilöstön kokevan helikopterin aiheuttamaa värähtelyä meluna. Työsuojelun näkökulman tarkoituksena on tarkastella mitattuja arvoja työsuojelutoimenpiteiden, meluvaikutustutkimuksen, meluraporttien kautta ja ottaa kantaa mahdollisiin työsuojelullisiin toimenpiteisiin.

Laadukas tutkimus infraäänien biologisista vaikutuksista on harvassa varsinkin äänialtistuksen pitkäaikaisvaikutusten osalta. Suomessa matalataajuusmelun terveysvaikutuksia on tutkittu tuulivoimalamelun yhteydessä ympäristöministeriön toimesta [30]. Kansallinen terveysvaikutustutkimus on kuitenkin laadittu pääosin kyselymenetelmällä. Ulkomailla infraäänien terveysvaikutuksia on tutkittu pääosin eläinkokeilla ja *in vitro*-menetelmillä. Eläinkokeilla on osoitettu infraäänien aiheuttavan biologisia muutoksia koe-eläimissä. Toisaalta mitatut muutokset esiintyivät pääosin vasta yli 100dB lyhytaikaisissa altistuksissa. Solumuutoksia tarkastelevia *in vitro*-tutkimuksia on lukumäärällisesti liian vähän muodostamaan vaikutuksista järkeviä johtopäätöksiä. Kaiken kaikkiaan aiheeseen liittyvä laadukas tutkimus on vähäistä eivätkä tutkimukset ole menetelmällisesti keskenään vertailukelpoisia. [11, s. 110]

2. ÄÄNI JA MELU

Yksi tutkimuksen rakenteellisista tavoitteista on luoda selkeä ja yksinkertainen teoriasisältö, jonka avulla lukija kykenee tulkitsemaan mittaustuloksia ja johtopäätöksiä ilman merkittävää ennakkoperehtymistä ääneen tai siihen liittyviin ilmiöihin. Tutkimuksessa tarkastellaan ääntä mitattuna sekä aistittuna ilmiönä. Tämän sisältöluvun päämääränä on jäsentää tutkimusongelmaa havainnollistamalla ääni mitattuna ja koettuna ilmiönä.

2.1. Ääni fysikaalisena ilmiönä

Ääni on molekyyli-tason edestakaista värähtelyä väliaineessa ja väliaineesta toiseen. Yleisimmin ihminen aistii äänivärähtelyt ilman kautta. Ilmakehän painava massa aiheuttaa ympärillämme ilmanpaineen, joka määritellään staattiseksi ilmanpaineeksi. Ilmanpaineen yksikkö on Pascal (Pa). Yksi Pa voidaan määritellä myös 1 Newton (N)/ m^2 . Värähtelevä kappale muodostaa painehäiriön staattisessa ilmanpaineessa jonka ihminen aistii äänenä. Mitä suuremmaksi ilmanpaineen värähtelevä muutos kasvaa, sitä äänekkäämpänä ihminen aistii painehäiriön. Heikoimmalla kuultavissa olevalla äänellä on keskimäärin $20\mu Pa$ (20 mikro-Pascal = $20 * 10^{-6} Pa$) äänenpaine, kun korvan kipukynnyksen ylittävä äänenpaine on noin $20Pa$. Säätilojen ja vuorokaudenaikojen vaihteluun liittyvällä ilmanpaineen pitkäkestoilla muutoksella ei ole äänen aistimisen kannalta käytännön merkitystä. [4]

Paineen lisäksi äänelle voidaan antaa myös tehollinen arvo. Äänen teho saadaan, kun $20\mu Pa$ ääniaalto kulkee kohtisuoraan äänen etenemissuunnassa olevan, pinta-alaltaan $1m^2$ alueen läpi. Alueen läpi kulkee tällöin $1pW$ (pico-watti = $10^{-12} W$) teho. Äänen tehosta saadaan myös äänen intensiteetti, joka tarkoittaa tehoa (pW) tietyllä pinta-alalla. Kun äänienergia kohtisuoraan etenemissuuntaansa nähden jonkin tietyn alueen, voidaan energian määrä jakaa alueen pinta-alalla. Tällöin saadaan äänen intensiteetti. Tehon esimerkin mukaisella $20\mu Pa$: n ääniaallolla ja $1m^2$ pinta-alalla intensiteetiksi äänen saadaan $1pW/m^2$. Äänen intensiteetillä on suuntaiskomponentti, joten sen avulla voidaan mitata äänen tarkka tulosuunta. [4, s. 5]

2.2. Desibeli

Audiosignaalin voimakkuuden esittämisessä käytetään desibeliasteikkoa. Asteikko on peräisin 1800-luvun puhelin- ja lennätintekniikasta. Desibel-asteikko on nimetty tiedemies ja keksijä Alexander Graham Bell:n mukaan. Työskennellessään Bell havaitsi signaalin vaimenemisen yhden mailin pituisessa puhelinkaapelissa. Tämä vaimeneminen nimettiin myöhemmin yhden Bellin (B) suuruiseksi muutokseksi. Mittaus- ja materiaalitekniikan kehittyessä 1900-luvun alussa, alkuperäinen Bellin asteikko osoittautui liian suureksi joten suuresta otettiin käyttöön sen kymmenesosa, eli desibeli (dB). [16, s. 24] Bellin asteikkoa tulkitaan ajoittain virheellisesti, kun suureellisia käsitteitä käsitellään logaritmisella asteikolla.

Desibeliasteikko soveltuu äänenvoimakkuuksien esittämiseen, sillä ihmisen kuuloaisti on keskimäärin logaritminen. Tämä tarkoittaa sitä, että ihminen aistii äänenvoimakkuuden ja äänen taajuuden suhteelliset muutokset logaritmisesti kasvavina. Ihmiskorva aistii äänenpaineen kymmenkertaistumisen aina samanlaisena muutoksena. [4, s. 39] Varsinainen desibel-yksikkö ei itsessään kuvaa mitään yksittäistä fyysistä suuretta, vaan esittää matemaattisesti voimakkuuden suhteellisen muutoksen kahden tiedossa olevan arvon välillä. Äänenvoimakkuuden mittauksissa mittalaitteet esittävät desibeliarvoja, jotka on usein suhteutettu ihmisen kuulokynnyksen $20 \mu Pa$:in ilmanpaineeseen. Äänitystekniikan mittauksissa joissa tarkastellaan kyseistä kuulokynnyksen ylittävien arvojen suhdetta, desibelien lisäksi tulokseen merkitään SPL (Sound Pressure Level) tarkennus. Kuulokynnyksen tasoa kutsutaan äänitystekniikassa myös nollassoksi. [16, s. 25] Kuulokynnykseen suhteutettujen ympäristöjen äänenpaineen suhteellista kasvua voidaan havainnollistaa allaolevalla esimerkillä:

0 dB SPL = Ihmisen kuulokynnys

20 dB SPL = Kuiskaus

40 dB SPL = Olohuone

50-60 dB SPL = Normaali keskustelu

80 dB SPL = Katuliikenne

100 dB SPL = Ohiajava juna

120-130 dB SPL = Suihkukone lähtökiidossa, Tykillä ampuminen (kipuraja)

140 dB SPL = Välittömän kuulovaurion vaara. [16, s. 25]

Äänenvoimakkuus desibeliasteikolla voidaan määritellä kaavalla:

$$\text{dB SPL} = 20 \log^{10} \frac{P}{P_0}$$

jossa:

dB SPL = haettava desibelivoimakkuus

P = mitattu äänenpaine

P_0 = äänimittauksissa käytettävä vertailutaso ($20\mu Pa$).

Kymmenen potensseihin perustuvan logaritmisen asteikon luonteesta johtuen, mitatun suureen lineaarinen arvo kasvaa aina jyrkemmin, mitä pidemmälle asteikolla edetään. Tästä syystä desibeliasteikko on erityisen hyödyllinen suurten tasoerojen kuvaamiseen pienillä luvuilla. Logaritmista desibeliasteikkoa voidaan myös havainnollistaa lineaarisesti suhteuttamalla esimerkiksi:

Suhde 1:1 = 0 dB

Suhde 2:1 = 6 dB

Suhde 100:1 = 30 dB

Suhde 1000:1 = 40 dB [16, s. 26].

Tutkimuksessa tarkastellaan yhden helikopterin aiheuttamaa ääntä, sillä äänenvoimakkuuden mittauksissa kahden tai useamman helikopterin samanaikainen käyntiääni ei aiheuttaisi äänenvoimakkuuden osalta merkittävää muutosta mittaustuloksiin. Tämä voidaan todistaa tarkastelemalla kahden epäkoherentin äänilähteen summaa kaavalla: $L_{p1} + L_{p2} = 10 * \log (10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}})$, jossa L_p = Vertailtava äänen paine (dB) [4, s. 44].

Oletetaan toisen helikopterin käyntiäänien voimakkuuden olevan mittauspisteessä $L_{p1} = 115$ dB ja toisen, mittauspisteestä etäämmällä olevan helikopterin käyntiäänien olevan $L_{p2} = 110$ dB. Arvoista saadaan tulokseksi: $10 * \log (10^{\frac{115}{10}} + 10^{\frac{110}{10}}) = 116$ dB. Tutkimuksen päämääränä on tarkastella helikopterille tyypillistä äänisignaalia, joten useamman helikopterin samanaikainen mittaaminen saattaisi vääristää tuloksia helikopterin taajuussisällön osalta. Lisäksi useamman helikopterin äänivoimakkuuden tasotarkastelu ei ole laskettujen arvojen osoittamana tutkimuksen kannalta merkityksellistä. Signaalin mittauksissa ja laskennassa on tärkeää muistaa, että desibeliasteikkoa käytetään eri tavalla mitatusta suureesta riippuen. Mitattavien suureiden laskennassa logaritmisuhteen muodostuminen riippuu siitä mitataanko tehoa vai jännitettä. Äänen voimakkuuden osalta tarkastelu rinnastetaan jännitteen laskentaan, sillä äänen tasoja käsitellään vaihtojännitteinä. [16, s. 144]

2.3. Taajuus, aallonpituus ja amplitudi

Äänen voimakkuuden lisäksi merkittävä tekijä äänen aistimisessa on sen taajuus. Ääntä, eli aaltoliikettä muodostuu, kun väliaineeseen vaikutetaan. Vaikutus saa aikaan värähtelyä, joka etenee pallomaisena aaltona pois päin vaikuttamisen kohteesta. Värähtelyn taajuus saadaan, kun tarkastellaan värähtelyn edestakaisten liikesyklien määrää yhden sekunnin aikana. Taajuuden yksikkö on Hertsi (Hz). [9, s. 26] Nimitys on annettu saksalaisen tutkijan Rudolf Herzin mukaan. [16, s. 7] Taajuus (f), eli värähtelysyklejä sekunnissa saadaan kaavasta:

$$f = \frac{1}{T} [Hz]$$

jossa:

f = Taajuus (Hz)

T = Jakson aika (s) [4, s. 2].

Mikäli signaalin taajuus on tiedossa, voidaan samasta suhteesta selvittää sen aallonpituus:

$$T = \frac{1}{f}$$

Ajanjakso T on käänteisesti verrannollinen värähtelyn taajuuteen [9, s. 27]. Aallonpituuden (λ) avulla voidaan signaalista määrittää sen fyysinen koko, jolla on oleellinen vaikutus muun muassa äänen akustisiin ominaisuuksiin.

Aallon fyysinen pituus saadaan kaavasta:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

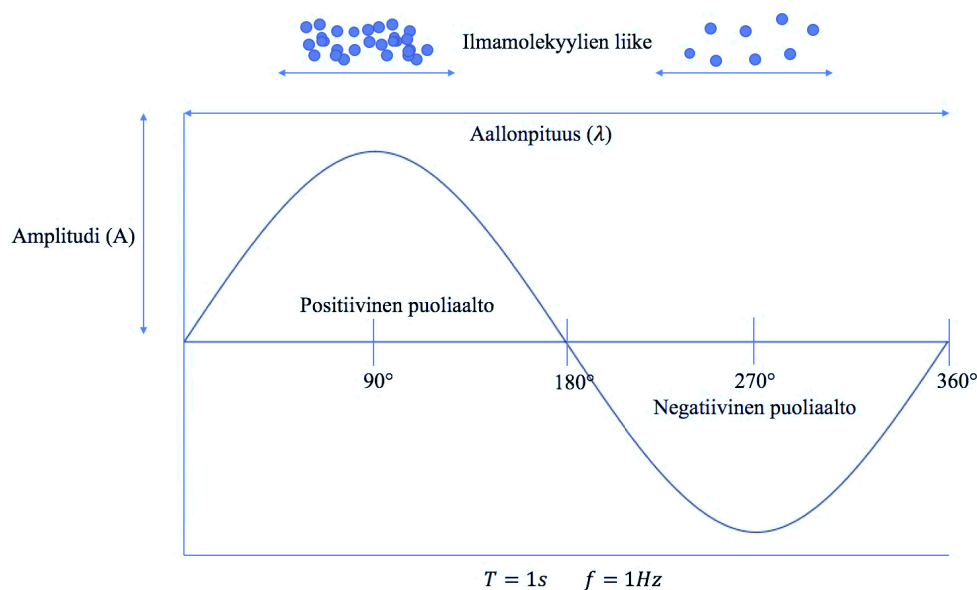
jossa:

λ = Aallonpituus [m]

c = Nopeus [m/s]

f = Taajuus [Hz] [4, s. 2].

Äänen nopeuden ollessa noin 344 m/s kuivassa ilmassa ja huoneenlämmössä (+20 C°) [16, s. 13] voidaan määrittää kuultavissa olevien 20-20000Hz:n taajuuksien muodostavan 1cm – 17m pituisia ääniaaltoja. Ääniaallon fyysinen pituus liittyy olennaisesti sen läpäisykykyyn ja heijastuvuuteen, joita käsitellään tarkemmin luvussa 2.5.



Kuva 3. Harmonisen ääniaallon peruskäsitteet

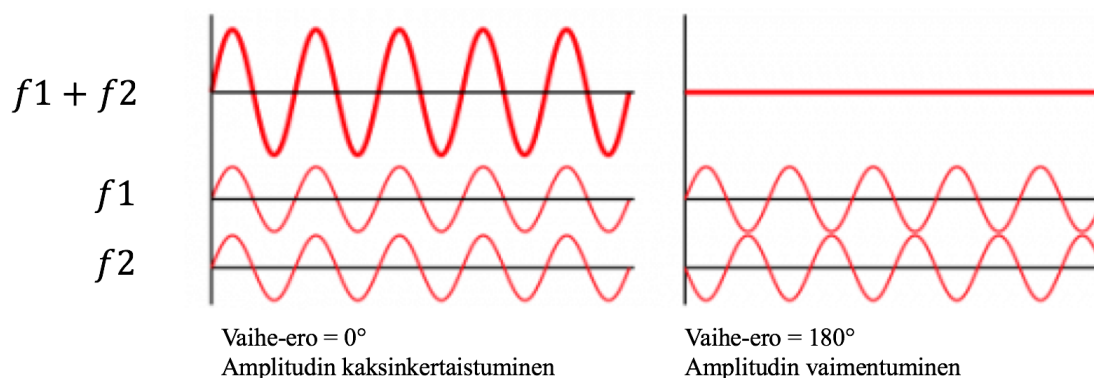
Yhden harmonisen siniaallon keskeisimmät arvot ja käsitteet voidaan esittää kuvan 3 avulla. Kuva havainnollistaa värähtelyn perussuureet sekä kokoaallon värähtelyliikkeen vaiheen. Kuva 3 havainnollistaa myös ilmanpaineen vaihtelun ilmamolekyylien liikkua vuorotellen lähemmäksi ja kauemmaksi toistaan aallon negatiivisen ja positiivisen huippuarvon mukaisesti [16, s. 6].

Värähtely on ihmiselle kuultavissa, kun staattinen ilmanpaine värähtelee taajuudella 20-20000Hz. Ihmiset aistivat pienet taajuuden muutokset vielä äänenvoimakkuuden muutoksia herkemmin. [9, s. 26] Äänispektrissä taajuuksien kasvaminen on usein esitetty suhteellisesti kasvavina suhteessa 2:1 eli oktaaveina. Taajuuden kaksinkertaistuessa signaali kasvaa yhdellä oktaavilla. Tutkimuksessa mittaustulokset on esitetty 1/12 oktaavin asteikolla, eli tarkasteltavat taajuudet on jaettu esitystavassa 12 oktaaviin. Asteikko on havainnollistettu tarkemmin luvussa 2.8.

Taajuuden ja aallonpituuden lisäksi ääniaallon keskeinen ominaisuus on sen amplitudi (A), eli taso. Äänen taso ilmaisee, kuinka kaukana ilmanpaineen keskiarvosta muutos ulottuu positiiviseen tai negatiiviseen suuntaan. Amplitudi on suoraan verrannollinen äänen voimakkuuteen, sillä mitä voimakkaammin väliaineeseen vaikutetaan, sitä suurempi on aallon amplitudi ja sitä kautta aistitun äänen voimakkuus. [16, s. 6]

2.4. Värähtelyjen yhdistyminen

Kun ääntä syntyy ympäristössämme, kyse on harvoin yksittäisistä harmonisista ääniaalloista. Siitä huolimatta monimutkaiset aaltomuodot, joita päivittäin kuulemme, muodostuvat yksinkertaisten aaltomuotojen summista. Monimutkaiset aaltomuodot muodostuvat, kun myötä- ja vastavaiheessa olevat ääniaallot vahvistavat ja vaimentavat toisiaan. Lisäksi monimutkaisuuteen vaikuttaa eri äänien eriaikainen syntyminen tai viivästyminen etenemisen aikana. Myös eri taajuudella olevien aaltomuotojen keskinäinen vaiheistus muuttuu jatkuvasti nopeudella, joka on riippuvainen aaltojen taajuuksista. [16, s. 10] Mikäli kaksi samassa vaiheessa ja samalla amplitudilla värähtelevää ääniaaltoa yhdistetään, niiden summa on sama aaltomuoto kaksinkertaisella amplitudilla (kuva 4). Mikäli samojen aaltomuotojen vaihe-eroa kasvatetaan 180° , ne kumoavat toisensa jolloin tuloksena on täysin vaimentunut aalto (kuva 4).



Kuva 4. Aaltomuotojen vaiheistus [16, s. 10]

Monimutkaisissa aaltomuodoissa näiden kahden ääri-ilmiön välillä tapahtuu lähes ääretön määrä vaiheen aiheuttamia amplitudimuutoksia. Aaltomuotojen yhdistymisiä ja niistä aiheutuvia ilmiöitä voidaan tarkastella myös helikopterin värähtelyjen yhteydessä. Helikopterin roottorilapojen aiheuttamia amplitudikorostumia tarkastellaan luvussa 4.

Kuvan 4 mukaisia puhdassävyisiä ääniaaltoja esiintyy käytännössä vain testisignaaleissa, joten lähes kaikki kuulemamme ääniaallot muodostuvat useista erilaisista aaltomuodoista täten muodostaen monimutkaisia yhdistyneitä aaltomuotoja. Matematiikassa käytetyllä jatkuvalla integraalimuunnoksella, eli Fourier-muunnoksella pystytään osoittamaan, että monimutkaiset aaltomuodot voidaan jakaa yksittäisten taajuuden sinimuotoisiin osavärähtelyihin. [16, s. 8]

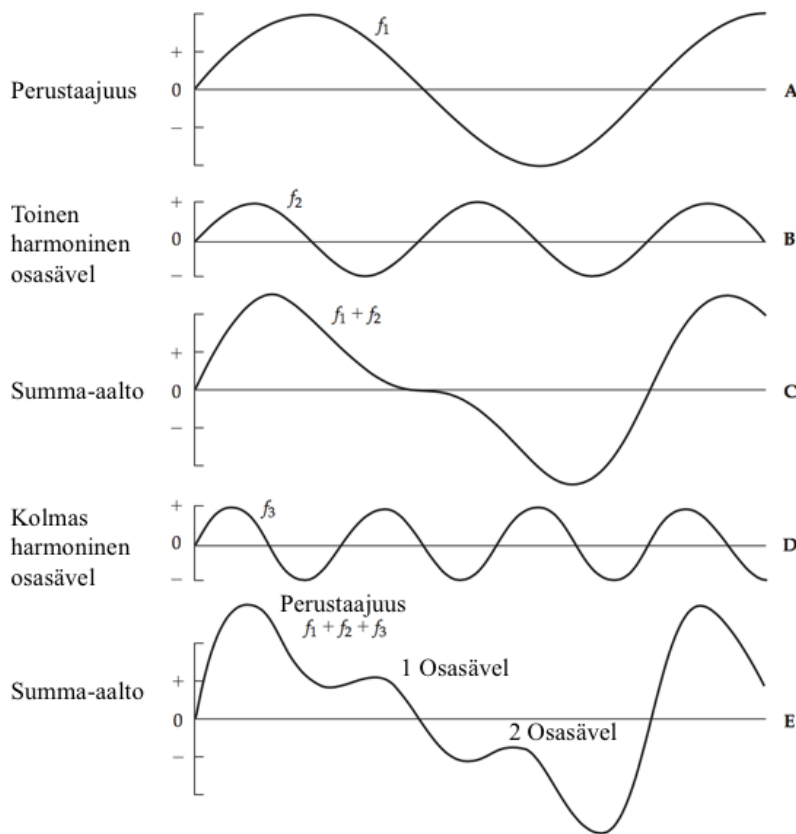
Monimutkaiset aaltomuodot rakentuvat perustaajuudesta ja harmonisista osavärähtelyistä, eli ylisävelistä. Ääniaallon perustaajuus määrittää sen sointikorkeuden, eli säveltason. Äänen perustaajuutta seuraa harmonisia osavärähtelyjä, jotka värähtelevät perustaajuutta korkeammalla taajuudella. Ihmiskorva aistii herkästi muutokset signaalin perustaajuudessa. Korkeamman taajuuden osavärähtelyjä kutsutaan ylisäveliksi. Äänen ylisävelet määrittävät kuultavan äänen sointiväriä eli äänensävyä. Luonnollisissa äänissä esiintyvät ylisävelisarjan osasävelet eli äänekset, ovat aina samoilla etäisyyksillä toisistaan. Kyseessä on siis äänilähteestä riippumaton luonnonvakio. [16, s. 8] ”Kaikki säännölliset äänet voidaan purkaa perustaajuudeksi ja harmoniseksi ylisävelisarjaksi, jossa perustaajuus on ensimmäinen harmoninen osasävel eli äännes. Kunkin sitä korkeamman, yksittäisen ääneksen taajuus voidaan laskea kertomalla perustaajuus kyseisen osasävelen järjestysluvulla seuraavasti” [16, s. 20]:

Perustaajuus = 1 Harmonisen osasävelen $f = 100\text{Hz}$

2. Harmonisen osasävelen $f = 200\text{Hz}$

3. Harmonisen osasävelen $f = 300\text{Hz}$

4. Harmonisen osasävelen $f = 400\text{Hz}$.



Kuva 5. Harmonisten osasävelten summautuminen perustaaajuuteen

Kun sinimuotoiseen aaltoon lisätään harmonisia osasäveliä, näiden modulaationa muodostuu kuvan 5 mukainen summa-aalto, josta erottuu signaalin alkuperäinen perustaaajuus ja harmonisten osasävelten muodostama huippu perustaaajuutta oktaavia korkeammalla taajuudella. Perustaaajuuksien ja niiden osasävelten muodostamat amplitudikorostumat esiintyvät selkeästi mitaustuloksissa. Perustaaajuuksien ja niiden harmonisten osasävelten avulla voidaan päätellä mikä helikopterin rakenteellinen osa aiheuttaa tietyn taajuuspiikin äänispektrissä.

Helikopterille tyypilliset rakenneratkaisut, kuten pää- ja pyrstöroottorin roottorilavat tuottavat lyhyen ajan sisällä suuria jaksottaisia muutoksia ilmanpaineeseen. Muutokset etenevät ilmassa työtilojen rakenteisiin. Äänilähteen aiheuttama muutos ilmanpaineessa voi vaihdella suuresti värähtelyn aistijan sijainnista riippuen. Äänen heijastuminen rakenteista voi muodostaa tilaan summa-aaltoja joiden ominaisuudet poikkeavat suuresti alkuperäisestä äänilähteestä.

Monimutkaiset jaksottaiset ääniaallot voivat akustisesti heijastavassa ympäristössä muodostaa kapeakaistaista, impulssimaista merkityksellistä sykintää. Merkityksellistä sykintää, eli amplitudimodulaatiota voidaan todeta, mikäli äänessä on selkeästi voimakkaampi jaksollinen vaihtelu. [30, s 11] Amplitudimodulaatiossa yksi aaltomuoto ohjaa ja muuttaa toisen aallon ominaisuuksia [16, s. 11]. Terminä amplitudimodulaatio esiintyy usein radio- ja äänisynteesitekniikassa. Luonnollisissa äänissä pienempi taajuus moduloi suurempaa taajuutta muodostaen akustisen amplitudimodulaation. Akustisen amplitudimodulaation asteen ja häiritsevyyden välillä ei tällä hetkellä ole tiedeyhteisön yleisesti hyväksymää arviointiasteikkoa. [30, s. 26]

2.5. Akustiikka, äänitila, heijastukset ja jälkikaiunta

Tässä tutkimuksessa akustiikka ja siihen liittyvät ilmiöt ovat keskeisessä roolissa. Akustiikka, eli äänioppi on äänen värähtelyjä tutkiva fysiikan ala. Tutkimuksen mittaukset suoritettiin sisätiloissa, joten akustiikan voidaan olettaa keskeisesti vaikuttavan mittaustuloksiin. Sisätiloissa ääniaallot käyttäytyvät erittäin monipuolisesti ja muutokset mitatuissa arvoissa voivat vaihdella suuresti mittauspisteestä riippuen. Akustisia ilmiöitä voidaan usein laskea ja mallintaa, jolloin tilan ominaisuuksista saadaan suuntaa antava kokonaiskuva. Tarkkoihin arvoihin päästään usein kuitenkin vain mittaamalla.

Tutkittaessa ääntä ja sen syntyä, voidaan ääntä tarkastella äänitilassa. Äänitilaan sisältyy äänilähteitä ja ääntä heijastavia pintoja. Äänilähde voi kooltaan ja muodoltaan vaihdella pistemäisestä laajaan. Pistemäisiksi äänilähteiksi voidaan määritellä lähteet, joissa äänilähde on tarkasti paikannettavissa, esimerkiksi puhuva ihminen tai laulava lintu. Laajoissa äänilähteissä äänen synnyn tarkkaa sijaintia on vaikea määrittää. Laaja äänilähde voi muodostua, kun useita pistemäisiä äänilähteitä yhdistetään, eikä yksittäisiä enää havaita erillisinä. Kun äänilähteen koko ja etäisyys ovat tiedossa, sille voidaan määritellä sen suhteellinen leveys eli ääniperspektiivi. Ääniperspektiivi on yksi tärkeimpiä tiläänentoiston tekijöitä. [3, s. 13] Tässä tutkimuksessa NH90-helikopteri määritellään laajaksi äänilähteeksi, sillä siinä yhdistyy useampi pistemäinen ja äänenvoimakkuudeltaan voimakas äänilähde. Tämän tutkimuksen olennaisimmat ääntä heijastavat pinnat ovat helikopterihallin sisäpinnat sekä hallin nosto- ovi.

Täysin vapaassa tilassa äänilähde säteilee kaikkiin suuntiin, mikäli äänilähde sen sallii. Suurin osa säteilevästä äänestä liikkuu kuulijan ohi ympäristöön. Ulkotiloissa kuultavissa olevasta äänestä erotetaan vain sen suora ääni, mikäli lähistöllä ei ole ääntä heijastavia rakenteita. Sisätiloissa ääni muodostaa suoran äänen lisäksi epäsuoria ääniä, jotka syntyvät, kun ääni heijastuu rakenteista kuulijaan. [3] Kun ääniaalto osuu kiinteään rakenteeseen, osa energiasta heijastuu, osa jatkaa etenemistä toisessa väliaineessa ja osa muuttuu kitkan ansiosta lämmöksi. Mitä korkeampi signaalin taajuus on, sitä lyhyempi on sen aallonpituus ja sitä suurempi on esteiden vaimentava tai heijastava vaikutus. Matalat taajuudet, joiden aallonpituudet ovat suuria, läpäisevät helpommin materiaalia muodostaen vähemmän kitkaa. Matalat taajuudet jatkavat myös pallomaista etenemistä esteistä huolimatta ja täten voivat kiertää esteiden taakse. Korkeat taajuudet etenevät esteessä suoraviivaisesti, joten ne ovat voimakkaasti suuntaavia. [16, s. 14]

Heijastuksetonta tilaa kutsutaan akustiikassa vapaan kentän tilaksi ja audiotekniikassa kaiuttomaksi tilaksi. Luonnollisessa ympäristössä on vähän tiloja joissa ei esiinny lainkaan äänen heijastuksia. Heijastukseton tila on kuitenkin mahdollista kokea esimerkiksi korkean tornin huipulla tai talvella lumisella pellolla. Vapaan kentän tilaa kutsutaan myös akustiikaltaan kuivaksi tilaksi. [3, s. 14] Kun ääniaalto etenee vapaassa tilassa, se vaimenee ajan myötä ilmamolekyylien aiheuttaman kitkan takia. Korkeiden taajuuksien heikkeneminen on matalia taajuuksia voimakkaampaa. Suurempi värähtelytaajuus aiheuttaa enemmän kitkaa, joka muuttaa ääniaallot lämpöenergiaksi. Ilman hidastavaa vaikutusta kutsutaan inertiksi. Luonnossa tämä inertian vaikutus ilmenee siten, että kaukana olevan äänilähteen sointiväri on tummempi mitä kauempana se on. Tummalla sointivärillä tarkoitetaan taajuussisältöä, jossa ei esiinny korkeita taajuuksia. Tätä ilmiötä kutsutaan ilma-absorptioksi. [16, s. 14] Vapaassa kentässä ääni vaimenee etäisyyden neliöön, eli mikäli etäisyyttä kaksinkertaistetaan, äänilähteen intensiteetti vaimenee neljännekseen kyseisen kaavan mukaisesti:

$$I = \frac{1}{d^2}$$

jossa:

I = äänen intensiteetti

d = etäisyys.

Tätä kutsutaan käänteisen neliön laiksi.

Tästä syystä äänenpaine (SPL) putoaa:

$$P = \frac{1}{d}$$

jossa:

P = äänen paine (SPL)

d = etäisyys.

Täten etäisyyden kaksinkertaistuessa äänenpaine puolittuu. Desibeliasteikolla äänenpaineen taso vaimenee 6dB etäisyyden kaksinkertaistuessa. [4, s. 6]

Etäisyyden lisäksi myös sää vaikuttaa vapaassa kentässä äänen etenemiseen. Ääniaallot taipuvat kylmemmän ilman suuntaan, sillä niiden on helpompi edetä tilassa, jossa molekyylien liike on vähäisempää. Normaalisti maakerrokset ovat ylläolevia ilmakerroksia lämpimämpiä, joten ääniaallot taipuvat ylöspäin kylmemmän ilman suuntaan. Kovilla pakkasilla ilmakerrokset saattavat olla maata huomattavasti lämpimämpiä ja ääniaallot taipuvat maan suuntaisesti. Tätä ilmiötä kutsutaan inversioilmiöksi. Inversioilmiöstä johtuen ääni kantaa paremmin pakkassäällä. [3, s. 15]

Kun siirrytään vapaasta kentästä kaiuntaiseen tilaan, kuulohavainnot poikkeavat suuresti toisistaan. Kaiuntaisessa tilassa kuulija pystyy sijoittamaan äänilähteen johonkin tiettyyn paikkaan. Kun kaiuntaisessa tilassa aiheutetaan impulssimainen ääni, se etenee kuulijan korviin suorana äänenä tilan koosta riippuen noin 20-200ms kuluttua äänen syntymisestä. Suoraa ääntä seuraa erillisiä heijastuksia tilan rakenteista. Näitä suorasta äänestä esiintyviä heijastuksia kutsutaan esiheijastuksiksi. Esiheijastukset esiintyvät usein alle 50ms viiveellä suorasta äänestä ja määrittävät äänilähteen ja tilan kokoa. Ääniaaltojen heijastuessa useita kertoja tilan rakenteista syntyy monikertaisten heijasteiden ja niiden viiveiden muodostama hajallinen äänikenttä eli jälkikaiunta. Jälkikaiunnan aikana esiheijastukset vaimenevat lähes eksponentiaalisesti. Viimeiset kuultavissa olevat äänet alkuperäisestä äänilähteestä ovat jälkikaiunnan hitaasti vaimenevat heijastukset. [16]

Jälkikaiuntaa, eli heijastuksen vaimenemista ilmaistaan arvolla RT_{60} . RT_{60} -arvo ilmaisee kuinka monta sekuntia kestää heijastuksen vaimeneminen 60dB:llä. Tämä tarkoittaa äänen tehon vaimenemista miljoonanteen osaan alkuperäisestä ($10\log 10^6 = 60\text{dB}$) tai äänenpaineen laskemista tuhannesosaan alkuperäisestä ($20\log 1000 = 60\text{dB}$). [8, s. 153] Jälkikaiunta-aikaa voidaan laskea käyttämällä Sabinen yhtälöä. Sabinen yhtälö perustuu Harvardin yliopiston professori Wallace Sabinen, puhtaasti empiirisesti kehitettyyn akustiikan laskentamenetelmään. Hän havaitsi, että tilan jälkikaiunta-aika on riippuvainen tilan koosta, sekä absorptiosta. Mitä suurempi on tilan materiaalien absorptiokyky, sitä lyhyempi jälkikaiunta-aika on. Samoin mitä suurempi huoneen tilavuus on, sitä pidempi on jälkikaiunta-aika, sillä ääniaallot iskevät harvemmin tilan absorboiviin materiaaleihin. [8, s. 256] Mikäli Sabinen kaavaan lisätään ilman vaimentava vaikutus, se esitetään muodossa:

$$RT_{60} = \frac{0,161V}{A + 4mV}$$

jossa:

RT_{60} = (reverberation time) = Jälkikaiunta-aika (s)

V = (volume) = Huoneen tilavuus (m^3)

A = (area) = huoneen kokonaisvaimennus

$4mV$ = ilman aiheuttama vaimennus. [16, s. 19]

Koska Sabinen kaava perustuu tilan vaimennukseen, on selvitettävä eri materiaalien vaimennuskertoimet (Taulukko 1). Sabinen määritelmän mukaan tietyn materiaalin vaimennuskertoimen on sen itseensä kuolettaman äänen suhde samankokoiseen avonaiseen ikkunaan. Avonaisen ikkunan, eli täydellisen absorboivan materiaalin vaimennuskertoimen on siis 1. Vaimennuskyvyn yksikkö on sabine (engl. Sabin). Yhden sabinen vaimennuskyky on verrannollinen yhden neliömetrin kokoisen ikkunan vaimennuskykyyn. Tästä syystä heijastavan materiaalin vaimennuskyky on aina pienempi kuin yksi sabine. Materiaalin vaimennuskyky on aina riippuvainen materiaalin osuvan signaalin taajuudesta. Tästä syystä vaimennuskertoimia esitetään taajuuden suhteen. [8, 16] Tyypilliset referenssitajuudet laskennassa ovat 500Hz, 125Hz sekä 2kHz. Mikäli tuloksessa ei ilmoiteta taajuutta, referenssitajuuden oletetaan olevan 500Hz. [8, s. 158] Vaimennuskertoimet muodostuvat, kun selvitetään materiaalin absorboiman ääni-intensiteetin (W/m^2) suhde alkuperäiseen äänen intensiteettiin. Seuraavaan taulukkoon on luetteloitu yleisimpiä rakennusmateriaaleja ja niiden vaimennuskertoimia kahdella eri taajuudella:

Taulukko 1. Esimerkki Sabinen taajuuskertoimista [16]

Materiaali	Taajuus	Vaimennuskerroin
Tiiliseinä	125Hz	0,05
	4kHz	0,05
Karkea betoni	125Hz	0,36
	4kHz	0,25
Puulattia	125Hz	0,15
	4kHz	0,07
Muovilattia	125Hz	0,03
	4kHz	0,05
Maalattu betoni	125Hz	0,01
	4kHz	0,08

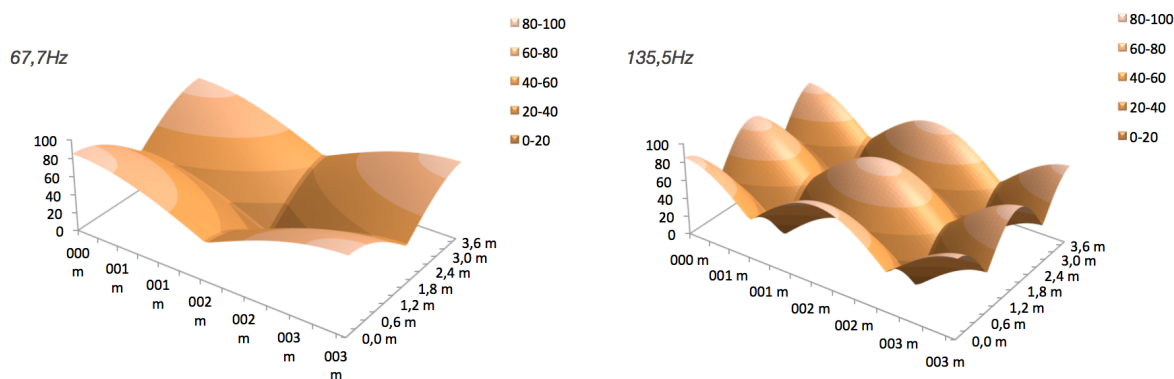
Käyttötarkoitukseltaan Sabinen yhtälö soveltuu ainoastaan tiloihin, joissa ei ole merkittävästi absorboivaa materiaalia. Yhtälö on aikoinaan johdettu olettamuksella, että ääni heijastelee tilassa, ja mikäli heijastuksia ei esiinny, kaava tuottaa virheellisen tuloksen. Sabinen kaavan tulokset ovat tarkimmillaan, kun laskennassa käytetään alle 0,25 varmuuskertoimia. Mikäli jälkikaiunta-aikoja on tarkoitus tarkastella vahvasti absorboivassa tilassa, käytetään kyseiseen käyttötarkoitukseen johdettuja yhtälöitä kuten Millington ja Eyring-Norris. [8, s. 156]

Tutkimuksen kannalta jälkikaiunta-ajan tarkastelu on olennaista, sillä RT_{60} -arvo vaikuttaa puheen tulkittavuuteen tilassa ja tilan työskentelyviihtyvyyteen. Jälkikaiunta-ajan ollessa yli yksi sekunti, puheen erottelukyky heikkenee lyhyempiin kaiunta-aikoihin verrattuna. Pidempi jälkikaiunta-aika yhdistettynä taustameluun hankaloittaa puheviestintää entisestään. [14, s. 58]

Helikopterihallin tarkemmat akustiset ominaisuudet jälkikaiunta-aikojen osalta esitellään luvussa 3.2 Mitattava äänilähde ja mittausympäristö.

2.6. Huonemoodit

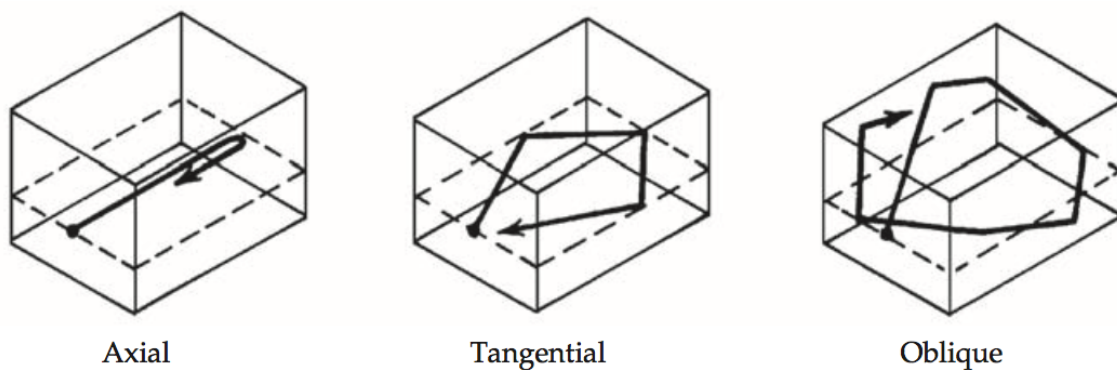
Kiinteistä rakenteista heijastuva ääni yhdistyy alkuperäiseen ääneen viiveellä. Alkuperäisestä äänestä viivästynyt heijastus on usein vaiheeltaan poikkeava. Tästä syystä suora ääni ja heijaste vaikuttavat toisiinsa vaimentavasti, vahvistavasti tai jopa kumoavat toisensa. Vaiheistuksesta aiheutuvat amplitudimuutokset ovat suurimmillaan silloin, kun äänen aallonpituus tai sen puolikas on yksinkertaisessa kokonaislukusuhteessa tilan vastakkaisen pinnan välimatkaan. Tällöin tilan taajuusvasteeseen aiheutuu suuria korostumia kyseiselle taajuudelle ja sen kokonaislukukerrannaiselle. Näitä korostumia ja vaimentumia kutsutaan huoneresonansseiksi tai huonemoodiksi. Tilassa esiintyviä paikallisia resonanssikertymiä kutsutaan myös seisoviksi aalloiksi. [16, 3]



Kuva 6. Huoneresonanssien amplitudimuutokset

Kuvassa 6 on kuvattu kahden eri taajuuden 67,7Hz ja 135,5Hz jakautuminen 10,8m² huoneeseen. Kuva 6 havainnollistaa matalan 67,7Hz:n taajuuden olevan voimakas (80-100dB) huoneen kulmissa ja lähes täysin vaimentunut (0-20dB) keskellä huonetta.

Kuvan 6 huonemoodi on moodityypiltään tangentiaalinen eli sivuava, joka on yksi kolmesta huonemoodista. Loput kaksi huonemoodia ovat aksiaali, eli vaakasuuntainen sekä oblique eli viistosuuntainen (kuva 7). Huonemoodien jaottelu perustuu moodien syntyperiaatteeseen. Aksiaalimoodissa resonanssit muodostuvat kahden saman tasoisen seinäpinnan välille, tangentiaalisessa neljän ja Obliquessa kaikkien seinäpintojen välille. [8, s. 228]



Kuva 7. Aksiaalinen, tangentiaalinen ja oblique huonemoodit [8, s. 229]

Helikopterihallien muoto ja rakenteet mahdollistavat huomattavien huonemoodien syntymisen. Tästä syystä resonansseja tarkastellaan sekä mallintamalla, että mittaustulosten avulla. Helikopterihallien tarkempi akustinen tarkastelu esitellään luvussa 3.2 Mitattava äänilähde ja mittausympäristö.

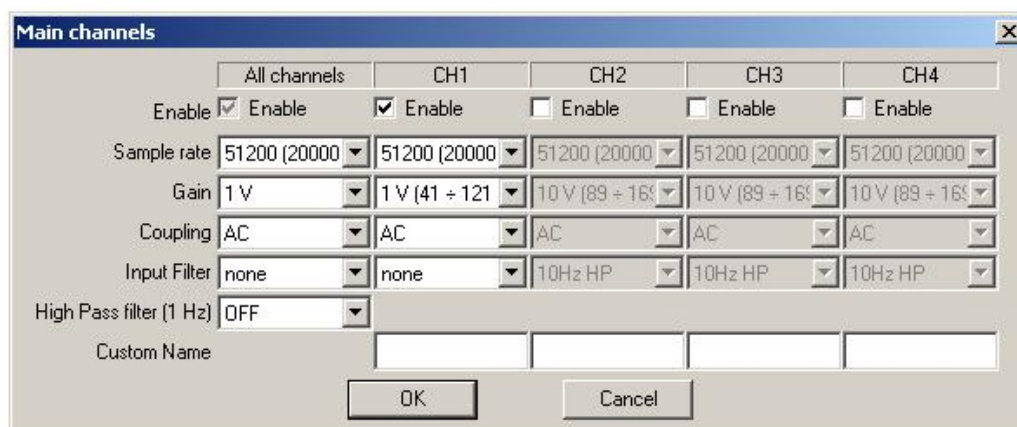
2.7. Analoginen signaali digitaalisessa ympäristössä

Kun ääntä halutaan tarkastella mitattuina arvoina, on se muunnettava digitaaliseen muotoon. Staattisen ilmanpaineen muutokset voidaan tallentaa mikrofonilla, joka muuttaa värähtelyt analogiseksi sähkösignaaliksi. Analoginen signaali voidaan muuntaa digitaaliseen muotoon vaivatompaa jälkiprosessointia varten.

Digitaalisessa muunnoksessa analogisesta jännitesignaalista otetaan suuri joukko näytteitä, jotka tallennetaan luvuksi vastaamaan näytteen suuruusluokkaa. Tätä kutsutaan näytteistämiseksi. Näytteistämällä saadaan lukusarja, joka vastaa luvusta toiseen alkuperäisen signaalin muutosta. Muutosta esittävä lukusarja muunnetaan binääreiksi, jotta dataa voidaan käsitellä tietojärjestelmissä. [16, s. 66]

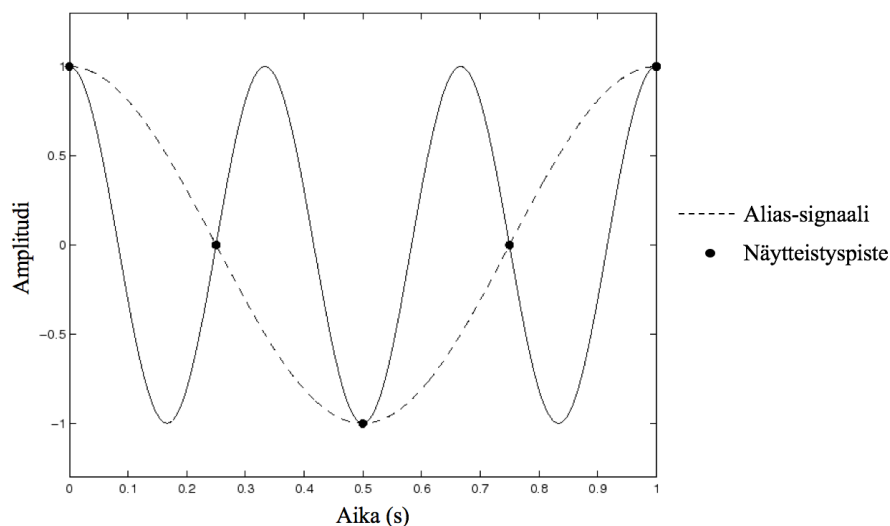
Näytteistys (engl. Sampling) on perusta kaikelle digitaaliselle audioteknikalle. Näytteistyksessä alkuperäisen signaalin amplitudista otetaan näyte tietyllä ajanhetkellä ja se tallennetaan numeeriseen muotoon. Näyte voidaan mieltää pysäytyskuvana aaltomuodosta jollain tietyllä ajanhetkellä. Näytteenottonopeutta, eli kuinka usein aaltomuodosta otetaan näyte tietyllä ajanhetkellä, kutsutaan näytetaajuudeksi. Näytetaajuus on suoraan verrannollinen signaalin tallennuslaatuun tai sen toiston luonnollisuuteen. Mikäli monimutkainen signaali halutaan tallentaa, on sen kaikki rakenneosat saatava tallennettua. [16, s. 67]

Digitaalisen audiotekniikan tärkeimpiin perusteisiin kuuluu Harry Nyquistin ja Claude Shannonin niin sanottu Nyquistin teoria, jonka mukaan sinimuotoinen värähtely voidaan tallentaa täydellisesti, kun tieto tallennetaan aaltomuodon negatiivisesta ja positiivisesta huippuarvosta. Näin ollen siniaallosta otetaan aina kaksi näytettä. Tästä johtuen näytetaajuuden on aina oltava vähintään kaksi kertaa niin korkea kuin korkein digitoitava äänen taajuus. Taajuutta, joka on puolet näytetaajuudesta, kutsutaan Nyquistin taajuudeksi. [16, s. 67]



Kuva 8. Mittausten näytteenottotaajuus

Tutkimuksen mittauksissa mikrofoniikanavan (CH1) näytteenottotaajuudeksi valikoitui tarkasteltavasta taajuudesta johtuen 51200Hz (kuva 8), jossa Nyquistin taajuus on 25600Hz. Täten mahdollistetaan 25,6kHz:n hyötykaista äänen tallennukseen. Mikäli näytteenottotaajuus on alhaisempi kuin hyötysignaali, siitä syntyy muuntimessa sen itsensä muodostama häiriöäänes. Häiriöäänesilmiötä kutsutaan laskostumiseksi (engl. Aliasing) [16, s. 68].

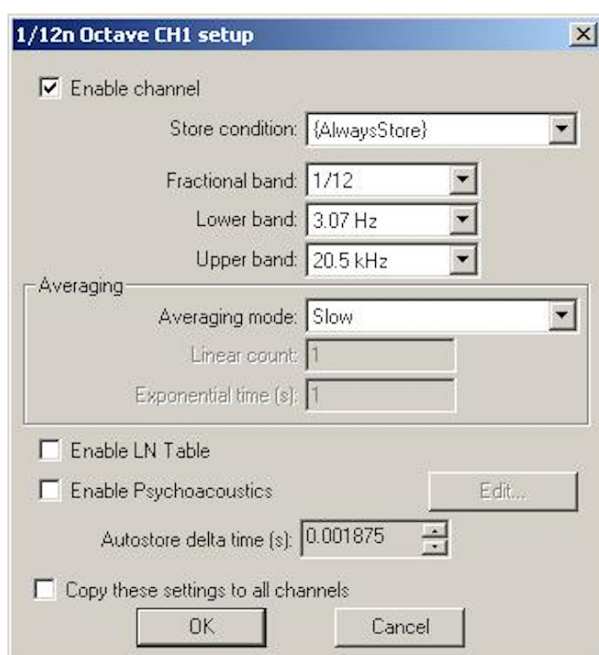


Kuva 9. Laskostumisen aiheuttama häiriöäänes

Kuva 9 havainnollistaa laskostumisen muodostavan näytteistyspisteiden kautta digitaalisen 0,5Hz:n häiriöäänneksen alkuperäisestä 3Hz:n sinisignaalista. Tutkimuksessa tarkasteltava taajuusalue on 3,15-20000Hz, jonka perusteella oletetaan riittävän näytteenottotaajuuden olevan noin 40kHz. Näytteenottotaajuutta on kuitenkin kasvatettava yli kaksinkertaiseksi Nyquistin taajuudesta, sillä laskostumisen aiheuttamat häiriöäännekset suodatetaan Alias-suodatuksella. Alias suodatuksella kaikki tallennettavan signaalin hyötykaistaa korkeammat taajuudet leikataan. Toisin sanottuna suodatus huolehtii alipäästösuodatuksen tavoin, että signaalissa ei esiinny korkeampia taajuuksia kuin näytteenottotaajuuden puolikas. Nyquistin taajuuteen verrattuna yli kaksinkertainen näytteenottotaajuus liittyy myös analogi-digitaalimuunnoksessa tapahtuvaan näytteistykseen karkeuden ehkäisyyn eli lähtösuodatukseseen. Lähtösuodatuksella varmistetaan täysin virheetön signaalin tallennus- ja toistoketju. [4] Tutkimuksen tallenteiden korkea näytteenottotaajuus mahdollistaa korkealaatuisen aineiston tämän tutkimuksen lisäksi myös jatkotutkimuksen käyttöön.

2.8. 1/12 Oktaavi

Tutkimuksessa käytetyn analysaattorin mittaustuloksia tarkasteltiin oktaaveihin jaettuina taajuuskaistoina, joista jokainen oktaavi jaettiin 12 eri taajuuskaistaan. Kun äänentasausta tarkastellaan oktaaveissa, se noudattelee ihmiskuulon vakioäännekkyyssäyrästä (kuva 11) mukaista logaritmisesti kasvavaa suhdetta. Mitä pienempiin osiin yksittäinen oktaavi jaetaan, sitä suurempi tarkasteluresoluutio saavutetaan. Suurempi tarkasteluresoluutio on tarpeellinen etenkin matalien taajuuksien tarkastelussa, jossa yksittäiset amplitudikorostumat jakautuvat laajasti oktaavin alueelle. Oktaavilla tarkoitetaan edellisen taajuuden kaksinkertaistumista ja näin ollen kaistanleveydet määräytyvät tarkasteltavan taajuuskaistan alimman taajuuden mukaan [16, s. 9].



Kuva 10. Näyttökuva SAMURAI-ohjelmiston 1/12 oktaavin asetusarvoista

Tutkimuksessa tarkasteltava taajuuskaista asetettiin kuvan 10 mukaisesti 3,07Hz:n ja 20,5kHz:n välille. Analysaattorilla oli mahdollista tarkastella mitattua signaalia myös nopealla Fourier-muunnoksella, eli FFT-menetelmällä, joka jakaa koko tarkasteltavan taajuuskaistan noin 12000 eri taajuuden amplitudiarvoon. 1/12 oktaavin tarkastelu soveltuu FFT-menetelmää paremmin matalien taajuuksien tarkasteluun, sillä FFT-menetelmällä tarkasteluresoluutio on lineaarinen suhteessa taajuuteen ja näin ollen 1/12 oktaavissa logaritmisesti kasvavalla asteikolla saadaan useampi näyte matalista taajuuksista.

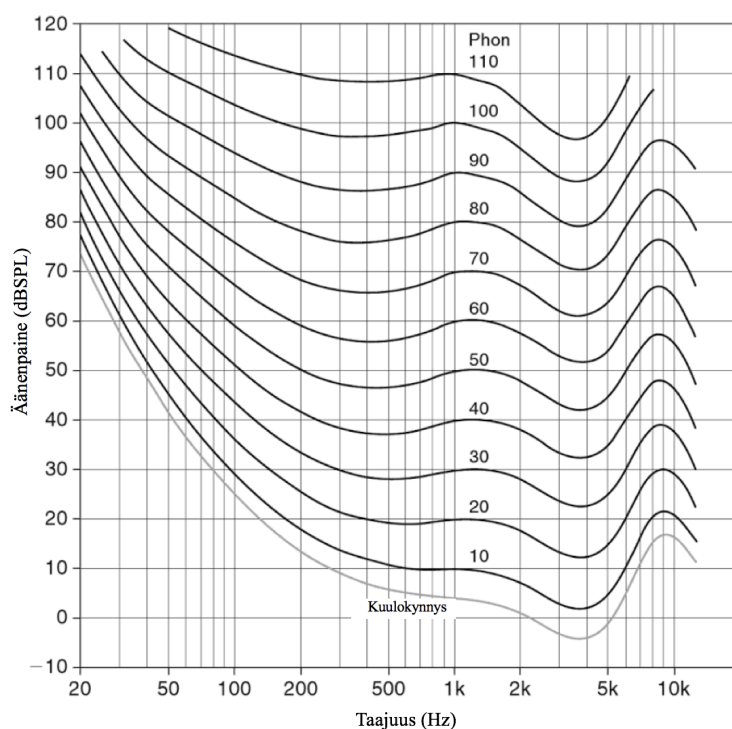
2.9. Kuuloaisti ja äänen vaikutus ihmiseen

Ihminen aistii äänet ensisijaisesti kuuloaistin avulla. Kuuloaistilla on aivojen ja autonomisen hermoston kautta yhteys useisiin ihmisen elinjärjestelmiin [14, s. 20]. Äänilähteen aiheuttama muutos staattisessa ilmanpaineessa etenee väliaineessa ihmisen korvakäytävään ja sitä kautta tärykalvolle korvanlehdien vahvistaessa signaalia noin 5dB. Tärykalvon jälkeen ihmisen välikorvan kuuloluut välittävät värähtelyn sisäkorvassa olevaan nesteeseen. Sisäkorvassa sijaitsevat ihmisen tasapainoelin ja varsinainen kuuloelin, eli simpukka. Simpukassa sijaitsevat aistin-solut muuttavat värähtelyt lopulta hermoimpulsseiksi. [27, s. 16]

Muutokset ihmisen kuuloaistiin tapahtuvat ensisijaisesti ihmisen kuuloelimen ulommissa karvasoluissa. Karvasolut adaptoituvat herkästi vallitsevaan äänitasoon ja jo lyhytaikainen kohtalainen ääni-impulssi vaikuttaa soluihin. Muutokset palautuvat usein muutamissa minuuteissa, mutta pitkäaikainen ja voimakas melu- tai äänialtistus voi aiheuttaa jopa vuorokausien palautumisaikoja. Solutason muutokset saattavat jäädä pysyviksi, mikäli solutasolla tapahtuvat muutokset ovat pitkäkestoisia ja voimakkaita. Ihmiskorvan kuuloelin ei kykene korjaamaan tai uusimaan tuhoutuneita karvasoluja ja tästä johtuen muutokset kuulon herkkyydessä voivat olla pysyviä. [14, s. 37]

Melun aistimisessa tulee kuulon lisäksi huomioida myös kuulohavaintojen vaikutukset muihin aisteihin. Pelkän kuulemisen sijasta kyse on havainnoimisesta. Havainnoinnissa kaikki ihmisen aistit toimivat yhteistoiminnassa välittäen ärsykeitä aivojen havaintomekanismeille, jotka yrittävät tulkita niitä. Aivot jäsentelevät vastaanotettuja ärsykeitä valikoiden ja yhdistellen eri aistitietoja. Havaitseminen ja havainnointi ovat siis aktiivista ja tavoitteellista toimintaa. Tästä syystä ihminen on havainnoissaan valikoiva, ja havainnon kohteet vaihtelevat sen mukaan mitkä kohteet ihminen kokee tärkeäksi. Kokonaishavainnointi on siis vahvasti subjektiivista, eikä sitä voi välittää sellaisenaan toiselle. Ihmisen aivot priorisoivat aistihavaintoja, mikäli havainnoimiseen käytetään useita aisteja yhtäaikaaisesti. Ihminen luottaa usein kuuloaistia enemmän näköaistiin, sillä ihminen vastaanottaa noin neljä viidesosaa kaikesta saamastaan informaatiosta näköaistinsa kautta. Ihminen mieltää esimerkiksi televisiossa puhuvan henkilön äänen kuuluvan suoraan puhujan kohdalta, vaikka oikeasti varsinainen ääni tulee television vierestä tulevista kaiuttimista. [3, s. 22]

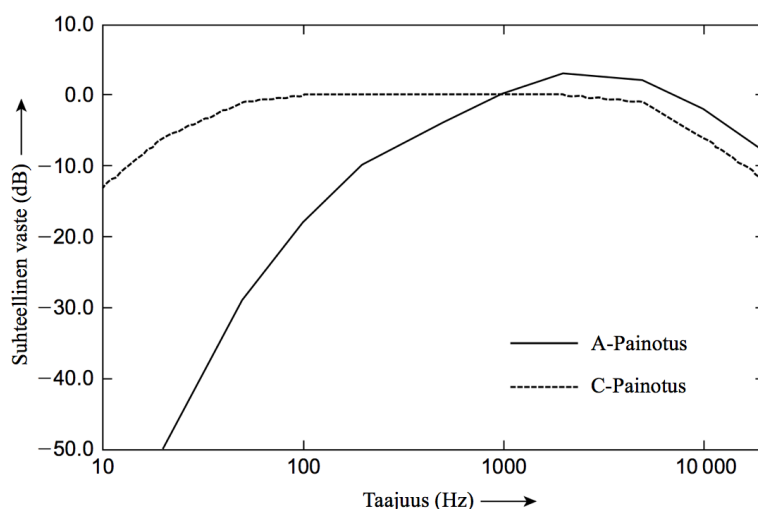
”Kuulon erityisen hyvä akustispiraisten äänten erottelukyky perustuu kahteen seikkaan: luonnollisten äänten audiotajuuksien keskiarvojakautumiseen ja kuulon taajuusvasteen epätasaisuuteen eri äänenvoimakkuuksilla.” [16, s. 27] Audiotajuuksien keskiarvojakautumisella tarkoitetaan signaalin äänienergian jakautumista eri taajuuksille. Tätä kutsutaan taajuusjakauksi eli spektriksi. Luonnollisten vahvistamattomien taajuuksien spektrijakauma 20Hz-20kHz:n alueella on usein normaalijakautunut 1kHz:n alueelle, jossa kaikkein ylimmät ja alimmat taajuudet vaimenevat noin 15-20dB. [16, s. 28] Voimakkuuden lisäksi kuuloaistin herkkyys vaihtelee suuresti eri taajuuksilla. Ihmiskorva on herkimmillään 2-4kHz:n taajuusalueella johon korvakäytävän muodosta. Tämä taajuusriippuvuus ei ole vakio, vaan se vaihtelee äänen voimakkuuden suhteen. [4, s. 47] Käänteisesti tämä tarkoittaa sitä, että ihmiskorvan kuulokynnys vaihtelee suuresti taajuuden, eli äänenkorkeuden suhteen. Ihmiskorvan kuulokynnystä taajuuden funktiona ja kuulon taajuusvastetta eri äänenvoimakkuuksilla voidaan esittää ISO 3746-standardin mukaisella vakioäänekkyyskäyrästä (kuva 11).



Kuva 11. ISO-standardin 3746 mukainen vakioäänekkyyskäyrästä [12]

Käyrästä voidaan erottaa korvakäytävän muodon aiheuttavan selkeän herkkyysalueen 2-4kHz:n alueella. Lisäksi käyrästä havainnollistaa matalien taajuuksien tarvitsevan huomattavasti enemmän energiaa ollakseen kuultavissa. Käyrästä esiintyvä PHON-asteikko on akustiikan äänekkyuden subjektiivisen voimakkuusvaikutelman mittayksikkö, joka on suoraan verrannollinen äänenpaineeseen 1kHz:n taajuudella [4, s. 43].

Melun ja äänen mittauksissa ihmiskorvan ominaisuudet huomioidaan käyttämällä taajuuspainotuksia. Taajuuspainotetuissa tuloksissa äänenvoimakkuus (dB) suhteutetaan ihmiskorvan herkkyYTEEN. Eri taajuuspainotuksia on käytössä useita, mutta tyypillisimmin niistä käytetään painotuksia A (dB_a) ja C (dB_c). A-painotuksessa ihmiskorvan herkkyys on huomioitu suodattamalla matalia taajuuksia pois logaritmisesti noin 1000Hz alueelta alkaen. Yhtäläisyyden A-painotukseen voi löytää vakioäänekkyyskäyräSTÖN mukaisesta herkkyYDEN alenemisesta 1000Hz:stä alaspäin. Toinen usein käytetty C-painotus on lähempänä äänen absoluuttista äänenpainetasoa huomioiden laajalti myös ihmiskorvan kuulemat matalat taajuudet. [6, s. 95]



Kuva 12. Taajuuspainotukset [6, s. 95]

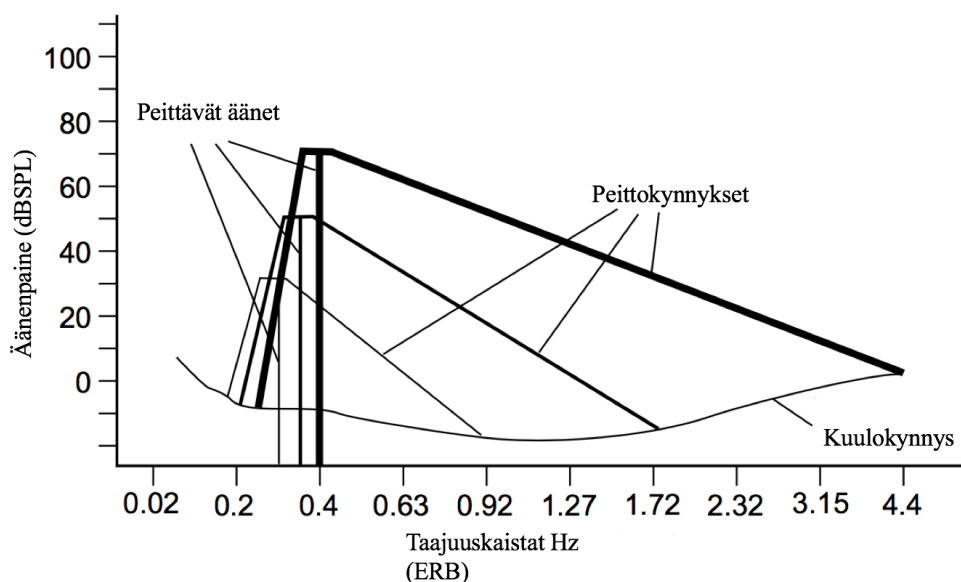
Tämän tutkimuksen mittaukset on suoritettu ja mittaustulokset esitelty ilman taajuuspainotusta, jota usein kutsutaan Z-painotukseksi tai lineaariseksi suodatukseksi. Mikäli äänen mittauksissa halutaan tallentaa matalia ja erittäin matalia taajuuksia, tulee tällöin käyttää painottamatonta mittausta. Tutkimustuloksien tulkinnessa ja vertailussa on huomioitava, että meluun liittyvät turvallisuussäädökset ovat lähes poikkeuksetta laadittu taajuuspainotettujen mittausten pohjalta.

2.10. Kriittiset kaistat ja peittoilmiö

Ihmiskorvan kyky erotella vierekkäiset taajuudet toisistaan vaihtelee suuresti taajuusalueesta riippuen. Kuulon taajuuserottelukyky riippuu taajuuksien sijainnista spektrissä, sekä siitä soivatko taajuudet yhtäaikaisesti. Ihminen kykenee verrattain helposti erottelemaan erikseen soivat taajuudet, joka tosin sekin on kuultavan signaalin taajuudesta riippuvainen. Matalilla värähtelytaajuuksilla ihminen pystyy selkeästi erottamaan jopa muutamien hertsien eroja, mutta mitä korkeammalle spektrissä siirrytään, sitä haastavammaksi erojen havaitseminen muuttuu. Kahden äänen soidessa samaan aikaan ihmisaivot käsittelevät ääneksiä yhtenä kokonaisuutena. Tästä syystä ihminen ei pysty kuulemaan yhtä hiljaista äänestä, mikäli samalla taajuuskaistalla soi samanaikaisesti yksi voimakkaampi äänes. Tämä rajoite on puhtaasti fyysinen ja liittyy korvan taajuuksia erottelevan kuuloelimen ominaisuuksiin. [3, s. 31]

Kuulon taajuuserotteluun perustuvia peittokaistoja kutsutaan kriittisiksi kaistoiksi. Kriittiset kaistat ovat keskenään eri suuruisia ja jakautuvat eri tavalla taajuusalueille. Matalilla 20-400Hz:n taajuuksilla kriittiset kaistat ovat leveydeltään 100Hz ja kasvavat korkeammilla taajuuksilla noin 5kHz:n levyisiksi. Kolmasosa kuulon kriittisistä kaistoista sijaitsevat spektrissä 5kHz:n alapuolella, mikä havainnollistaa ihmisen kuulon vastaanottavan suurimman osan informaatiosta matalilta taajuuksilta, sekä keskiäänialueelta. [16, s. 31]

Tietyssä spektrin kohdassa esiintyvä ääni pystyy sen voimakkuudesta riippuen peittämään samaan aikaan ja vierekkäisillä taajuuksilla esiintyviä ääniä (kuva 13). Tässä peittoilmiöksi kutsutussa ilmiössä voimakkaampi ääni pystyy peittämään myös ne äänet, jotka esiintyvät äänekkyyskäyrässä korvan herkemällä taajuudella. Voimakkaampi ääni muodostaa spektriin vaikutusalueen, jota kutsutaan peittokynnykseksi. Mikäli voimakkaampi peittävä ääni ja matala-amplitudisempi ääni soivat samalla kriittisellä kaistalla, heikompi ääni jää kokonaan kuulematta. Peittoilmiöstä johtuen myös kaksi taajuudeltaan eri ääntä kuullaan usein yhtenä äänenä, mikäli ne ovat spektrissä lähellä toisiaan. [4, s. 53]



Kuva 13. Peittoilmiö [6, s. 263]

Tutkimuksen kannalta peittoilmiön käsittely on perusteltavissa, kun tarkastellaan helikopterimelun aiheuttamia taajuuspiikkejä ja verrataan niiden kykyä peittää muita tarpeellisia ääniä kuten puhetta. Helikopterin aiheuttamien taajuuspiikkien eli äänesten tarkastelu tapahtuu pääluvussa 4: Mittaustulokset.

2.11. Melu

Melu on merkittävin ja yksi tärkeimmistä ympäristön laatua ja viihtyisyyttä vähentävistä ympäristötekijöistä. Melua esiintyy kaikkina vuorokaudenaikoina lähes kaikkialla ihmisen luomissa toimintaympäristöissä. Melun määrä ja sen aiheuttamat haittavaikutukset ovat lisääntyneet kaupungistumisen ja liikennemäärien kasvamisen takia. Nykyaikaisessa elinympäristössä melun laatu ja voimakkuus voivat vaikuttaa haitallisesti ihmisten psyykkiseen, fyysiseen ja sosiaaliseen hyvinvointiin. [14, s. 7] Kari Pesosen laatimassa Ympäristöministeriön raportissa Ympäristöneuvos Ari Saarinen määrittelee [23] melun ihmisen terveydelle tai muulle hyvinvoinnille vahingolliseksi tai haitalliseksi ja elinympäristön laatua tai viihtyisyyttä heikentäväksi ympäristöongelmaksi. Haitallisesta melualtistuksesta aiheutuva mielikuvien ja käyttäytymisen tilastollinen vaste, eli meluvaikutus esiintyy haitallisina terveysvaikutuksina tai kielteisenä suhtautumisena melun aiheuttajaan [23, s. 5].

Ihmiset ovat jo pitkään tienneet melun aiheuttavan terveydelle haitallisia vaikutuksia, mutta kokonaisvaltainen tutkimustyö melun terveysvaikutuksista on aloitettu vasta viime vuosikymmeninä. Meluksi luokiteltavien äänien osuus ääniympäristössämme on vuosien mittaan kasvanut ja siitä johtuen myös meluvaikutuksesta aiheutuvat terveystahdit ovat lisääntyneet. Ensimmäinen melun terveysvaikutuksia tarkasteleva selvitys julkaistiin vuonna 1980 Maailman terveysjärjestön (WHO) toimesta. WHO:n selvitystä on sen jälkeen päivitetty vuonna 2000, jonka pohjalta myös Suomessa on laadittu selvitys ympäristön meluhaitoista. [14]

Suomen ympäristöministeriö määrittelee [14, s. 7] melun ääneksi, jonka ihminen kokee epämiellyttävänä tai häiritsevänä, tai joka on muulla tavoin ihmisen terveydelle vahingollista taikka hänen muulle hyvinvoinnilleen haitallista. Melu vaikuttaa ympäristön viihtyvyyteen ja viihtyvyyden pitkäaikaisella laskulla on vaikutuksia ihmisen terveyteen. Melun määrittäminen ja meluisuuden aste riippuvat subjektiivisesti aistituista kielteisistä piirteistä tai melun aiheuttamista elintoimintojen muutoksista tai kudonvaurioista. Melun fyysikaalinen kokonaismäärittely on siis mahdotonta, sillä siihen vaikuttaa ympäristön mitattujen tekijöiden lisäksi myös yksilön ja yhteisön yksilölliset ja elämykselliset tekijät. Mikäli äänellä ei olisi minkäänlaisia haittavaikutuksia, olisi melu käsitteenä absurdi eikä sitä varten olisi olemassa käsitteitä ja säädöksiä. Akustiikassa melu ulotetaan käsittelemään myös ihmisen kuuloalueen ulkopuolella esiintyviä infra- ja ultraääniä. [14, s 8]

Melun yleisin haittavaikutus on sen häiritsevyys. Häiritsevyys on havainnointiin perustuva subjektiivinen tuntemus, jonka ihminen kokee kielteisenä, epämiellyttävänä ja epätoivottuna. Mielekkäänä määritelmänä voidaan pitää ääntä joka kiinnittää ihmisen huomion tahdosta riippumatta. Äänen meluisuus ei aina ole riippuvainen pelkästään voimakkuudesta. Voimakkuuden lisäksi äänen melisuuteen vaikuttaa taajuussisältö ja ajalliset muuttujat. Elämyksellisesti melisuuteen vaikuttavat äänen sointiväriin, eli taajuussisältöön liittyvät kielteiset tuntemukset, vaihteluvoimakkuus sekä äänen merkityssisältö. Ympäristöministeriön mukaan melun häiritsevyyteen vaikuttavat täten:

- Melun akustiset ominaisuudet
- Tilanteisiin ja olosuhteisiin liittyvät tekijät
- Yksilön oma mahdollisuus vaikuttaa melunlähteeseen ja altistetun meneillään oleva toiminta
- Meluun liittyvät psykologiset tekijät, esimerkiksi melunlähteen tunnistamismahdollisuus ja suhtautuminen melunlähteeseen. [14, s. 7]

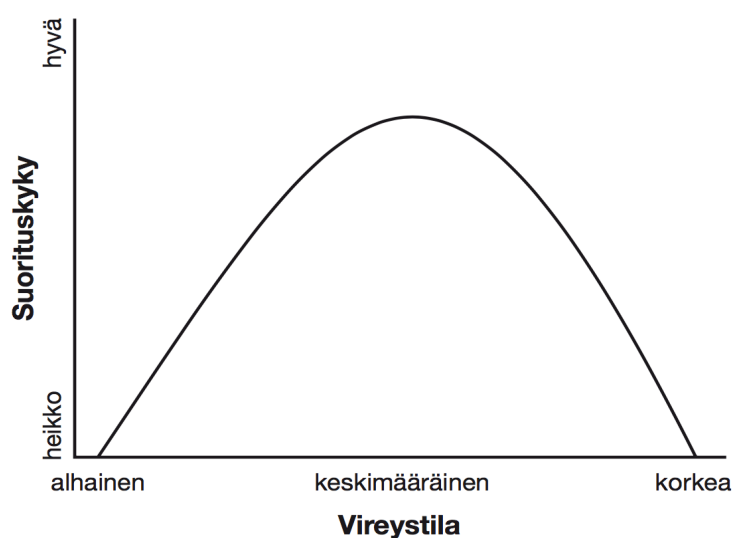
Häiritsevyyttä ja muita terveysvaikutuksia voidaan tarkastella fysiologisilla mittauksilla. Mittauksilla voidaan selvittää ihmisen kudusrakenteen suhteellisia muutoksia ja häiriöitä fysiologisessa käyttäytymisessä. WHO:n mukaan näitä muutoksia kutsutaan vaurioiksi. Vauriot aiheuttavat suorituskyvyn alenemista, eli toiminnanvajautta asianomaisten päivittäisessä toiminnassa esimerkiksi nukahtamis- ja keskittymisvaikeuksien muodossa. Toiminnanvajauksen pitkäaikaiset negatiiviset vaikutukset ovat määritelty WHO:n mukaan haittoiksi. Haittoja voivat olla esimerkiksi suoritus- ja oppimiskyvyn heikkeneminen, työkyvyn aleneminen ja sitä kautta muut sosiaaliset ongelmat. [14, s. 20]

Ihmisen kuulojärjestelmä muodostaa lukuisia yhteyksiä muualle kehon motorisiin, kognitiivisiin ja vegetatiivisiin keskuksiin, jotka ohjaavat ihmisen elintoimintoja. Ihminen on kokonaisuus, jossa mitään elintoimintoa ei voida tarkastella täysin muista riippumattomana. Ihmiset eroavat toisistaan fyysisesti ja siitä syystä myös melusta aiheutuvat terveysvaikutukset saattavat vaihdella suuresti yksilöiden välillä. Ihmisen keskushermostosta, kuulo – ja muista aistijärjestelmästä ärsykeitä vastaanottava retikulaariaktivaatiojärjestelmä vaikuttaa ratkaisevasti melusta aiheutuvaan fysiologiseen reaktioon. Retikulaariaktivaatiojärjestelmä muodostaa uhkavista signaaleista koko keskushermostoon vaikuttavan valpastumistilan vaaran uhan arvioimiseksi ja tarvittavien reaktioiden ohjelmoimiseksi. Kyseinen järjestelmä osallistuu myös stressireaktion luomiseen, joka saattaa aiheutua pitkäaikaisesta, voimakkaasta ja ei-toivotusta melusta. Stressireaktio muodostuu, kun yksilö ei voi vaikuttaa melulle altistumiseen. Tällöin henkilö herkistyy melulle, eikä kuuloelin pysty adaptoitumaan ääniympäristöön. Herkistymisen seurauksena henkilö kiinnittää jatkuvasti huomiota meluun. [14, s. 21] Fysiologiset muutokset palautuvat usein normaaleiksi melu-altistumisen jälkeen, mutta muutokset voivat normalisoitua altistuksen pitkittyessä. Muutoksista saattaa aiheutua rakenteellisia elin- tai kudomuutoksia, jotka voivat lopulta johtaa sairastumiseen. Ympäristöministeriön selvitysryhmä [14] jaottelee melusta aiheutuvat fysiologiset elintoimintojen häiriöt seuraavasti:

1. Neuraalisiin, kuten levon, unen ja nukahtamisen häiriintyminen
2. Kognitiivisiin, kuten keskittymisen, suorituskyvyn ja muistin heikentyminen
3. Akustiseen viestintään, puheen kuulemiseen ja tuottamiseen
4. Vegetatiivisiin, nimenomaan sydän ja verenkiertoelimistön osalta.

Päivittäisessä toiminnassa helikopteritekniikan henkilöstö altistuu mahdolliselle meluvaikutukselle, jonka voidaan voimakkuutensa osalta olettaa vaikuttava ainakin akustiseen viestintään sekä kognitiivisiin tekijöihin. Lisäksi mahdollisia neuraalisia vaikutuksia saattaa esiintyä yö-

lento- tai päivystystoiminnan aikana, koska henkilöstö saattaa majoittua helikopterihallien läheisyydessä. Kognitiivisilla vaikutuksilla tarkoitetaan vaikutuksia keskittymiseen, tarkkaavaisuuteen, muistitoimintoihin, suoritustarkkuuksiin, lukemiseen ja oppimiseen. Kognitiivinen toiminta on suoritus, johon liittyy henkilön eri aistitoimintojen havainnointi, tietojen käsittely, tallennus ja hyväksikäyttö. [14, s. 26] Psykologien Robert M. Yerkesin ja John Dillingham Dodsonin tutkimuksessa [28] laaditun valve- ja vireystilakäyrän tai ”Dodson & Yerkes -lain” mukaan henkilö on suorituskyvyltään tehokkain ollessaan virkeä ja pystyessään keskittymään tehtäväänsä.



Kuva 14. Suorituskyvyn ja vireystilan riippuvuussuhde [14, s. 26]

Ihmisen on haasteellista suoriutua tehtävästään ollessaan alhaisessa vireystilassa. Väsyneenä ihmisen keskittymiskyky ja tarkkaavaisuus alenevat. Vireystilan ollessa korkeimmillaan ihminen on yliaktiivinen, hermostunut tai ärsyyntynyt, mistä johtuen tarkkaavaisuus kärsii (kuva 14).

Puheviestinnällä on keskeinen rooli lentoteknisen työympäristön työturvallisuuden ylläpitämisessä. Helikopterin kunnonvalvontatarkastukset useamman henkilön suorittamana vaativat usein työntekijöiden vuorovaikutusta puheella. Puheen ja huutamisen avulla varoitetaan muuta tarkastushenkilöstöä muun muassa pyörivistä lavoista, ilmoitetaan tarvittaessa jaettujen tarkastusvastuiden vaiheet sekä varoitetaan mahdollisista vaaratilanteissa helikopterin läheisyydessä. Käyttöhuoltoon liittyvässä tarkastustoiminnassa mekaanikoilla ei ole aina suoraa näköyhteyttä toisiinsa, joten puheen sisällön täsmällinen välittyminen oikeaan aikaan on tärkeää.

Äänen etenemiseen ja sitä kautta puheviestinnän oikeaan tulkintaan vaikuttavat useat eri tekijät. Aikaisemmin selitettyjen tekijöiden lisäksi myös puhujan puhenopeus ja puheen selkeys vaikuttavat oleellisesti puheen tulkittavuuteen. Riittävän korkea melutaso vaikeuttaa puheen erottamista johtuen puheen sanojen ja äänteiden epäluotettavaan tunnistamiseen. Vaikka sanojen tai äänteiden tunnistaminen olisi ajoittain epäluotettavaa, ihminen kykenee kuitenkin tunnistamaan kokonaisia lauseita tyydyttävästi. [14, s. 26]

Mikäli vain 75% sanoista välittyy kuulijalle, ihminen kykenee kuitenkin tulkitsemaan lauseet täydentämällä puuttuvat sanat 95% tarkkuudella. Mikäli sanaerotuskyky heikentyy 50% tai alle, puheen kuulonvarainen tulkitseminen käy mahdottomaksi. Keskimäärin yksilö kykenee erottamaan sanat 95% tarkkuudella, mikäli puheen ja häiriöäänen äänentaso on sama. Ihminen kykenee kasvattamaan sanojen erotuskykyä 15-20 prosenttiyksikköä tulkitsemalla puhujan kasvojen ja huulten liikkeitä, mikä vastaa puhujan äänen tason nostamista 2-3dB. Puheen peittymiseen liittyy olennaisesti äänen tason lisäksi myös impulssimainen melu. Impulssimaisessa melussa puhe peittyy jaksottaisesti ja kuulija joutuu arvailemaan puheen sisältöä peittyvien sanojen osalta. Puheen peittyvyyteen vaikuttaa jaksojen pituus ja esiintymistiheys. Näin ollen melun taajuussisältö on huomioitava puheen peittävyyttä tarkasteltaessa. [14, s. 29]

2.12. Yhteenveto

Kuultavan äänen ennustettavuus, merkitys- ja taajuussisältö vaikuttavat suuresti sen kokemiinseen. Näillä kolmella on jopa äänenpainetasoa suurempi merkitys sille, koetaanko kuultava ääni meluksi. Näin ollen helikopterin käyntiäänen aiheuttamien miellelyhtymien tarkastelu on erillinen tutkimuskokonaisuutensa. Tämän tutkimuksen johtopäätösten muodostamisen kannalta on tärkeää, että melun ja äänen fysikaalisten ominaisuuksien keskeisimmät käsitteet on määritelty ja avattu. Jälkikäynnalla, heijastuksilla, huonemoodeilla, ja muilla äänen etenemiseen liittyvillä ilmiöillä on suuri vaikutus akustiseen viestintään helikopterihallissa. Akustiikka vaikuttaa myös ulkoisten äänten, kuten helikopterin käyntiäänen taajuussisällön ja äänenpainetason jakautumiseen työtiloissa. Eri puolella helikopterihallia käyntiäänen taajuussisällössä ja äänenpainetasossa saattaa ilmetä suuriakin muutoksia, johtuen hallin ja nosto-oven akustisista ominaisuuksista. Subjektiiiviset kokemukset äänen merkityksestä saattavat näin ollen vaihdella suuresti henkilön työpisteen sijainnista riippuen.

Valtioneuvoston asetuksessa 26.1.2006/85 (Valtioneuvoston asetus työntekijöiden suojelemisesta melusta aiheutuvilta vaaroilta) säädetään päivittäisen meluallistuksen suosituksista. Suositukset esitetään A-painotetulla desibeliasteikolla, joka huomioi ihmiskorvan herkkyyden melunmittauksissa taajuuden funktiona. A-painotuksessa matalat taajuudet esitetään vaimentamattomina noin 1000Hz:n asti, josta ne vaimenevat logaritmisesti 10 ja 100Hz:n välille. [6, s. 94] Tästä syystä melun suositukset eivät huomioi matalia taajuuksia, jotka eivät ole ihmiskorvan kuultavissa, mutta ovat kuitenkin aistittavissa. Melulla on suora yhteys yksilön fyysiseen hyvinvointiin. Kuultava melu vaikuttaa suoraan keskushermoston kautta ympäri kehoa ja näin ollen vaikutukset ulottuvat myös verenkiertoelimistöön. Melusta johtuvat fysiologiset vasteet joko adaptoituvat tai habituoituvat, joten esimerkiksi tilapäiset verenpaineen muutokset saattavat jäädä pysyviksi [14, s. 21]. Ihmisen kuulon akustisen herkkyyden alueella esiintyvien matalien taajuuksien vaikutuksia ihmiseen on hankala arvioida perinteisen meluvaikutustutkimuksen pohjalta. On kuitenkin syytä olettaa, että voimakkaiden matalien taajuuksien esiintyminen vaikuttaa ihmisen keskushermostoon ainakin erillisenä ärsykkeenä, jonka vaikutukset voivat olla hyvin subjektiivisia.

3. MITTAAMINEN

3.1. Hyvä mittauskäytäntö

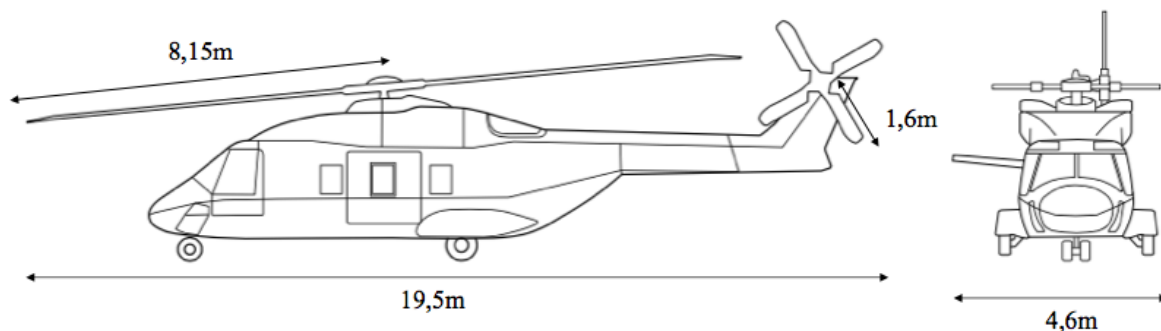
Randall, F, Barons määrittää teoksessaan [24, s. 68] hyvän äänenmittauskäytännön toimenpiteet. Mittauksista vastaavan henkilön tulee selkeästi määrittää mittausten tarkoitus, joka tässä tutkimuksessa on uuden tiedon hankinta työympäristöstä. Tutkimuksessa mitattiin helikopterin aiheuttamia äänentasomuutoksia eri taajuusalueilla, joten mittaus ei ollut tavanomainen melunmittaus. Perinteisillä melunmittauskalustoilla ei voida tarkastella ihmisen kuuloalueen ulkopuolella aiheutuvia tasomuutoksia, joten tutkimuksen mittauksia varten valittiin erikoislaitteisto, joka esitellään tarkemmin alaluvussa 3.3. Baronsin [24] mukaan mittaajan tulisi selvittää seuraavat asiat optimoidakseen mittausvälineistön käytön, sekä vastataksaan mittauksilla mahdollisimman hyvin ratkaisua vaativaan ongelmaan:

- a) Millainen on oletettu äänilähde?
- b) Millaiset ominaispiirteet melulla tai äänellä on?
- c) Mikä on äänilähteen fyysinen koko?
- d) Onko ääni jatkuvaa tai ajoittaista?
- e) Miten äänilähde suuntaa ääntä?
- f) Mitä muita erityispiirteitä mittausympäristössä on huomioitava?

Tutkimuksen laatijalla on äänilähteestä ja sen ympäristössä toimimisesta useiden vuosien kokemus, joten varsinaista kattavaa esiselvitystyötä ei nähty tarpeelliseksi. Baronsin [24] esittämiin kohtiin vastataan alaluvussa 3.2, jossa esitellään tarkemmin mitattava kohde sekä mittausympäristö.

Varsinaisessa mittaustapahtumassa sovellettiin ympäristöministeriön ohjeistusta melun mittauksesta [29], sekä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun melunmittaajakoulutusohjelman ohjeita. Ympäristöministeriön ympäristömelunmittausohjeen [29] mukaan asianmukainen mittaus vaatii mittaajalta kokemusta ja mittauksiin liittyvien asioiden hallintaa, joten mittauksiin osallistui tutkimuksen laatijan lisäksi myös melunmittaajakoulutusohjelmaa suorittava puolustusvoimien kantahenkilökuntaan kuuluva aliupseeri.

3.2. Mitattava äänilähde ja mittausympäristö



Kuva 15. NH90-helikopterin mitat

Kuva 15 havainnollistaa NH90-helikopterin olevan pituudeltaan 19,5 metriä pääroottorin roottorilavan kärjestä pyrstöroottorin roottorilavankärkeen. Helikopteri on 4,6 metriä leveä korkeusvakaaja huomioiden (kuva 15). Helikopterin tyhjäpaino koneversiosta riippuen noin 6200-7000kg ja suurin sallittu lentoonlähtöpaino noin 11000kg. Helikopterin runko muodostuu neljästä rakennekokonaisuudesta: eturungosta, keskirungosta, perärungosta ja vakaajista. Rakennekokonaisuudet koostuvat lähes kokonaan komposiittimateriaaleista. [2]

Helikopterin nostovoiman tuottavat pyörivät pääroottorin roottorilavat, jotka aiheuttavat suurimman osan tutkimuksen kohteena olevasta värähtelystä. Helikopterissa on neljä lapaa sekä pää- että pyrstöroottorissa, jotka pyöriessään aiheuttavat muutoksia staattiseen ilmanpaineeseen. Roottorilavat pyörivät normaaliolosuhteissa päävaihteiston alentamalla vakiokierroksilla ja lentämiseen vaadittu nostovoima tuotetaan roottorien lapakulmia poikkeuttamalla. Pyrstöroottorin tehtävänä on kumota pääroottorista aiheutunut vääntömomentti sekä mahdollistaa lapakulmia poikkeuttamalla helikopterin suuntaohjaus. Yhden pääroottorin roottorilavan pituus on noin 8 metriä ja päävaihteiston alentama kierrosnopeus pääroottorille on 256rpm [2]. Mikäli pääroottorin lapoja tarkastellaan värähtelyn aiheuttajana, voidaan kierrosnopeudesta laskea yhden roottorilavan ohittavan mittauspisteen noin 4,2 kertaa sekunnissa. Nelilapaisessa helikopterissa roottorilavat ohittavat mittauspisteen täten noin 17 kertaa sekunnissa muodostaen oletetun amplitudikorostuman 17Hz:n taajuusalueella. Mikäli pyrstöroottoria tarkastellaan vastaavalla tavalla, 1,6m roottorilapa ohittaa mittauspisteen noin 20 kertaa sekunnissa kierrosnopeuden ollessa 1232rpm [2]. Pyrstöroottorin ollessa pääroottorin tavoin nelilapainen, se muodostaa korostuman 80Hz taajuudelle.

Helikopterissa merkittäviä äänilähteitä roottorilapojen lisäksi ovat helikopterin katolla sijaitsevat kaksi RRTM322-01/9 suihkuturbiinimoottoria. Moottorin äänisignaali on korkeataajuista, sillä moottorin kaasunkehitin pyörii kierrosnopeudella 36300rpm ja työturbiini kierrosnopeudella 20841rpm. Lisäksi kaasunkehittimessä ja työturbiinissa on useita kymmeniä johdesiipiä, jotka osaltaan vaikuttavat taajuuteen. [2]

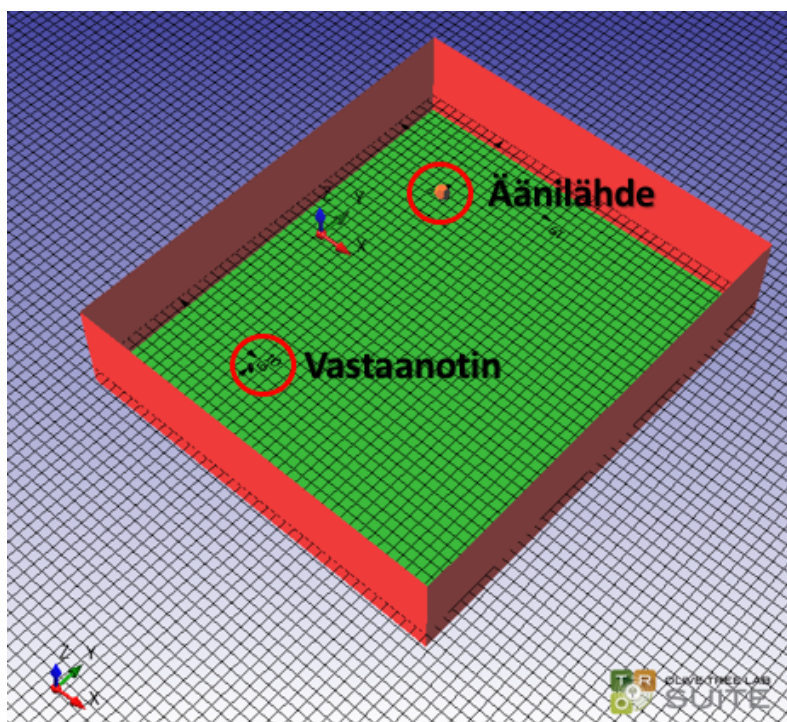
Mittaukset suoritettiin Utin lentokentällä asematasolla B. Utin lentoliikenne koostuu pääosin sotilaslentotoiminnasta, mutta kenttää hyödyntävät myös siviili-ilmailun toimijat [1]. Lentokenttä koostuu kaksi kilometriä pitkstä, itä-länsisuunnassa olevasta kiitotiestä infrastruktuurineen. Kiitotien eteläpuolella sijaitsevat Utin jääkäriyrykmentin sotilasasematasot ja pohjoispuolella siviili-ilmailun sekä Patrian ilmailuteollisuuden asematasot [1].

Mittaussuoritteet toteutettiin sotilasasematasolla sijaitsevassa helikoptereiden säilytykseen ja huoltotoimintaan tarkoitettussa helikopterihallissa. Rakenteeltaan hallit olivat jaettu kahteen eri osioon (loosiin), joissa molemmilla looseilla oli oma nosto-ovensä (kuva 18). Loosi, jossa mitaukset suoritettiin, oli leveydeltään 18,8m, korkeudeltaan 9,4m ja pituudeltaan 44,8 metriä. Loosien välissä ei ollut erillistä tilaa jakavaa väliseinää, joten loosien yhteisleveydeksi mitattiin noin 38m. Kaikki mitaukset suoritettiin liitteen 1 laseretäisyysmittarilla. Loosien välissä tilanjakajana toimivat kattorakennetta kannattelevat kolme tolppaa, sekä lukuiset käyttöhuollon tarvarahylyt ja työskentelytasot.

Hallin seinille oli asennettu ilmeisesti akustisten ilmiöiden hallintaan tarkoitettuja vaimennuspaneeleita, mutta pääsääntöisesti hallin seinät olivat paljasta maalamatonta betonia. Hallin sisäpuolen kattorakenne oli muodoltaan epätasainen ja pinnaltaan maalamatonta betonia. Hallin lattia oli maalattua ja lakattua betonia. Mittausloosin takaseinällä oli suuri määrä ilmastointiputkia, sekä sähkökeskus.

Loosikohtaiset Mock Doors Oy:n (Liite 12) nosto-ovet olivat keskenään samanlaisia. Nosto-ovi muodostui kahdesta, alle 1cm paksuisesta muovikankaasta joiden väliin jäi noin 30cm välinen tyhjä tila nosto-oven ollessa kiinni. Nosto-ovet oli suunniteltu siten, että muovikankaat laskostuivat kasaan oven auetessa. Mittausloosin nosto-oven leveys oli noin 18,5m ja korkeus noin 18 m.

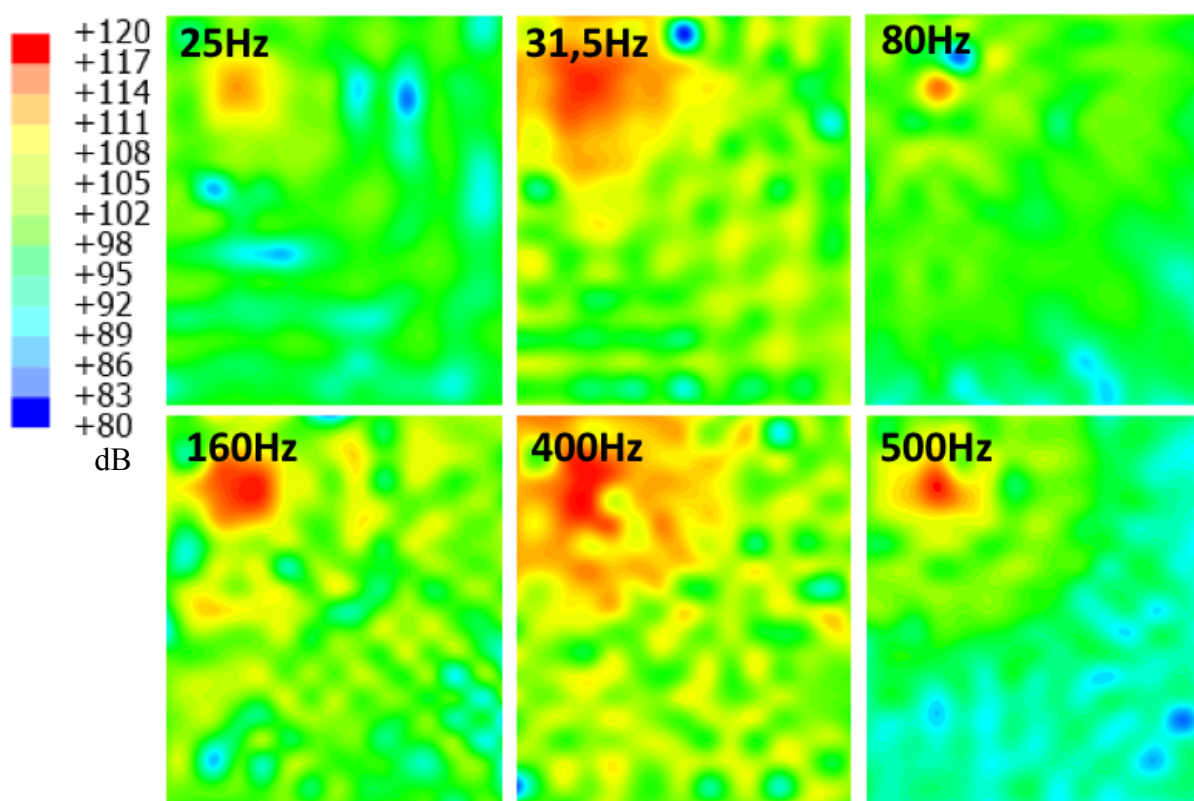
Helikopterihallin akustiikan mallinnuksessa käytettiin OTL Suite-ohjelmaa. OTL Suite on kolmiulotteiseen akustiseen mallinnukseen kykenevä ohjelmisto, jolla voidaan mallintaa sisä- ja ulkotilojen akustiikkaa [22]. Ohjelman avulla pyrittiin selvittämään hallin jälkikaiunta-aika, sekä vahvistamaan huoneresonanssien olemassaolo mallintamalla. Ohjelmalla luotiin 3D-malli (kuva 16), joka vastasi kooltaan ja materiaaleiltaan tutkimuksen kohteena olevaa helikopterihallia. Hallin mallinnuksessa käytettiin mittausjärjestelyjen dokumentointivaiheessa mitattuja mittoja. Mallinnuksesta pyrittiin luomaan mahdollisimman realistinen luomalla mallin rakenteille oikeaa hallia vastaavat materiaalitiedot. Seinien ja katon osalta pintamateriaaliksi valikoitui maalaamaton betoni ja lattian osalta maalattu betoni. Mallinnusohjelman materiaalitietokannasta ei löytynyt nosto-ovea vastaavaa materiaalia, joten materiaalina käytettiin maalamatonta betonia.



Kuva 16. Hallin mallinnus

Onnistuneen laskennan edellytyksenä oli, että malliin sisällytetään äänilähde sekä vastaanotin. Vastaanotin (Liite 9) valikoitui hallin koon mukaan. Hallin koko määritti käytettävän vastaanottimen NR (Noise Rating) - arvon. NR-arvo perustuu ISO-standardoinnin mukaiseen käyrästöön, jossa määritetään hyväksyttävät äänenvoimakkuustasot eri oktaavikaistoilla. Vastaanottimen asetusarvoilla ei ollut merkitystä huonemoodi- ja tai jälkikaiunta-ajan mallintamiseen. Mallinnusohjelma vaati kuitenkin vastaanottimen sijoittamista malliin laskennan suorittamiseksi. Mallinnukseen tarvittava äänilähde luotiin helikopterista mitatun äänisignaalin pohjalta. Mitatun signaalin taulukodata syötettiin mallinnusohjelmaan, jolloin kyettiin simuloimaan NH90-helikopteria äänilähteenä (Liite 10).

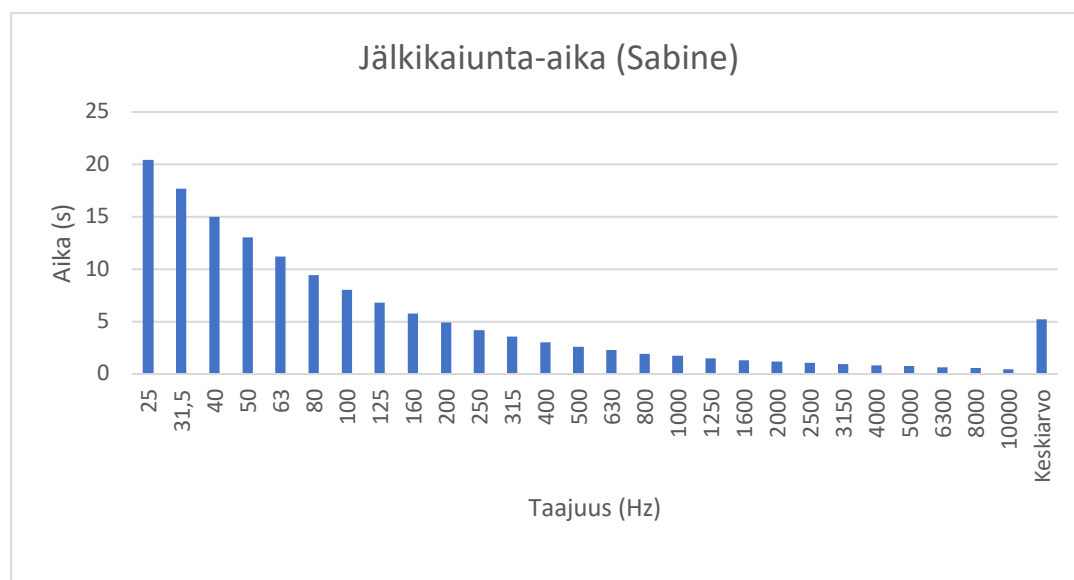
Huoneresonanssimallinnuksessa äänilähde sijoitettiin hallin luoteisnurkkaan (kuva 17). Simulaatio mahdollisti äänenvoimakkuuksien jakautumisen tarkastelun eri taajuuksilla. Ohjelmalla ei kyetty tarkastelemaan alle 25Hz:n taajuuksia. Ohjelmakohtaisista rajoituksista huolimatta, simulaatiolla onnistuttiin analysoimaan riittävästi eri taajuusalueita tukemaan tutkimusta ja havainnollistamaan huoneresonanssi-ilmiötä.



Kuva 17. Mallinnetut huoneresonanssit

Hallin 3D-mallinnus on oikeaan helikopterihalliin verrattuna voimakkaasti yksinkertaistettu. Lisäksi äänilähde on sijoitettu hallin sisälle. Tästä syystä mallinnuksen resonanssi-ilmiöitä ei tule suoraan verrata mittausdatassa esiintyviin äänenvoimakkuuden muutoksiin. Simulaatiolla voidaan kuitenkin todeta resonanssi-ilmiöiden olemassaolo matalilla taajuuksilla (kuva 15). Yli 500Hz:n taajuusalueella huoneen ilma-absorptio ja rakenteiden vaimennuskyky alkaa vaikuttaa äänenvoimakkuuteen vaimentavasti. Huolimatta hallin suuresta koosta, taajuuskohtaiset voimakkuusvaihtelut ovat hyvin suuria etenkin alle 500Hz:n taajuuksilla. Simulaation perusteella muodostuvien resonanssien voimakkuus vaimenee merkittävästi yli 500Hz:n taajuuksilla.

Huoneresonanssimallin lisäksi hallin akustiikkaa tarkasteltiin simuloimalla jälkikaiunta-aikaa. Simulaatiomallin seinämateriaalit eivät ole voimakkaasti absorboivia, joten Sabinen yhtälö soveltui tilan jälkikaiunta-ajan tarkasteluun. Mallinnusohjelma laski asetettujen asetusten (Liite 10) avulla huoneen jälkikaiunta-ajan taajuuskohtaisesti.



Kaavio 1. Akustiikkamallinnuksen jälkikaiunta-aika (sabine)

Tilan jälkikaiunta-ajat ovat pitkiä matalilla taajuusalueilla (kaavio 1). Mallinnetun hallin keskimääräinen jälkikaiunta-aika vastaa pituudeltaan kirkon tai konserttisalin jälkikaiuntaa [8, s. 171]. Puheen tulkittavuuden kannalta hallin pitkä jälkikaiunta-aika on ongelmallinen varsinkin suurilla etäisyyksillä. Pitkän kaiunnan heijastukset luovat peittoilmiöitä puheen taajuussisältöön vääristäen ja vaimentaen puhetta [8, s. 153]. Mikäli halli altistetaan jatkuvalla äänisignaalille, jälkikaiunta saattaa aiheuttaa taajuuksia voimistavia ilmiöitä. Alkuperäisen äänisignaalin heijastukset osuvat vastaanottajaan useasta eri suunnasta voimistaen alkuperäistä signaalia. [8, s. 152]. Näin ollen simulaation perusteella matalat taajuudet saattavat voimistua hallissa myös jälkikaiunnan ansiosta.

Lentokentällä suoritettujen äänitasojen mittaukset saattavat osoittautua haastaviksi johtuen mitaustuloksia vääristävästä lentomelusta. Lentomelun ominaisuudet vaihtelevat suuresti lentokentästä riippuen. Lentokentän melun esiintyvyyteen ja sen vaihteluun vaikuttaa muun muassa:

- Lentokentällä operoivien konetyyppien laatu ja määrä
- Kiihtoteiden määrä ja käyttö
- Lentoreittien valinta
- Sääolosuhteet. [15]

Lentomelun vaikutukset mittauksiin pyrittiin minimoimaan etukäteen järjestelemällä mittauspäivän helikopteritoiminta lentopalveluksenjohdon kanssa. Mittausajankohtana lentokentällä ei ollut muuta lentotoimintaa kuin mittauksen äänilähteenä toimiva helikopteri.

Säätilalla saattaa olla suuri merkitys mitaustuloksiin. Maapallon ilmakehän jatkuvasta dynaamisesta muutoksesta johtuen ilmakerrosten pystyjakauma on lähes poikkeuksetta heterogeeninen. Ilmakerrosten heterogeenisuus aiheuttaa lähes aina poikkeaman melun etenemisvaimentamisen laskelmien ja mitatun arvon kanssa. Poikkeaman aiheuttaa ilman fysikaalisten ominaisuuksien, sekä tuulen nopeuden muutokset pysty- ja vaakasuunnassa. [21, s. 18]

Ilmakehän kerroksien suuret lämpötila- ja tuulensuuntamuutokset vaikuttavat oleellisesti mitaustuloksiin silloin, kun mitattava kohde sijaitsee useiden kymmenien metrien korkeudessa. Maassa ollessaan NH90-helikopterin pää- ja pyrstöroottori ovat noin neljän metrin korkeudessa, joten ilmakehän dynamiikan vaikutukset voidaan olettaa olevan vähäiset [2]. Liitteen 7 mukaisten vallitsevien sääolosuhteiden ei oleteta vaikuttavan merkittävästi mitaustuloksiin, sillä mittausmikrofoni sijaitsi sisätiloissa ja ulkona tuulen nopeus oli noin 5m/s.

3.3. Mittauslaitteisto

Tyypillisimmät äänentasomittarit eivät kykene, eikä niitä ole suunniteltu tallentamaan ihmisen kuuloalueen ulkopuolella esiintyviä infraääniä. Tutkimuksen mittauksia varten vaadittiin erikoislaitteisto, joka vuokrattiin keravalaiselta mittalaitteiden, mittausjärjestelmien ja –komponenttien valmistukseen, maahantuontiin ja markkinointiin erikoistuneelta MIP Electronics Oy:ltä. Vuokrattavat laitteet olivat SINUS Soundbook-analysaattori SAMURAI-ohjelmistolla sekä GRAS 46AE CCP-vapaakenttämikrofoni lisävarusteineen. Tutkimuksen mittaukset suoritettiin soveltuvien osin Ympäristöministeriön ympäristönsuojeluosaston laatiman melunmittausohjeen [29] mukaisesti, joka ohjeistaa mittalaitteiden käytöstä ja tarkkuus- ja kalibrointi-vaatimuksista.

Ohjeen [29] mukaan mittalaitteiston tulee täyttää SFS 2877/IEC 651-standardin mukaiset vaatimukset äänentasomittareille, mieluiten tarkkuusluokalle 1, mutta vähintään luokalle 2. Mikrofoniin osalta kyseisten vaatimusten täytyminen ilmenee valmistajan dokumenteista (Liite 3). Liitteen 3 mukaan GRAS-vapaakenttämikrofoni soveltuu tarkkuusluokan 0 ja 1 mittauksiin. Varsinaisen mittalaitteiston muodosti mikrofoni, joka oli yhteydessä FFT-analysaattoriin. FFT-analysaattorille suoritettiin ISO 61672 ja ISO 60651-standardien mukaiset testaukset (Liite 6) valmistajan toimesta ennen mittauksia. Mittalaitteiden oikeaan käyttöön vaadittu perehdytys saatiin MIP Electronics Oy:ltä laitteiden noudon yhteydessä. Samassa tilaisuudessa analysaattoriin asetettiin MIP Oy:n toimesta mittauksia varten määritetyt esiasetukset.

FFT-analysaattorina käytetty Sinus Soundbook on universaali akustinen mittausjärjestelmä, jossa yhdistyy uudenaikainen mittauslaitteisto ja kosketusnäytöllisen kannettavan tietokoneen tuomat ominaisuudet. Soundbook on suunniteltu kestäväksi olosuhteita ja kovaa käyttöä IP54 ja MIL-standardeilla. Soundbook soveltuu muun muassa ympäristönsuojelun, laadunvarmistuksen ja tutkimuksen käyttötarkoituksiin. Tyypillisimpiä Soundbook:n sovellusalueita ovat muun muassa:

- Äänenpainetasojen mittaus ja taajuusanalyysi
- Rakennus ja huoneakustiikka
- Rakennusten ja ihmiskehon tärinä
- Modaali- ja toiminnallisen värähtelyn analyysi. [19]

Soundbook on tyyppihyväksytty standardien IEC 60804, 60651 ja 61672, tyyppin 1 mukaisesti [20]. Soundbook:n tarkemmat tekniset tiedot on esitelty liitteessä 8.

Soundbook:n yhteydessä toimiva SAMURAI on SINUS Messtechnik GmbH:n Windows-pohjainen ohjelmisto, jota käytetään melun ja värinän mittauksiin ja reaaliaikaiseen analysointiin. Ohjelmistolla pystytään esittämään mittausdata 16 erilaisella reaaliaikaisella ikkunalla, jotka saavat datansa 2- 8 tallennuskanavasta. SAMURAI kykenee esittämään mittausdatan seuraavien näyttöikkunoiden avulla: [18]

- Äänentasomittari
- Oktaavianalyysi
- FFT-analyysi
- Aikaisignaali.

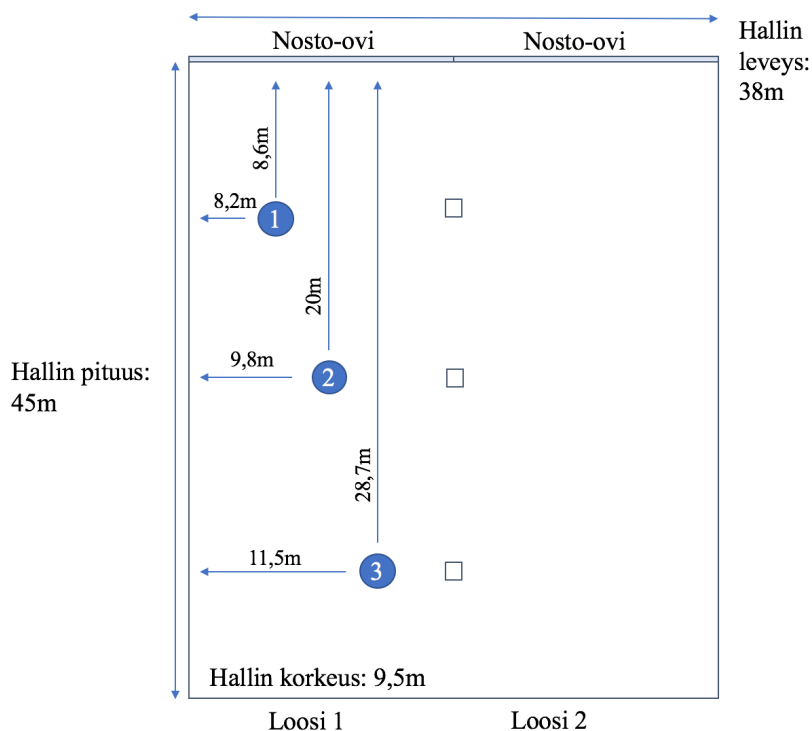
Ohjelmisto kalibroi itsensä automaattisesti ennen mittauksien aloittamista.

Tutkimuksessa käytettäväksi mikrofoniksi valikoitui GRAS 46AE CCP-vapaakenttämikrofoni. Mikrofonin koostuu kotelon ja etuvahvistimen yhdistelmästä, joka on kalibroitu omaksi kokonaisuudekseen. Näin valmistaja on pyrkinyt yksinkertaistamaan laitteiston kalibrointia ja täten minimoimaan mikrofonin liitännöiden kontaminaatiota kalibroinnin yhteydessä. Mikrofonin soveltuu kaikkiin akustisiin mittauksiin, joissa äänilähteen sijainti on tiedossa. [10] Mikrofonin suunniteltu suunnattavaksi suoraan kohti äänilähdettä (Liite3). GRAS-mikrofoni elektreettimikrofoni, joka on yksi kondensaattorimikrofonien erikoistyypeistä. Elektreettimikrofoni eroaa perinteisistä kondensaattorimikrofoneista, sillä se ei tarvitse polarisaatiojännitettä. Mikrofonin kapseli on valmistettu materiaalista, joka on itsessään pysyvästi polarisoitunut. [7] Mikrofonin tarvitsee kuitenkin käyttöjännitteen etuvahvistimelleen, jonka se sai Soundbook:n virtalähteestä. Tutkimusta varten mikrofonin tilattiin suoraan valmistajalta MIP Oy:n toimesta, jossa se kalibroitiin liitteiden 4 ja 5 mukaisesti. Tutkimuksessa tarkasteltavan taajuusalueen rajaukset on perusteltu mikrofonin taajuusvasteella 3,15Hz – 20kHz. (liite 3).

3.4. Mittausjärjestelyt ja mittausten kulku

Tutkimuksen mittaukset suoritettiin 21. kesäkuuta 2017 Utin jääkäriyrykmentin Helikopteripataljoonan helikopterihallissa. Mittauksiin osallistui tutkijan ja luvussa 3.1 esitellyn mittaajan lisäksi NH90-helikopterilla operoiva lentomiehistö, johon kuului ilma-aluksen päällikkö, perämies ja kuormamestari. Helikopterin lentotehtävän aikataulu muodosti mittausten aikavälin ajankohtaan klo 14.15 – 15.20. Ennen helikopterin käynnistämistä mittauksiin osallistuvalla henkilöstöllä järjestettiin tilaisuus, jossa läpikäytiin mittausten suorittamisen vaiheet, helikopterin toimenpiteet mittausten aikana sekä yhteydenpitomenetelmä. Yhteydenpitovälineenä helikopterin ja mittaushenkilöstön välillä käytettiin VIRVE-puhelinta.

Mittaukset suoritettiin kolmesta eri mittauspisteestä hallin sisällä kahdessa eri vaiheessa. Mittauspisteiden sijainti valikoitui lentoteknisen henkilöstön tyypillisimpien työskentelyalueiden mukaan (kuva 18). Ennen varsinaisten mittauksien aloittamista pisteiden etäisyydet rakenteista mitattiin kalibroidulla Lecia DISTO D5 laseretäisyysmittarilla (Liite 1). Eri mittauspisteistä pyrittiin selvittämään äänen voimakkuuden käyttäytymistä eri työskentelypisteissä.



Kuva 18. Mittauspisteet

Mittamikrofoni sijoitettiin mittauspisteeseen erillisellä jalustalla suositeltuun noin 1,5m [24, s. 81] sisätilamittauskorkeuteen. Mittamikrofoni asetettiin noin 45° kulmaan (Liite 2). Korkeus- ja kulma-arvot säilyivät samana jokaisessa mittauspisteessä, ja molemmissa vaiheessa. Mikrofonin suunnaattiin jokaisessa mittauspisteessä kohti äänilähdettä samalla 45° asetuskulmalla. Mikrofonin yhteydessä ollut analysaattori asetettiin erilliselle liikuteltavalle alustalle mikrofonin taakse. Analysaattorin sijoittelulla pyrittiin minimoimaan mahdolliset analysaattorin rakenteista aiheutuvat heijastukset. Viereisessä, loosi 2:ssa säilytettiin mittausten aikana kahta NH90-helikopteria.

Mittaukset oli jaettu kahteen eri vaiheeseen. Ensimmäisessä vaiheessa helikopteri oli käynnissä asematasolla kuvan 19 mukaisella konepaikalla FLIGHT-käyttöalueasetuksella keulan suunnan ollessa konepaikan rullausviivan suuntaisesti kohti pohjoista. Konepaikan ja loosi 1:n nosto-oven välinen etäisyys oli noin 61m.

Vaiheessa 1 mittauksia suoritettiin kaikissa kolmessa mittauspisteessä (pisteet 1-3, kuva 18) ja jokaisessa mittauspisteessä suoritettiin yhden minuutin pituinen mittausjakso loosi 1:n nosto-oven ollessa täysin suljettu ja täysin avoinna. Näin ollen mittausdataa kerättiin 1 vaiheessa yhteensä kuusi minuuttia. Yksittäinen mittausjakso käynnistettiin SAMURAI-ohjelmiston nauhoitustoiminnolla, joka oli esiohjelmoitu yhden minuutin pituiseksi. Nauhoituksen aloittamisen jälkeen mittaushenkilöstö siirtyi noin kolmen metrin etäisyydelle mikrofonin äänikentästä minimoidakseen mahdolliset ihmisestä johtuvat ääniheijastukset [24, s. 81].



Kuva 19. Helikopterin sijoittuminen mittausvaiheissa 1 ja 2

Vaiheessa 2 helikopteri siirtyi kuvan 19 mukaiselle rullausviivalle loosin 1 eteen keulan ollessa rullausviivan suuntaisesti kohti itää. Molemmissa vaiheissa käytettiin mittauksen aikana samaa käyttöalueasetusta. Vaiheessa 2 suoritettiin samat yhden minuutin pituiset mittaukset mittauspisteissä 1-3 nosto-oven ollessa auki ja suljettuna. Helikopterin sijoittumisella eri vaiheissa pyrittiin mallintamaan helikopterin tyypillisintä (vaihe 1) ja voimakkainta (vaihe 2) äänisignaalia helikopterihalliin. Mittausten päätyttyä tallennettu raakadata siirrettiin Exceliin, jolla muodostettiin luvun 4 kaaviot.

3.5. Mittausepävarmuudet

Tutkimuksen mittausepävarmuuksia tarkastellaan Ympäristöministeriön ohjeen [29] avulla. Helikopterin äänisignaali koostuu useasta äänilähteestä ja täten se voidaan rinnastaa esimerkiksi lento- tai raideliikennemeluun. Tutkimuksessa ei kuitenkaan ole tarkoitus verrata mittaus-tuloksia meluntorjuntalain nojalla annettuun valtioneuvoston päätökseen melutason ohjearvoista (993/92), joten ohjeen [29] mittausepävarmuuksien kirjaimellinen huomiointi ei ole uskottavien tulosten kannalta välttämätöntä. Hyvän mittauskäytännön toteutumisen kannalta ohjetta kuitenkin noudatetaan soveltuvin osin. Mittauksista ei laadittu erillistä mittauspöytäkirjaa, sillä ohjeen [29] mukaiset mittauspöytäkirjaan kuuluvat asiakokonaisuudet, kuten mittaus-tulokset ja mittausjärjestelyt on esitelty soveltuvin osin tutkimuksen pääluvuissa 3 ja 4.

Ympäristöministeriön ympäristömelunmittausohjeen mukaan mittauksista saavutetaan mahdollisimman luotettavat tulokset, kun mittajaajalle on selvillä mittauksen tarkoitus ja sen perusteella tarkoituksenmukainen suoritustapa, -ajankohta ja kesto. Ympäristöministeriö suosittelee [29, s. 11] valitsemaan mittausajankohdan siten, että se vastaa mitattavan kohteen tyypillisimpiä käyttöoloja tai toimintatapaa. Lisäksi mittauksen kesto tulisi ajoittaa riittävän pitkäksi tai lyhyeksi, jotta se edustaisi realistisesti mitattavaa melua. Helikopterin tuottama käyntiääni ei mittausten aikana ollut vaihtelevaa, sillä ohjaaja säilytti mittaushetkellä saman käyttöalueasetuksen. Tällöin helikopterin moottori käy tasaisilla kierroksilla säilyttäen roottorilapojen tasaisen kierrosnopeuden. Yhden minuutin pituiset mittausjaksot koettiin riittäviksi. Muuttamalla pääroottorin roottorilapojen asetuskulmaa helikopterin on mahdollista aiheuttaa merkittävä muutos mitattavaan signaaliin, mutta merkittäviä roottorien lapakulmamuu-toksia ei ohjaajien mukaan tapahtunut mittaushetkellä.

Mittaushetkellä vallinneet sääolosuhteet (Liite 7) olivat vuodenaikaan nähden tavanomaiset. Sääolojen tulisi häiritä mittauksia mahdollisimman vähän, joten kovalla sateella ja tuulella mit-tauksia tulisi välttää [29, s. 11]. Lisäksi suuret mittausetäisyydet lisäävät sään vaikutusta mit-taustuloksiin. Tämän tutkimuksen tulosten edustettavuus edellyttää Ympäristöministeriön oh-jeesta poikkeavia melunmittausjärjestelyjä, sillä se suosittelee tulosten luotettavuuden ja tois-tettavuuden takia järjestämään mittaukset mielellään alle 30m etäisyydeltä, sateettomassa ja heikkotuulisessa ympäristössä [29, s. 18]. Tutkimuksen skenaarion luonteesta johtuen mit-tausetäisyydet ovat suurempia. Mittausetäisyydestä johtuvat mittausvirheet voidaan olettaa ole-van vähäiset, kun huomioidaan helikopterin aiheuttama merkittävästi tyypillistä liikennemelua voimakkaampi äänisignaali. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltavat matalat taajuudet vaimenevat vähemmän etäisyyden kasvaessa korkeisiin verrattuna. Mittausajankohtana tuulen nopeus oli liitteen 7 mukaan noin 5 m/s suunnasta 250° - 350°.

Ympäristöministeriö määrittää mittausepävarmuuden lisääntyvän mittausetäisyyden kasvaessa taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2. Tulosten epävarmuus [29, s. 21]

Tulosten epävarmuus (ΔL)	2dB	4dB	7dB
Mittausetäisyys	30m	100m	500m

Ohjeen [29] mukaan mittauksen epävarmuutta voidaan parantaa suorittamalla useampi mittaus samasta mittauspisteestä ja muodostamalla lopullinen mittaustulos näiden mittauksen aritmeettisena keskiarvona. Tutkimuksessa ei nähty tarpeelliseksi suorittaa useampaa mittauspisteestä, sillä etäisyyden muodostama 2-4dB epävarmuus on tutkimuksen pääongelman ratkaisun kannalta merkityksetön ja mittausetäisyys edusti realistista äänilähteen etäisyyttä tarkasteltaviin työtiloihin. Tutkimuksen ensisijaisena tarkastelukohteena on matalien taajuuksien esiintyvyys. Etäisyyden ja sään vaikutukset matalien taajuuksien etenemiseen ovat huomattavasti vähäisemmät korkeisiin taajuuksiin verrattuna, joten Ympäristöministeriön ohje [29] ei täysin sovellu tämän tutkimuksen etäisyyden mittausepävarmuuden määrittämiseen. Lisäksi useampi mittaus olisi pidentänyt mittauksien kokonaisajankohtaa kohtuuttomasti. Pidempi mittauksijankohda ei sopinut helikopterin lentotehtävän aikaraameihin eikä mittauksia ollut tutkimuksen luonteesta johtuen tarkoituksenmukaista suorittaa eri päivinä.

Ympäristöministeriö määrittää ohjeessaan [29] mittausoloja koskevat vaatimukset:

Taulukko 3. Mittausoloja koskevat vaatimukset [29, s. 22]

Ei sadetta
Tuulen nopeus korkeintaan 5m/s mitattuna vähintään 2m:n korkeudella
Tuulen suunta melunlähteestä mittauspisteeseen päin suunnilleen sektorissa $\pm 45^\circ$ (vaatimus koskee yli 30m:n mittauksijankohda)
Taustamelun aiheuttama äänitasoindikaatio vähintään alle 10dB alle mitattavan äänitason
Äänitasomittarin tarkkuusluokka 2 tai parempi (1 tai parempi jos tulosten epävarmuudella $(\Delta L) = 2dB$)

Mittausten aikana vallitsevat sääolosuhteet (Liite 7) eivät olleet poikkeavat ja sopivat tutkimuksen skenaarioon. Näin ollen sään vaikutukset voidaan ohjeen [29] mukaan jättää huomioimatta. Näin ollen tarkasteltavaksi jää taustamelu ja äänitasomittarin tarkkuusluokka. Mikrofonin tarkkuusluokan soveltuminen todettiin luvussa 3.3, joten tarkasteltavaksi jää taustamelun vaikutus.

Taustamelun huomioiminen aiheuttaa 0,5dB virheen mittaukseen, mikäli taustamelu on 10dB alhaisempi melunlähteeseen verrattuna. Jos taustamelu on 20dB alhaisempi kuin melunlähde, sen huomioiminen aiheuttaa merkityksettömän 0,1dB virheen mitattuun tulokseen. [24, s. 82] Ensimmäisessä mittausvaiheessa nosto-oven ollessa kiinni hallin takimmaisena, eli äänilähteestä kaukaisimman mittauspisteen painottamaton ekvivalenttiäänitaso oli 92,3dB. Hallin taustamelu ilman äänilähdettä oli 59,9dB. Taustamelun aiheuttama virhe voidaan huomioida mittausarvossa laskemalla korjattu arvo: $L(korjattu)$, joka saadaan, kun vähennetään taustamelun $L(taustamelu)$ arvo melun lähteen aiheuttamasta keskiäänitasosta $L(mitattu)$. [24, s. 82]

$$L(korjattu) = 10 \log_{10} \left(10^{\frac{L(mitattu)}{10}} - 10^{\frac{L(taustamelu)}{10}} \right)$$

Näin ollen 59,9dB taustamelulla $L(korjattu) = 92,29$ dB. Taustamelun vaikutus tutkimustuloksiin voidaan todeta merkityksettömäksi. Vallitsevien mittausepävarmuuksien analysoinnin jälkeen mittauksia voidaan pitää kokonaisuudessaan luotettavina.

3.6. Yhteenveto

Mittaamisen valmisteluissa, käytännön suoritteissa ja dokumentaatioissa pyrittiin noudattamaan mahdollisimman hyvää mittauskäytäntöä niiltä osin, kun se tutkimukseen soveltui. Hyvän mittaamisen periaatteet selvitettiin alan kirjallisuudesta ja ohjeista. Kansalliset ohjeet melun mittauksista tukivat mittauksen suunnittelua ja sen dokumentointia, mutta eivät ohjeena soveltuneet täysin tähän tutkimukseen. Selkeyden ja toistettavuuden vuoksi tutkimuksen mittausvaiheet, yleisjärjestelyt, olosuhteet ja mittalaitteasetukset pyrittiin esittämään pääluvussa 3 mahdollisimman tarkasti. Kyseisillä järjestelyillä taattiin tutkimuksen mahdollisimman korkea reliaabelius eli ei-sattumanvaraisuus [25, s. 213]. Yksityiskohtaisen dokumentoinnin tarkoituksena oli myös mahdollistaa tutkimustulosten tarpeen mukainen uudelleentarkastelu.

Tutkimuksen johtoajatuksena ei ollut melun mittaaminen sen määritelmän mukaisessa merkityksessä. Tästä syystä mittausepävarmuuksien minimoiminen melunmittausohjeiden mukaisesti ei täysin soveltunut tähän tutkimukseen. Mittausten aikana epävarmuustekijät pyrittiin hallitsemaan mittauksiin soveltuvilla, kalibroiduilla ja sertifioiduilla mittalaitteilla, sekä aiheeseen koulutetulla henkilöstöllä. Johdonmukaiset mittausjärjestelyt, mittausepävarmuuksien huomiointi ja mittauksia varten esiasetettu laitteisto mahdollistivat onnistuneet ja luotettavat mittaukset.

4. MITTAUSTULOKSET

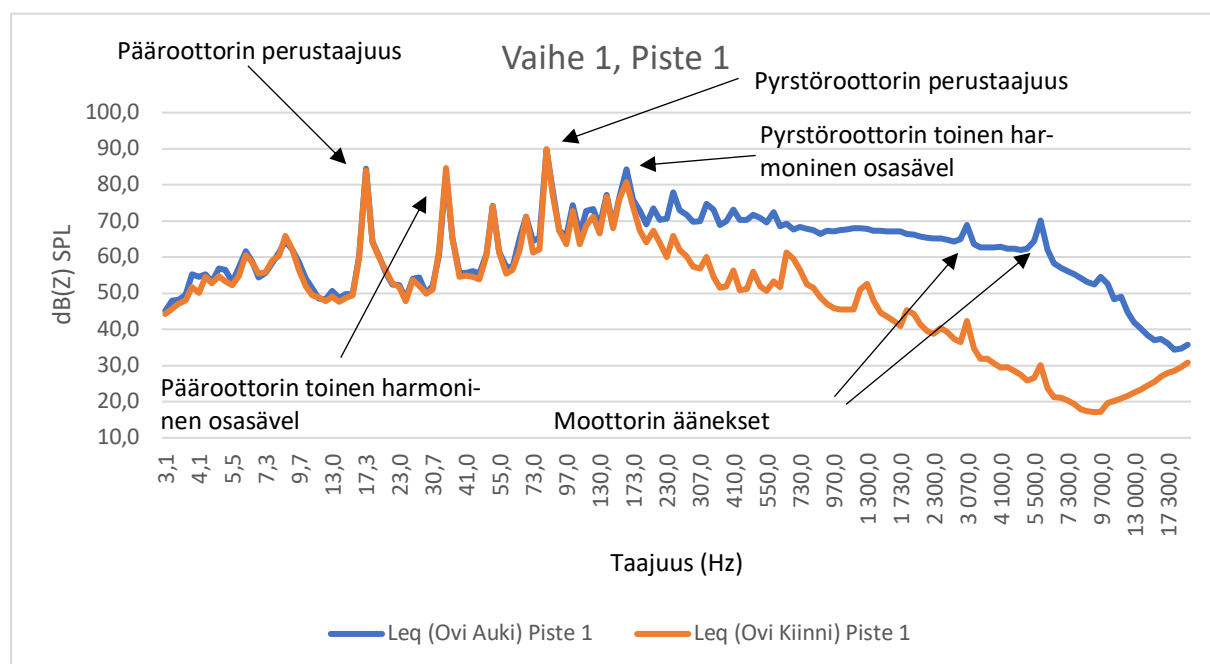
4.1. Yleistä

Varsinaisten mittaussuoritteiden jälkeen analysoijan mittausdata purettiin erillisiksi Excel-tiedostoiksi. Numeerisesta datasta pyrittiin laatimaan mahdollisimman selkeästi mitattuja ilmiötä havainnollistavat kaaviot. Tuloksia pyritään esittämään, analysoimaan ja jäsentämään tutkimuskysymysten avulla pelkän mekaanisen taulukoinnin sijaan. Kaavioiden analysointi tapahtuu jokaisen vaiheen kohdalla alatutkimuskysymysten kautta seuraavassa järjestyksessä:

- 1) 0-20Hz:n tarkastelu
- 2) 20 – 20000Hz:n tarkastelu
- 3) Mittauspisteen sijainnin (kuva 18) vaikutuksen sekä nosto-oven vaikutuksen tarkastelu.

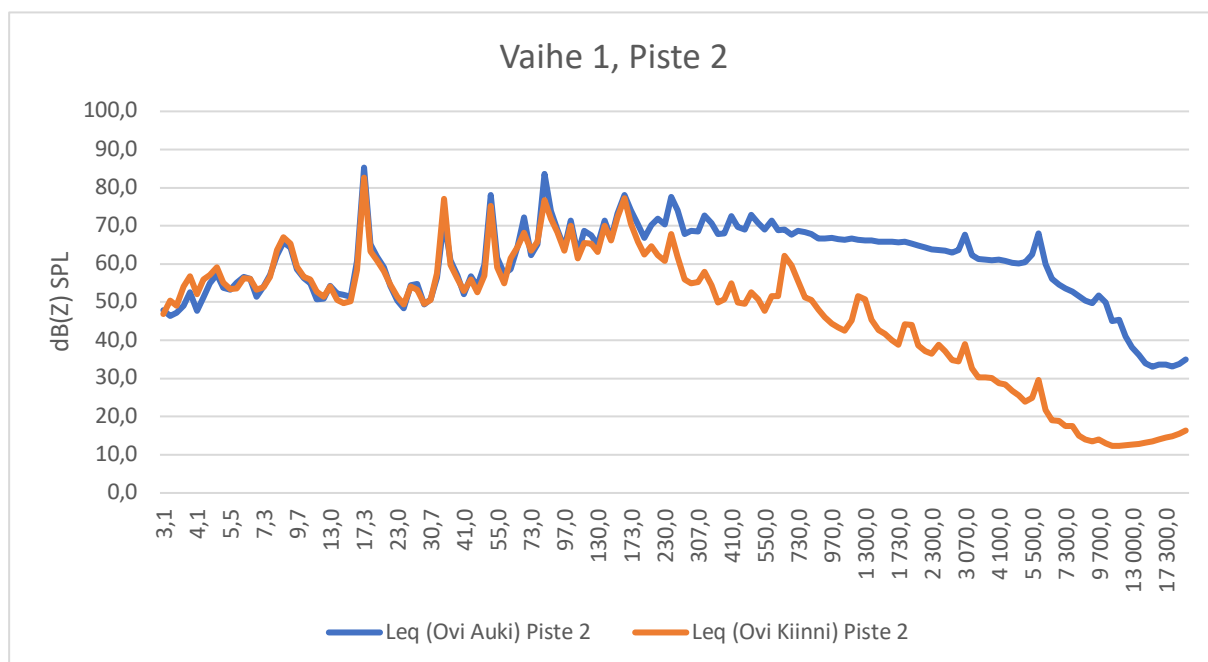
Kaikista kaavioista on selkeästi eroteltavissa voimakkaimmat perustaajuudet sekä niiden harmoniset osasävelet. Kaavioissa tarkastellaan äänenvoimakkuuden eroja kahdella eri arvoaksella: nosto-ovi kiinni ja auki. Seuraavissa tuloksia analysoivissa kappaleissa esitetyt äänenvoimakkuudet muodostuvat voimakkaamman arvoakselin dB-arvosta, mikäli ei toisin mainita. Tulokset on esitetty lineaarisella dB(Z) suodatuksella.

4.2. Vaihe 1: Mittaukset helikopterin ollessa konepaikalla



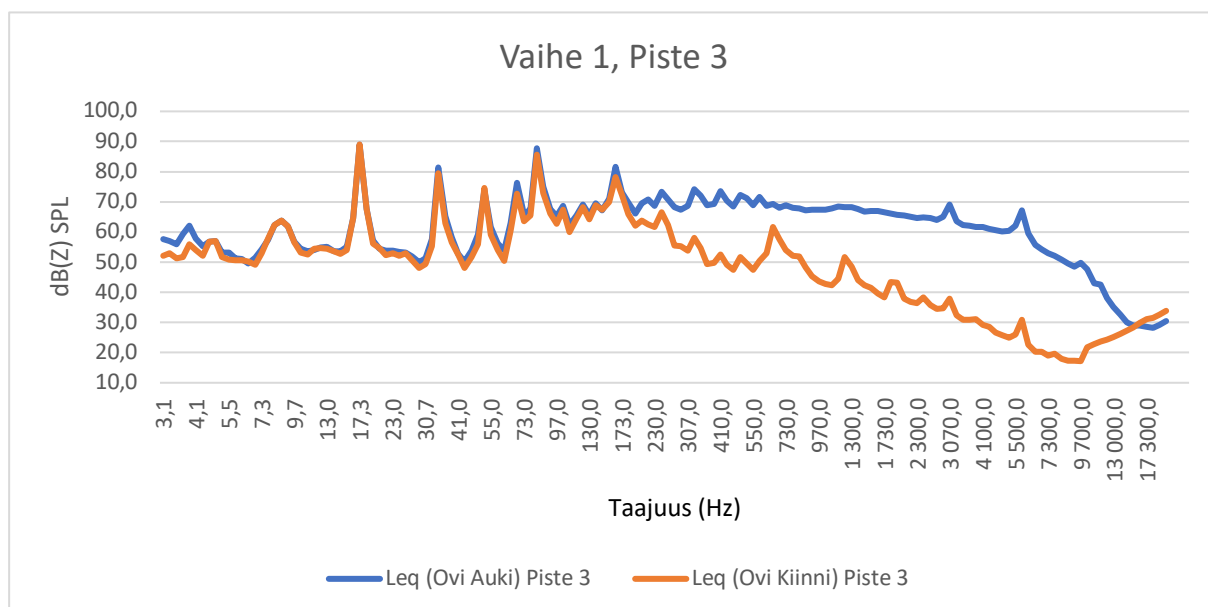
Kaavio 2. Vaihe 1, Piste 1 ja tunnistetut äänekset

- 1) Alle 20Hz:n taajuudet saavuttavat huippuarvonsa 61,9dB taajuudella 9,2Hz ennen selkeästi erottuvaa pääroottorin perustaajuutta. Alle 20Hz:n matalat taajuudet korostuvat pääroottorin perustaajuudella 17,3 Hz, jonka voimakkuus on ensimmäisessä mittauspisteessä 84dB.
- 2) Pääroottorin perustaajuuden toinen harmoninen osasävel esiintyy perustaajuutta hieman voimakkaampana 84,7dB, taajuudella 34,5Hz. 52Hz:n taajuudella 74dB:n voimakkuudella esiintyvä äänes aiheutuu pääroottorin perustaajuuden ja toisen osasävelen keskinäisestä modulaatiosta. Pääroottorin aiheuttamien äänesten jälkeen spektrin voimakkain 89,9dB:n äänes muodostuu pyrstöroottorin perustaajuudella 82Hz. Pyrstöroottorin toisen harmonisen osasävelen korostuminen näkyy selkeästi taajuudella 163Hz, 84,3dB:n voimakkuudella. Pyrstöroottori muodostaa selkeät osasävelet taajuuksille 690Hz voimakkuudella 59,6dB sekä 1379Hz 48dB. Kaksi selkeää voimakkuuden korostumaa 3070Hz:n ja 8400Hz:n taajuuksilla epäillään aiheutuvan moottoreista. 9700Hz:stä korkeampiin taajuuksiin kasvavan amplitudin oletetaan johtuvan hallin ilmastointi- tai sähkölaitteista.
- 3) Erittäin matalien 3,1-7Hz:n taajuuksien osalta taulukoissa esiintyvät voimakkuusvaihtelut saattavat johtua mittausepävarmuuksista, sillä vaihtelut ovat pieniä eivät noudattele selkeää säännönmukaisuutta. Nosto-oven vaimentava vaikutus alkaa selkeästi 194Hz:n kohdalla. Nosto-ovi vaimentaa korkeampia taajuuksia aina 9700Hz:n asti, jonka jälkeen helikopterin ääni vaimenee korkeiden taajuuksien osalta sekoittuen helikopterihallin ilmastointi- tai sähkölaitteiden taustakohinaan. Ensimmäisessä mittauspisteessä nosto-ovella ei ole havaittavaa merkitystä roottorien perustaajuuksien voimakkuuteen.



Kaavio 3. Vaihe 1, Piste 2

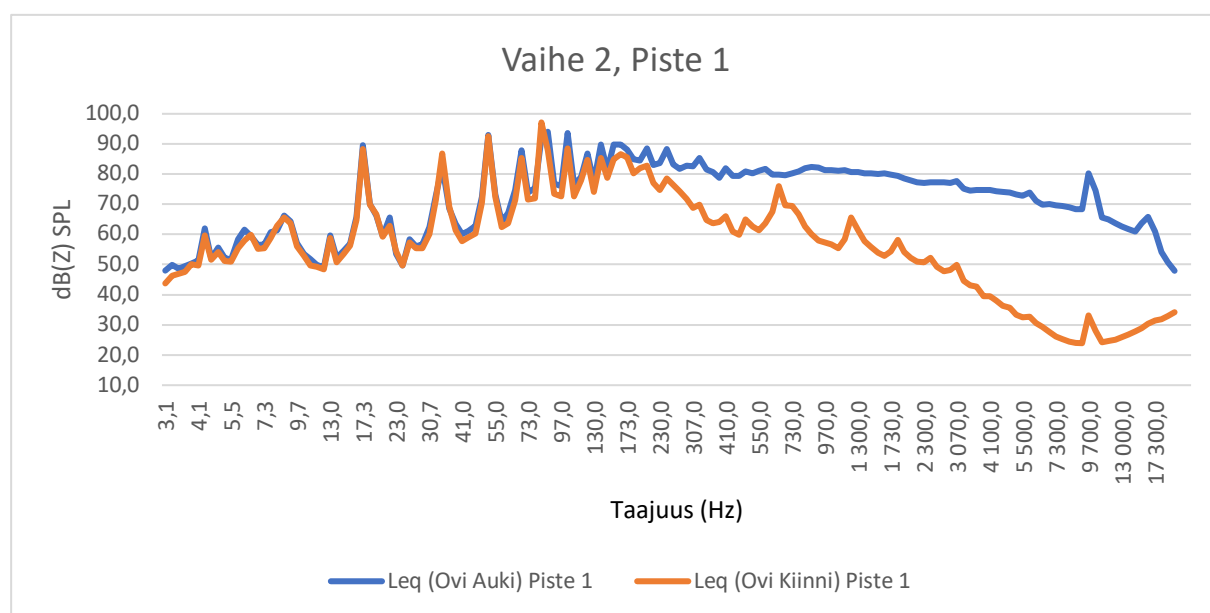
- 1) Pääroottorin perustaajuutta matalammat taajuudet saavuttavat voimakkuusarvon 67dB taajuudella 8,7Hz. Pääroottorin perustaajuus saavuttaa 85,3dB:n voimakkuuden 17,3Hz:n taajuudella.
- 2) Pääroottorin toinen harmoninen osasävel esiintyy perustaajuutta selkeästi vaimeampana 77dB, taajuudella 34,5Hz. Modulaatiosta aiheutuva 52Hz:n äänes voimistuu 78,1dB:iin. Pyrstöroottorin perustaajuus on voimakkaimmillaan 83,5dB muodostaen loogisesti vaimenevat osasävelet. Epäillyt moottorista aiheutuvat, edelleen selkeästi erottuvat äänekset esiintyvät taajuuksilla 3070Hz ja 5800Hz voimakkuuksilla 67,6dB ja 68,1dB.
- 3) Toisessa mittauspisteessä nosto-oven käytöllä on ensimmäistä pistettä suurempi 2,7dB vaimentava vaikutus Pääroottorin perustaajuuteen. Pääroottorin toinen osasävel vaimenee ensimmäistä mittauspistettä selkeästi enemmän 77dB:iin. Nosto-oven tehokas vaimennus alkaa noin 194Hz:stä ylöspäin. Mittauspisteessä 2 pyrstöroottorin perustaajuuden voimakkuus vaimenee selkeästi pisteeseen 1 verrattuna. Tämän oletetaan johtuvan huoneresonansseista.



Kaavio 4. Vaihe 1, Piste 3

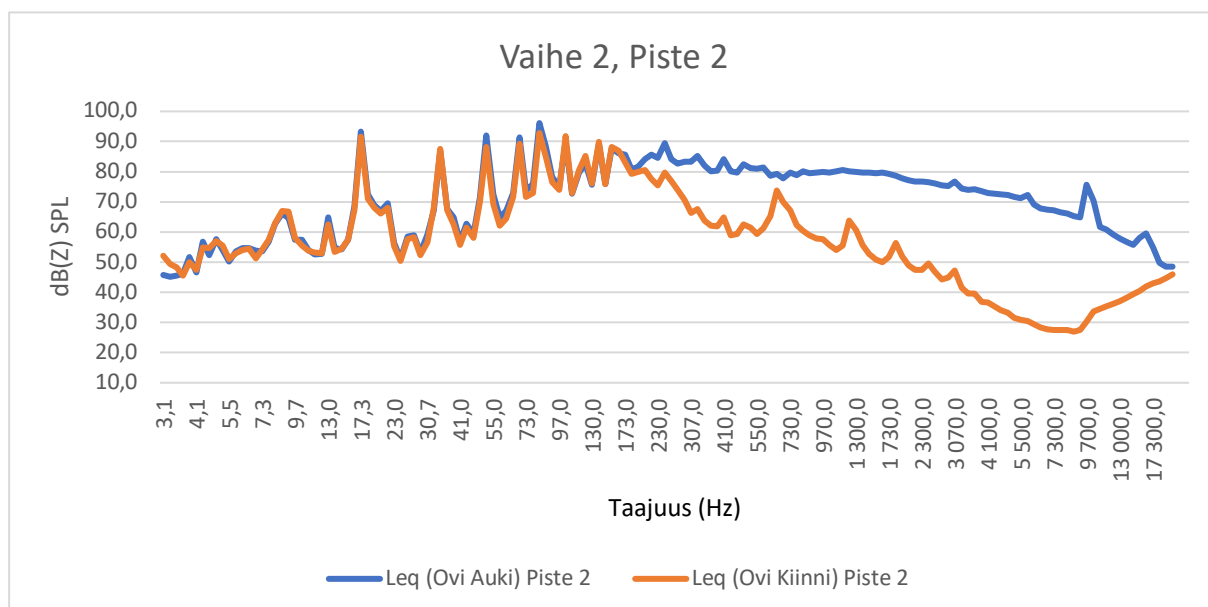
- 1) Kolmannessa mittauspisteessä 3,9Hz:n äänes esiintyy lähes yhtä voimakkaana 62,0dB viereiseen 8,7Hz:n 63,7dB äänekseen verrattuna. Pääroottorin perustaajuus saavuttaa 89dB voimakkuuden.
- 2) Pääroottorin toinen harmoninen osasävel esiintyy kolmannessa mittauspisteessä voimakkuudella 81,4dB, taajuuden pysyessä muuttumattomana. Pääroottorin toinen harmoninen osasävel on voimakkuudeltaan 79dB. Pyrstöroottorin perustaajuus saavuttaa 87,7dB:n voimakkuuden ja toinen harmoninen osasävel 81,6dB:n voimakkuuden. Korkeampien taajuuksien osalta voimakkuudet säilyvät lähes samanlaisina oletettujen moottoriäänesten ollessa 69dB 3070Hz ja 67,1dB 5800Hz.
- 3) Kolmas mittauspiste sijaitsee hallin perimmäisen seinän läheisyydessä ja näin ollen voidaan olettaa matalien taajuuksien korostuvan akustiikasta johtuen. Mittauspisteessä pääroottorin perustaajuus kasvaa lähes 90dB:iin. Myös harmoniset osasävelet ovat voimakkaampia muihin mittauspisteisiin verrattuna. Myös pyrstöroottorin perustaajuus esiintyy voimakkaampana mittauspisteeseen 2 verrattuna, mutta ei ole yhtä voimakas, kun mittauspisteessä 1. Muiden mittauspisteiden tavoin oven vaimentava vaikutus alkaa noin 194Hz:n taajuudella. 15400Hz kohdalla mittauskäyrien risteymä johtunee siitä, kun sähkö- tai ilmastointilaitteiden korkeat taajuudet pääsevät paremmin heijastelemaan hallin sisätiloissa nosto-oven ollessa kiinni. Kyseiset taajuudet korostuvat kolmannessa mittauspisteessä, sillä hallin perällä sijaitsee paljon sähkökeskuksia ja ilmastointiputkia.

4.3. Vaihe 2: Mittaukset helikopterin ollessa rullausviivalla hallin edessä



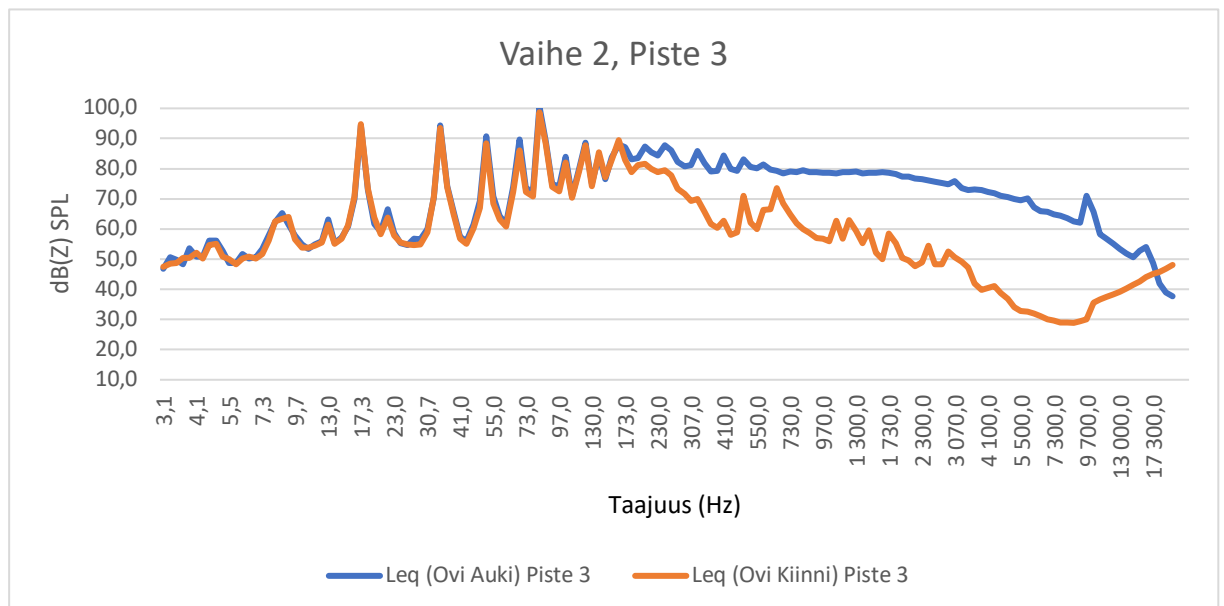
Kaavio 5. Vaihe 2, Piste 1

- 1) Toisessa vaiheessa selkeästi erottuvat matalataajuiset äänekset saavuttavat voimakkuudet 61,9dB, taajuudella 4,3Hz, 61,5dB taajuudella 6,1Hz ja 63,8dB taajuudella 8,7Hz. Pääroottorin perustaajuus saavuttaa voimakkuuden 89,7dB.
- 2) Pääroottorin perustaajuuden ja toisen osasävelen keskinäisenä modulaationa aiheutuva 52Hz:n äänes saavuttaa 92,5dB voimakkuuden. Pyrstöroottorin perustaajuus saavuttaa 97,1dB voimakkuuden. Korkeammilla taajuuksilla erottuu selkeästi uusi tuntematon äänes 9700Hz 80dB. Äänksen korkea taajuus ja taajuuden verrannollisuus kierrosnopeuteen antaa aiheen olettaa äänksen aiheutuvan moottorista.
- 3) Mitattu kokonaisäänitaso kasvaa huomattavasti helikopterin ja mittauspisteiden välisen etäisyyden pienentyessä. Matalat taajuudet esiintyvät myös selkeästi voimakkaampina vaiheeseen 1 verrattuna. Poikkeuksellista muihin tuloksiin verrattuna on kuitenkin pääroottorin perustaajuuden ja toisen osasävelen muodostaman modulaation voimakkuus. Voimakkuus ylittää pääroottorin perustaajuuden ja sen toisen osasävelen voimakkuuden. Yli 80Hz:n taajuuksien äänekset erottuvat selkeästi voimakkaampina 1 vaiheeseen verrattuna. Nosto oven vaimennusvaikutus taajuuksiin käyttäytyy vaihetta 1 vastaavalla tavalla. Nosto oven ollessa auki, oletetut moottorin äänekset taajuuksilla 3070Hz ja 5800Hz hukkuvat lähes täysin hallissa nousseeseen äänitasoon.



Kaavio 6. Vaihe 2, Piste 2

- 1) Ensimmäinen matalataajuuksinen selkeästi erottuva äänes 9,2Hz on voimakkuudeltaan 66,8dB. Pääroottorin perustaajuus on voimakkuudeltaan 93,9dB ja ensimmäinen osasävel 87,6dB.
- 2) Modulaation tuloksena syntynyt 52Hz:n äänes on voimakkuudeltaan 92dB. Pырstöroottorin perustaajuus on voimakkuudeltaan 96,1dB. Vaiheessa 2 esiintyvä korkeataajuuksinen 9700Hz:n äänes on voimakkuudeltaan 75,6dB.
- 3) Mittauspisteen sijainti kasvattaa pääroottorin perustaajuuden voimakkuutta noin 3,6dB:llä. Muiden ääneksien voimakkuuteen mittauspisteen sijainnilla ei ole juurikaan merkitystä mittauspisteeseen 1 verrattuna. Nosto-oven vaikutus taajuusalueiden vaimennukseen noudattelee edellisissä mittauksissa esiintynyttä trendiä.

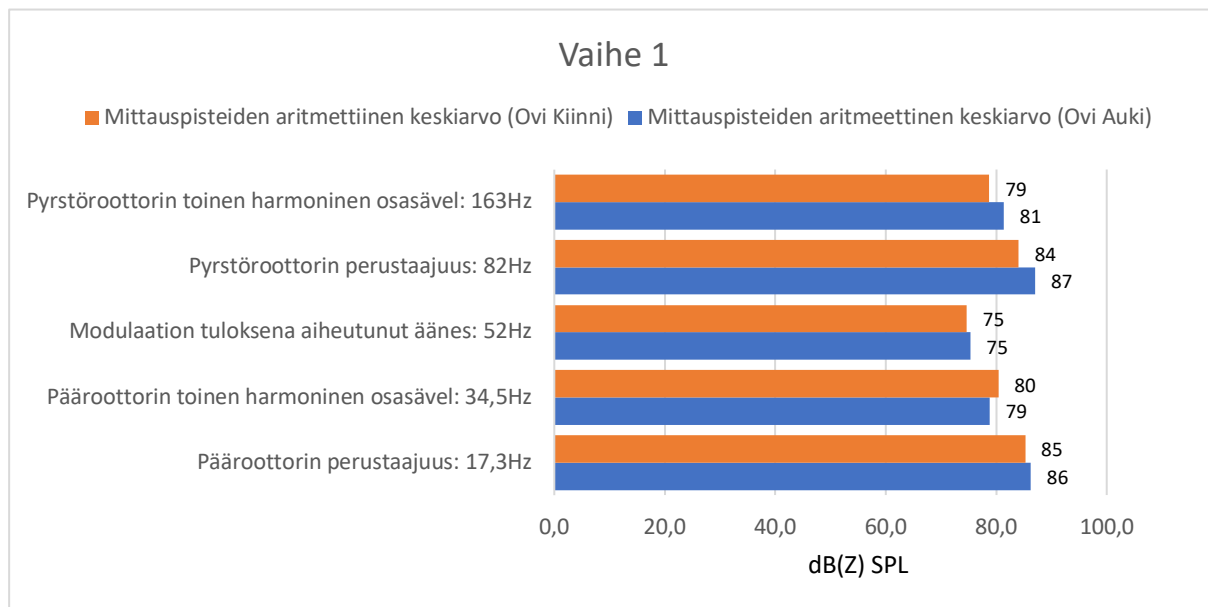


Kaavio 7. Vaihe 2, Piste 3

- 1) Mittauspisteessä 3 ensimmäinen selkeästi erottuva 9,2Hz:n äänes saavuttaa voimakkuuden 66,8dB ja pääroottorin perustaajuus voimakkuuden 94,8dB.
- 2) Pääroottorin toinen osasävel on voimakkuudeltaan 94,3dB ja moduloitu äänes 90,7dB. Pääroottorin kolmas osasävel, 69 Hz, on loogisesti edeltäjiään vaimeampi voimakkuudella 89,6dB. Mitattu äänenvoimakkuus kasvaa ensimmäistä kertaa yli 100dB:n pyrstöroottorin perustaajuudella arvolla 100,8dB toisen osasävelen vaimentuessa 89,4dB: iin. Oletettu moottorista aiheutuva 9700Hz:n äänes on voimakkuudeltaan 71dB.
- 3) Hallin perällä olevassa mittauspisteessä nosto-ovella ei ole juurikaan vaikutusta alle 194Hz:n taajuuksien voimakkuuteen. Nosto ovi vaimentaa korkeat taajuudet samalla tavalla, kun muissakin mittauspisteissä. Äänekset vaimentuvat loogisesti perustaajuiden ollessa osasäveliä voimakkaampi. Pää- ja pyrstöroottorin äänekset esiintyvät vaiheen 1 tapaisesti voimakkaampina muihin mittauspisteisiin verrattuna.

4.4. Yhteenveto

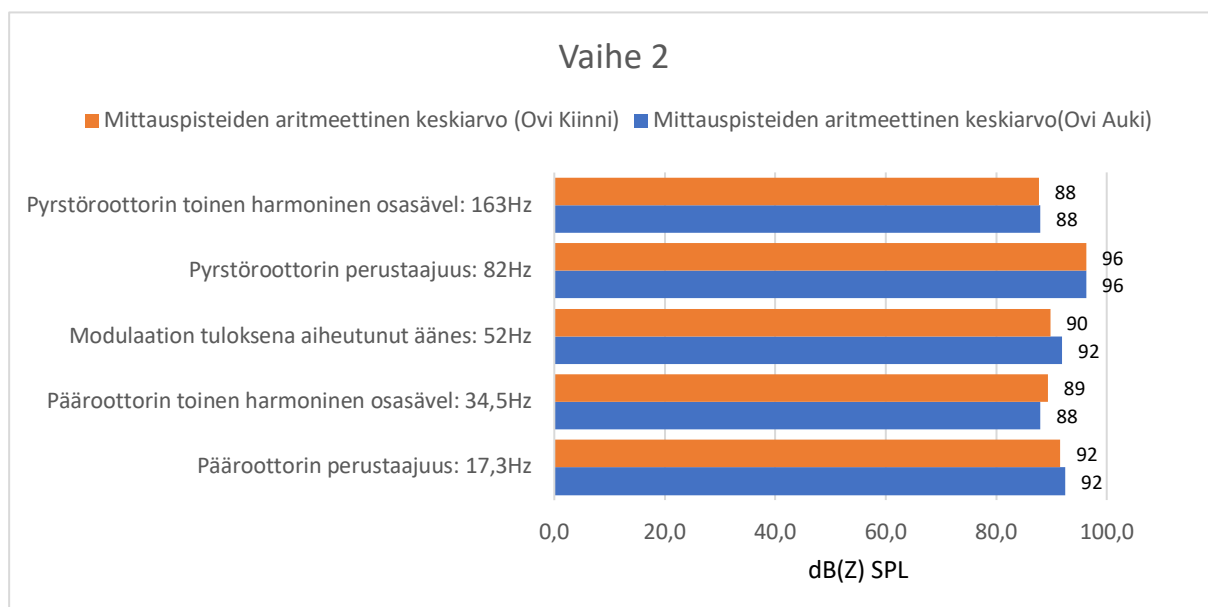
Mittaustuloksista ilmenee pää- ja pyrstöroottorin aiheuttavan voimakasta, pääsääntöisesti yli 80dB:n värähtelyä halliin. Molemmissa mittausvaiheissa pää- ja pyrstöroottorin perustaajuuksien voimakkuudet ylittävät 80dB hallin sisäpuolella (kaaviot 8 ja 9).



Kaavio 8. Perustaajuuksien voimakkuudet vaiheessa 1.

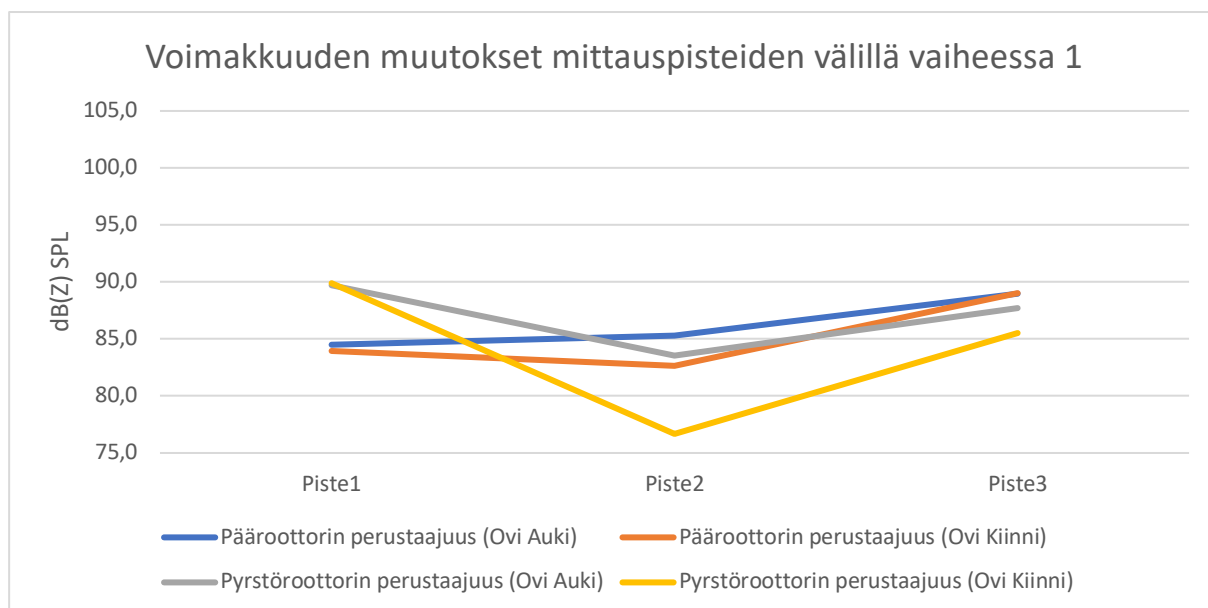
Vaiheessa 2 (Kaavio 9) jokainen tarkasteltava alle 100Hz:n matalataajuuksinen äänes ylittää 80dB:n voimakkuuden hallin sisällä. Pyrstöroottorin voimakkuus selvästi voimakkain ja hallitseva lyhyeltä etäisyydeltä. Kautta linjan pyrstöroottorin melutaso on lähes samaa luokkaa tai suurempi kuin pääroottorin.

Pää- ja pyrstöroottorin värähtelyjen aallonpituuksien fyysisten ominaisuuksien takia nosto-ovella ei ole vaimentavaa vaikutusta. Käytännössä nosto-ovi vaimentaa tehokkaasti taajuuksia vasta noin 200Hz:stä ylöspäin. Korkeampien, yli 200Hz:n taajuuksien osalta selkeästi erottuvat äänekset aiheutuvat luultavasti moottoreista. Vaiheessa 2 oletetut moottorin äänekset kasvavat voimakkuudeltaan niin suuriksi, ettei nosto-ovi enää kykene vaimentamaan niitä.



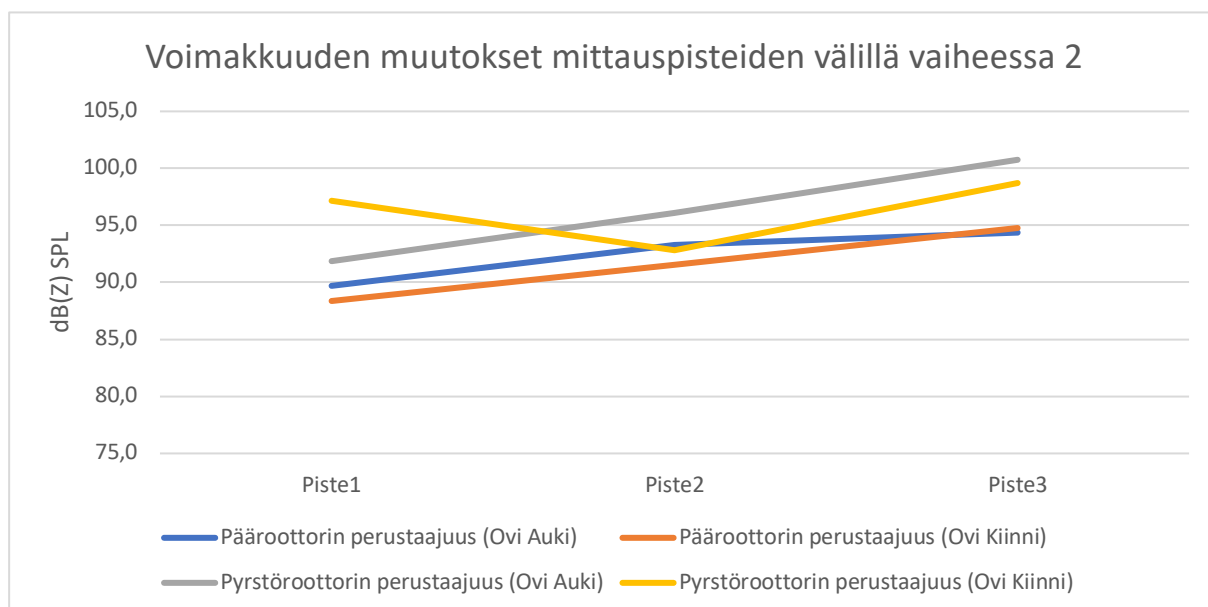
Kaavio 9. Perustaajuuksien voimakkuudet vaiheessa 2.

Tarkasteltavien perustaajuuksien voimakkuudet vaihtelevat selkeästi hallin eri mittauspisteiden välillä (kaavio 10). Perustaajuuksien fyysisistä ja hallin akustisista ominaisuuksista johtuen halliin syntyy voimakkaita huoneresonansseja.



Kaavio 10. Voimakkuuden muutokset vaiheessa 1.

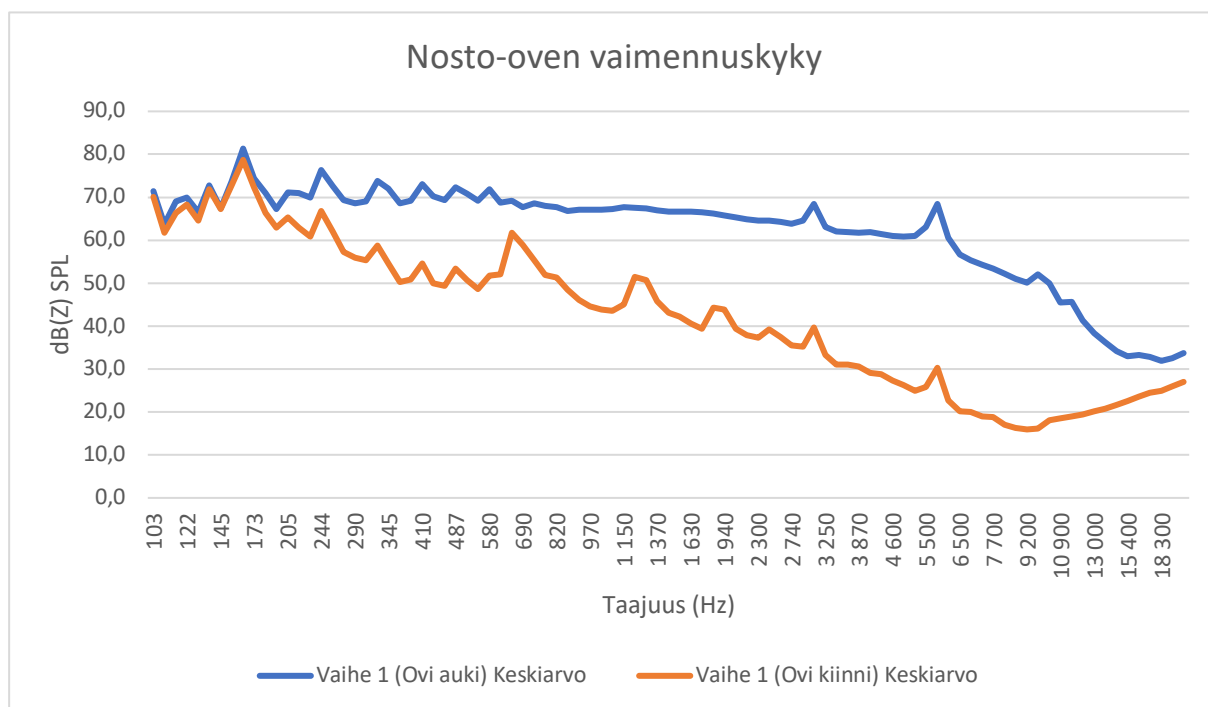
Vaiheessa 1 pääroottorin perustaajuus voimistuu, kun nosto-oven vierestä edetään kohti mittauspistettä 3, ilman merkittävää vaimennusvaikutusta nosto-ovesta. Pyrstöroottorin perustaajuus taas vaimenee hallin keskellä nosto-oven vahvistaessa vaimennusta. vaiheessa 1 pyrstöroottorin äänenvoimakkuus ei kasva selkeästi erillisestä huoneresonanssista johtuen (kaavio 10).



Kaavio 11. Voimakkuuden muutokset vaiheessa 2.

Toisessa mittausvaiheessa (kaavio 11) huoneresonanssien voimistava vaikutus näkyy selkeämmin, sillä myös pyrstöroottorin äänneksen voimakkuus kasvaa lineaarisemmin lähestyttäessä hallin perällä olevaa kolmatta mittauspistettä. Nosto-ovella on selkeä vaikutus pyrstöroottorin perustaaajuuteen ainoastaan sen ollessa suljettuna. Hallin perällä pyrstön ääni voimistuu oven viereiseen mittauspisteeseen verrattuna niin paljon, että ihminen aistii sen lähes kaksinkertaisena äänenvoimakkuuden kasvuna.

Nosto-oven rakenteesta johtuen se ei kykene vaimentamaan matalia taajuuksia. Mikäli nosto-oven vaimennuskykyä tarkastellaan mittauspisteiden aritmeettisella keskiarvolla, voidaan vaimennuskyvyn todeta alkavaksi noin 200Hz:n taajuusalueelta. 200Hz:n taajuusalueella nosto ovi vaimentaa helikopterin ääntä noin 3dB, joka vastaa äänen intensiteetin puolittumista.



Kaavio 12. Nosto-oven vaimennuskyky

Normaalitoiminnassa helikopterin ollessa käynnissä konepaikalla, nosto-oven vaimennuskyky mahdollistaa hallissa työskentelyn ilman merkittävää melualtistusta korkeampien taajuuksien osalta. Nosto-ovi ei kuitenkaan kykene vaimentamaan helikopterin voimakkaimpien äänilähteiden, eli roottorilapojen aiheuttamaa värähtelyä lainkaan. Nosto-oven vaimennuskyky on myös riittämätön korkeiden taajuuksien osalta mittausvaiheessa 2, jolloin moottorin tuottamat äänet läpäisevät nosto-oven (kaavio 12).

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen päämääränä oli tarkastella NH90-helikopterin aikaansaamaa matalataajuusvärähtelyä ja sen voimakkuuden muutoksia helikopterihalleissa. Tutkimuksen tavoitteena oli myös tarkastella värähtelyn mahdollisia vaikutuksia työsuojeluun. Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta helikopterin pää- ja pyrstöroottorin pyörimisestä muodostuvan matalataajuusvärähtelyn olevan mittauspisteiden välillä voimakkuudeltaan vaihtelevaa, voimakasta, äänenpaineeltaan yli 80dB:n värähtelyä. Osa voimakkaista värähtelyistä esiintyi infraäänialueella.

Ihmisen kuuloalueella (20Hz-20kHz) helikopterin tuottama äänenvoimakkuus jakautui spektrissä pyrstöroottorin perustaajuuden (82Hz) ja sen osasävelten muodostamiin ääneksiin sekä moottorin laajakaistaiseen äänisignaaliin. Laajakaistaisuudesta huolimatta moottorin äänisignaalista erottui kaksi erillistä äänestä (Kaavio 5) vaiheen 2 mittauksissa. Moottoreiden äänisignaali oli pyrstöroottorin perustaajuutta huomattavasti vaimeampi. Pienemmästä äänenvoimakkuudestaan huolimatta moottoreiden äänisignaalin korkeampi taajuusalue mahdollistaa sen, että moottoreiden ääni saatetaan helikopterin läheisyydessä kokea pyrstöroottorin ääntä voimakkaampana kuuloaistin herkkyysalueista johtuen. Mittauspiste- ja mittausvaihekohtainen yksityiskohtaisempi kuvaus äänenvoimakkuuden jakautumisesta 20Hz-20kHz taajuusalueella on luettavissa tulosluvun alaluvuista 4.1 ja 4.2 kohdista 2.

3,15Hz-20kHz:n taajuusalueella roottoreiden tuottama äänenvoimakkuus jakaantui pääroottorin infraäänistä pyrstöroottorin perustaajuuteen (4.1 ja 4.2 kohdat 2 ja 1) ja sen muodostamiin osasäveliin. Pääroottorin perustaajuus (17,5Hz) esiintyi infraäänialueella (Luvut 4.1 ja 4.2 kohdat 1), mutta sen osasävelet sijoittuivat ihmisen kuuloalueelle. Pääroottorin perustaajuuden ja osasävelten modulaatiot muodostivat ajoittain jopa pääroottorin perustaajuutta voimakkaamman 52Hz:n osasävelen. Helikopterin roottorilavat muodostivat voimakkaimman taajuussisällön mitatusta äänisignaalista taajuusalueella 3,15Hz-20kHz.

Merkittävänä havaintona voidaan pitää helikopterihallin nosto-oven puutteellista matalien taajuuksien vaimennuskykyä noin 200Hz:n asti (Kaavio 12). Helikopterin roottorilapojen värähtelyt pääsivät vaimentumatta hallin sisätiloihin huolimatta siitä, että nosto-ovi oli suljettu. Nosto-oven ollessa avoinna, korkeammat taajuudet pääsivät hallin sisätiloihin vaimentuen kuitenkin voimakkaasti ilma-absorption seurauksena. Hallin akustiset ominaisuudet ja nosto-oven puutteellinen vaimennuskyky aiheuttivat värähtelyjen paikallista voimistumista hallin sisätiloissa.

Mitatun värähtelyn laatu ja voimakkuus yhdistettynä helikopterihallin akustisiin ominaisuuksiin muodostavat työsuojelun näkökulmasta haastavan kokonaisuuden. Äänisignaalin ollessa jatkuvaa, se voimistuu matalien taajuuksien osalta voimakkaasti huoneresonansseista ja jälkikaiunnasta johtuen. Mittauspisteiden välillä äänenpainetasoissa esiintyi jopa yli 10dB muutoksia (Kaavio 10), jotka ihminen aistii kaksinkertaisena äänenvoimakkuuden kasvuna. Näin ollen samassa tilassa työskentelevien henkilöiden meluallistumäärät saattavat vaihdella suuresti. Pääroottorin perustaajuuden voimakkuus kasvoi siirryttäessä mittauspisteestä yksi, mittauspisteeseen kolme (kuva 18). Pyrstöroottorin perustaajuus voimistui myös hallin perällä mittauspisteessä kolme, mutta pääroottorin perustaajuudesta poiketen, se vaimeni huomattavasti hallin keskellä olevassa mittauspisteessä kaksi. Mittauspisteiden väliset voimakkuuden muutokset on kuvattu kaavioissa 10 ja 11.

Roottoreiden aikaansaamalta, kuuloaistin avulla havainnoidulta melulta voidaan suojautua käyttämällä työnantajan tarjoamia kuulonsuojaimia. Meluntorjunnan näkökulmasta haasteen muodostaa pääroottorin aiheuttama, kuuloalueen ulkopuolella esiintyvä infraääni, jonka ihminen aistii tuntoaistinsa avulla. Pääroottorin infraääni läpäisee tehokkaasti materiaalia aallonpituutensa takia. Näin ollen siltä suojautuminen on haastavaa tavanomaisin melunvaimennusmenetelmin. Pääroottorin värähtelyn voimakkuus vaihtelee kuitenkin suuresti hallin sisällä, joten työpisteen sijoittelulla voidaan hallita mahdollista meluallistusta. Lisäksi työsuojelutoimenpiteillä, kuten työskentelytilojen akustisella suunnittelulla sekä nosto-oven rakenneratkaisuilla saatetaan vähentää meluallistusta.

Työsuojelutoimenpiteiden tarpeen määrittää vahvasti henkilöstön mielipide helikopterin tuottamasta värähtelystä. Tämän tutkimuksen aineiston pohjalta voidaan laatia jatkotutkimuksia kartoittamaan työtiloissa esiintyvän melun suhdetta henkilöstön mielipiteisiin. Suurista värähtelyn voimakkuusarvoista johtuen, värähtelyn aiheuttamia mahdollisia negatiivisia terveysvaikutuksia ei voida sivuuttaa. Näin ollen matalataajuusvärähtely vaikuttaa olennaisesti työsuojeluun muodostaen jatkotutkimustarpeita värähtelyn terveysvaikutuksista ja mahdollisesta rakenteellisten ratkaisujen kartoittamisesta värähtelyn vaimentamiseksi.

Tutkimustulokset ovat hyödynnettävissä muun muassa työtilojen suunnittelussa sekä muissa työsuojeluun liittyvissä tutkimuksissa ja suunnitelmissa. Tutkimustulokset ovat yleistettävissä NH90-helikopterin taajuusisällön osalta.

LÄHTEET

- [1] AIP Suomi. EFUT-UTTI. 20.7.2017. Viitattu 8.11.2017
https://ais.fi/ais/aip/ad/efut/EF_AD_2_EFUT_EN.pdf
- [2] Airbus Helicopters Training Services. NH90-TFIA Flight Engineers CTT training course (NH90 lentotekniikan tyypikurssin koulutusmateriaali). 2017.
- [3] Aro, E. Tilaääni, 1 Painos. Helsinki: Riffi-Julkaisut. 2006. 192s. ISBN: 951-98245-6-1
- [4] Brixen, E. Audio Metering, Measurements, Standards and Practice. 2nd ed. Oxford: Focal Press, 2011. 263 s. ISBN 978-0-240-81467-4
- [5] Colby, D. Dobie, E. Leventhall, G. Lipscomb, D. McCunney, R. Seilo, M. Sondergaard, B. Wind Turbine Sound and Health Effects an Expert Panel Review. 2009. American Wind Energy Association & Canadian Wind Energy Association. Panelistiraportti. 80 s.
- [6] D, Howard. J, Angus. Acoustics and psychoacoustics. 4 painos. Oxford: Focal Press, 2009. 488s. ISBN: 978-0-240-52175-6
- [7] E. Blomberg, A. Lepoluoto. Audiokirja. 3 painos. Verkkojulkaisu. E. Blomberg & A. Lepoluoto. 2005. 240s.
- [8] Everest, F. Pohlman, K. Master Handbook Of Acoustics. 5 painos. New York: McGraw-Hill, 2009. 510s. ISBN: 978-0-07-160333-1
- [9] Gallou, B. Handbook for sound engineers, 4th ed. Oxford: Focal Press, 2008. 1777 s. ISBN 978-0-240-80969-4
- [10] GRAS Sound & Vibration A/S. GRAS 46AE ½” CCP Free-Field Standard Microphone Set. Viitattu 1.11.2017. <https://www.gras.dk/products/product/140-46ae>
- [11] Health protection agency. Health effects of Exposure to Ultrasound and Infrasound. Report of the independent advisory group on non-ionising radiation. 2010. 180s. ISBN: 978-0-85951-662-4
- [12] ISO 3746:2010 Acoustics — Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure — Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane. Geneva: International Organization for Standardization. 48s.

- [13] J. Tiihinen, O. Hänninen. Meluntorjunnan perusteet. 1 Painos. Kuopio: Ympäristöministeriö, Pohjois-Savon Ympäristökeskus, 1997. 97s. ISBN: 952-11-0583-6
- [14] Jauhiainen, T. Vuorinen, S. Heinonen – Guzejev, M. Ympäristömelun vaikutukset. Helsinki: Ympäristöministeriö, 2007. 80 s. ISBN 978-952-11-2563-8
- [15] K. Pesonen. Lentomelun vaikutuksista ja niihin liittyvistä tekijöistä. Finnavian julkaisusarja A, 2008. A 4/2008. 114s.
- [16] Laaksonen, J. Äänityön kivijalka. Helsinki: Riffi-julkaisut, 2006. 414 s. ISBN 951-98245-7-X
- [17] Lappalainen, E. Jormakka, J. Teknisen tutkimusmenetelmät maanpuolustuskorkeakoulussa. Julkaisusarja 5. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos, 2004. 203s. ISBN 951-25-1540
- [18] MIP Electronics Oy. Samurai – Helppokäyttöinen ohjelma melun ja värähtelyjen mittauksiin. Viitattu 1.11.2017. http://www.mip.fi/cms/images/stories/docs/melu_ja_aani/sinus-samurai-fi.pdf
- [19] MIP Electronics Oy. Sinus Soundbook Esite. Viitattu 1.11.2017. http://www.mip.fi/cms/images/stories/docs/melu_ja_aani/sinus-soundbook-fi.pdf
- [20] MIP Electronics Oy. Sinus Soundbook. Viitattu 1.11.2017. <http://www.mip.fi/cms/fi/mittalaitteet/melu-ja-aeaeni/fft-analysaattorit/sinus-soundbook>
- [21] Napoli, C. 2007. Tuulivoimaloiden syntytavat ja leviäminen. Helsinki: Ympäristöministeriö. 31s. Suomen ympäristö 4. ISBN 978-952-11-2585-0.
- [22] Olive Tree Labs Suite. Valmistajan kotisivu. Viitattu 15.2.2018. <https://www.mediterraneanacoustics.com/olive-tree-lab-suite.html>
- [23] Pesonen, K. Ympäristömelun vaikutuksista sekä vaikutuksien arvioinnista ja hallinnasta. Helsinki: Ympäristöministeriö, 2014. 145 s. ISBN 978-952-11-4271-0
- [24] R, Barron. Industrial Noise Control and Acoustics. 1 painos. New York, Marcel Dekker Inc, 2003. 525s. ISBN: 0-8247-0701-X
- [25] S.Hirsijärvi, P, Remes, P, Sajavaara. Tutki ja kirjoita. 6.-9. painos. Helsinki: Tekijät ja Kirjayhtymä Oy, 1997. 430s. ISBN 951-26-4618-8
- [26] Vilka, H. Tutki ja mittaa. 1 painos. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi, 2007. 189s. ISBN 9789512656417

- [27] Väätäinen, S. Kuulolla! Opas kuulontutkimuksesta sosiaali- ja terveysalan ammattilaisille. 1 Painos. Helsinki: Edita Prima Oy, 2005. 120s. ISBN: 951-37-4282-2
- [28] Yerkes, R. Dodson, J. The relation of strenght of stimulus to rapidity of habit formation. The journal of comparative neurology and psychology, 1908. Volyymi 18. Numero 5. Sivunumerot 459-482.
- [29] Ympäristöministeriö, Ympäristömelun mittaaminen. Ympäristöministeriön ympäristönsuojeluosaston ohje 1/1995. 82s. ISSN: 0788-592-X
- [30] Ympäristöministeriö. Tuulivoimaloiden melutason mittaaminen altistuvassa kohteessa. Ympäristöhallinnon ohjeita 4, 2014. Numero 4. 66s. ISSN: 1769-1653

LIITTEET

Liite 1. Laser-etäisyysmittarin kalibrointi



Liite 2. Mikrofonijärjestelmän järjestelyt



Liite 3. GRAS-mikrofonin tekniset ominaisuudet

46AE Microphone Set with TEDS

The 46AE is based on a 40AE Prepolarized Free Field Microphone. The microphone complies with the requirements in IEC Standard 61094-4, and can be used for measurements according to IEC Standard 651 Type 0 and Type 1. This microphone is combined and calibrated with a 26CA preamplifier. The microphone unit is CCP driven which is ICP[®] compatible (CCP = Constant Current Power).

The free-field microphone is designed to essentially measure the sound pressure, as it existed before the microphone was introduced into the sound field. At higher frequencies the presence of the microphone itself in the sound field will change the sound pressure. In general the sound pressure around the microphone cartridge will increase due to reflections and diffraction. The free-field microphone is designed so that the frequency characteristics compensates for this pressure increase.

The resulting output of the free-field microphone is a signal proportional to the sound pressure, as it existed before the microphone was introduced into the sound field. The free-field microphone should always be pointed towards the sound source ('0° incidence'). In this situation the presence of the microphone diaphragm in the sound field will result in a pressure increase in front of the diaphragm. The microphone is then designed so that the sensitivity of the microphone decreases with the same amount as the acoustical pressure increases in front of the diaphragm. This is obtained by increasing the internal acoustical damping in the microphone cartridge. The result is an output from the microphone, which is proportional to the sound pressure as it existed before the microphone was introduced into the sound field.

(ICP is a trademark of PCB Piezotronics Inc.)

Specifications

Nominal Sensitivity :
at 250 Hz 50 mV/Pa

Frequency Response:
±2 dB 3.15 Hz - 20k Hz
±1 dB 5 Hz - 10 kHz

Power Supply (CCP):
2 - 20 mA (4 mA typical)

Dynamic Range:
From: 14 dBA re. 20 µPa
To: 135 dB re. 20 µPa

Output Impedance (Cs = 20 pF, f = 1000 Hz):
<50 ohm

Maximum Output Voltage Swing (Peak):
±8 V

Temperature Range:
-30 to +60°C

Length:
84.0 mm

Diameter:
With Protection Grid 13.2 mm
Without Protection Grid 12.7 mm

Weight:
33 g

Microphone Capsule Specific Data:

Nominal Cartridge Capacitance:
Polarized 20 pF

Resonance Frequency:
90° Phase shift 14 kHz

Effective Front Volume:
Nominal at 250Hz 50 mm³

Static Pressure Coefficient:
250Hz at 25°C -0.008 dB/kPa

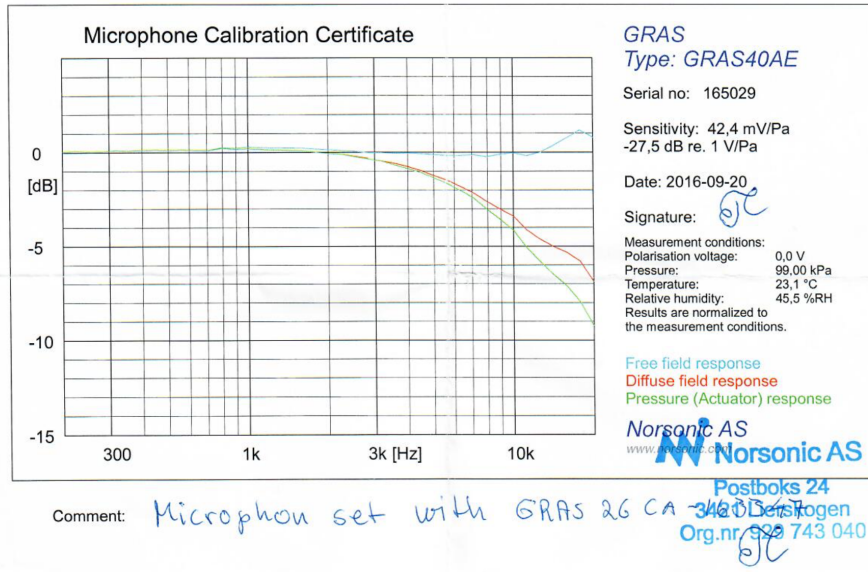
Mean Temperature Coefficient:
-10 to +50°C 0.01 dB/°C

IEC 61094-1 Type Designation:
LS2F

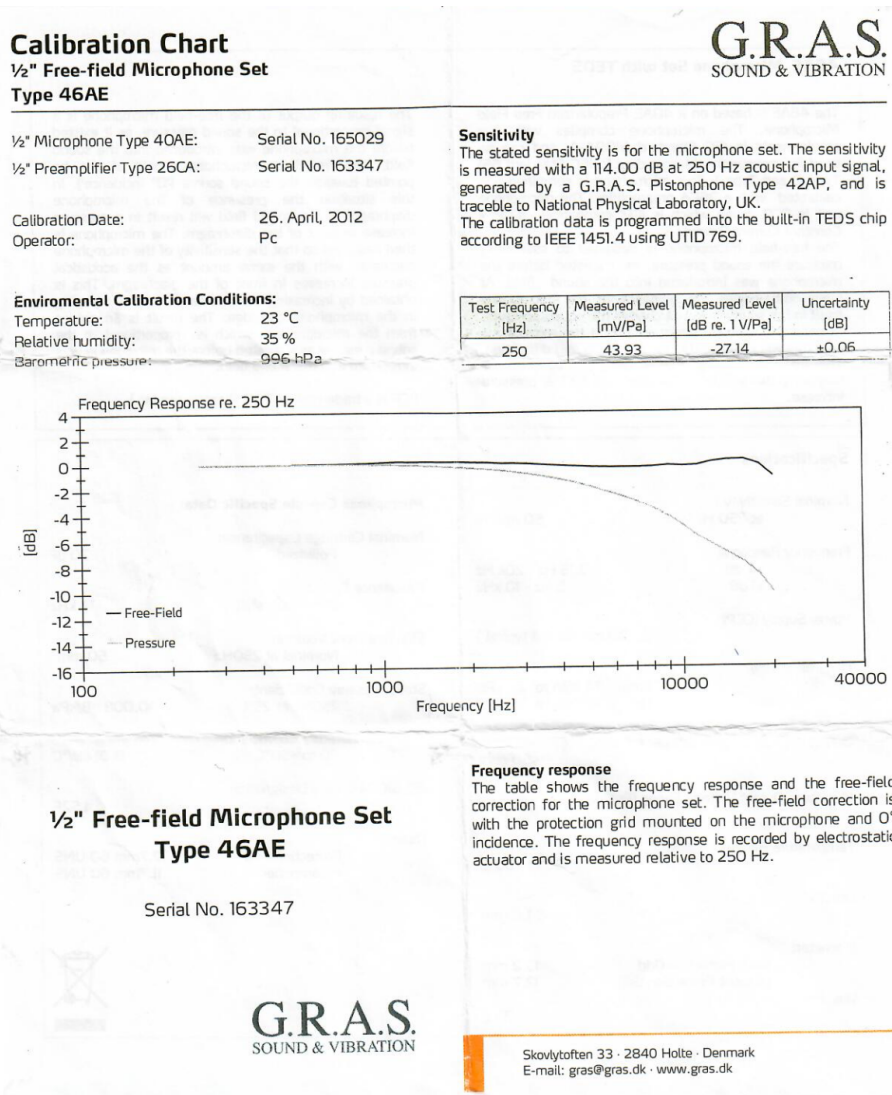
Thread:
Protection Grid 12.7mm 60 UNS
Preamplifier 11.7mm 60 UNS



Liite 4. GRAS-mikrofonin kalibroitodistuksen skannaus A-puoli



Liite 5. GRAS-mikrofonin kalibroitodistuksen skannaus B-puoli





SINUS Messtechnik GmbH
Föppelstrasse 13
D-04347 Leipzig, Germany
☎ +49 341 24429 0
✉ +49 341 24429 99
🌐 <http://www.sinusmess.de>

Manufacturer Test for Device

HARMONIE quadro (mPCI 02041802)

Serial Number: #06053

This device was tested according ISO 61672, ISO 60651 and the internal test specifications of the SINUS Messtechnik GmbH.

Date:	18-May-2017
Recommended Interval:	24 months
Next Manufacturer Test:	May-2019
Operator:	TUL
Signature:

Liite 7. Mittauspäivän säätiedot

Saunalahti 4G 13.05 25 %

< Uusi Ryhmä (9) UTI-EFUT Muokkaa

Utti
SUOMI
Paikallista Aikaa: 13.04 (21.)
UTC: 10:04 (21.)
3.36
22.50
Kaikki ajat paikallisaikoja

METAR klo: 12:50 LT (21.) **VFR**
14 minuuttia vanha

Tuuli: 290° (WNW) 10 solmua
vaihtelee välillä 250 ja 350

Näkyvyys: 10 km tai enemmän

Sää: heikkoa kuuroja sadetta

Pilvet: vähän pilviä 2500 jalkaa (korkea
Cu-pilvi)
vähän pilviä 2800 jalkaa
(cumulonimbus)
hajanaisia pilviä 25000 jalkaa

Lämpötila.: 14°C, Kastepiste 8°C, RH 67%

Paine: 998 hPa

TAF julkaistu: 11:29 LT (21.)
Ennuste voimassa 12:00 (21.) - 16:00 (21.):
290° (WNW) 10 solmua
10 km tai enemmän
vähän pilviä 2000 jalkaa
melkein pilvistä 9000 jalkaa

Koodattu... Tulkittuna Tutka Webkam...

Liite 8. Sinus Soundbook tekniset tiedot http://www.mip.fi/cms/images/stories/docs/melu_ja_aani/sinus-soundbook-fi.pdf

Soundbook keskeiset tekniset tiedot (Seuraavat tiedot koskevat 4 (2) kanavaista laitetta.)

Tietokone Panasonic CF-18

Proessori	Centrino™ 900Mhz, 256 Mt RAM
Näyttö	11" TFT XGA, vaihdettava, kosketusnäyttö
Tallennuslaitteet	40 Gt kovalevy (CD/RW, DVD, FD)
Liitännät	2xUSB, RS-232, LAN, WLAN, Modemi, Cardbus, VGA, GPRS ja Bluetooth lisäoptiona

Input kanavat 1-4 (1-2)

Resoluutio	20 bittiä (taso), 16 bittiä (äänen nauhoitus)
Reaaliaikainen kaistanleveys	20 kHz (48 / 51,2 kHz näytteenotto nopeus)
Häiriötäisyys	>80 dB
Kanavien välinen erotus	>80 dB
Satunnaiskohina	<1,4 µV(A), <2,2 µV(Z) @ 20 Hz ... 20 kHz
Näytteenottonopeus	48 kHz / 51,2 kHz / 96 kHz
Näytteenottonopeuden alennuskertoimet (Desimation rates)	1, 2, 4, 8, ... , 1024 (via DSP)
Anti-aliasing suodatin	22,4 kHz
Maksimi input - jännite	± 10 Vpeak @ ylimodulaatio varaa 1 dB
Vahvistus	-20 dB ... 40 dB 10 desibelin välein
Overload – ilmaisu	kyllä, myös out-of-band taajuudella
Jakson sopimattomuus	< 1° @ -20 dB, 20 Hz ... 20 kHz
Vasteen säätäminen	kyllä, automaattisesti itse-kalibroinnin kanssa
Input suodatin	DC, AC 0,15 Hz, HP 10 Hz, LP 2 kHz
Kanavien ryöpytys	mahdollista, kanavat 1+2, kanavat 3+4
Sensorin virtalähde	mikrofoni ± 14 V, +200 V ICP 2 mA
IEEE 1451,4 tuki	kyllä

Yhteiskanavat 5-11

Resoluutio/näytteenottonopeus	12 bittiä / 100 Hz
Input jännite	0 ... 15 V
Input impedanssi	12 kOhm kanaville 5-9, 2,5 kOhm kanaville 10 ja 11
Tacho-tilan kanavat 10/11	Input frekvenssi 1 / 60 Hz ... 1 MHz TTL tasolle
Digitaalinen input-tila 10/11	Näytteenottotaajuus: 16 x näytteenottonopeus verrattuna kanaviin 1-4

Output kanavat 1-4 (1-2)

Näytteenottonopeudet	48 kHz / 51,2 kHz / 96 kHz
Kaistanleveys	DC ... 20 kHz
Maksimi output jännite	3,16 Vpeak
Vaimennus	+10 dB ... -50 dB 1 dB välein

AES3 liitäntä (vaihtoehtoinen)

Digitaalinen sisääntulo (stereo)	24 / 16 bittiä näytenopeus muuntimen kanssa
Digitaalinen ulostulo (stereo)	24 / 16 bittiä

Fyysiset ominaisuudet

Koko	280 mm x 220 mm x 65 mm
Paino	3100 g
Akku	CF-VZSU30U Litium-ioni akku, kapasiteetti 4 h
Ulkoinen virtalähde	100 ... 240 V AC CF-AA1623A adapterilla

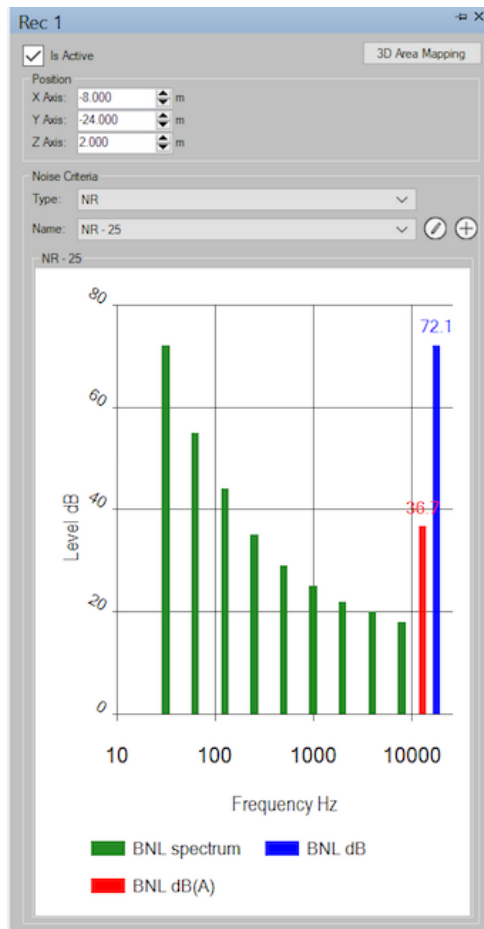
Ympäristön olosuhteet

Suojaustaso	IP54
Tärinän kestävyys	MIL-STD 810E 514,4-16-10 mukaan
Kosteus	30 % ... 90 %
Lämpötila-alue	-10 °C ... +50 °C
Säilytysolosuhteet	-20 °C ... +60 °C, maksimi kosteus 95%

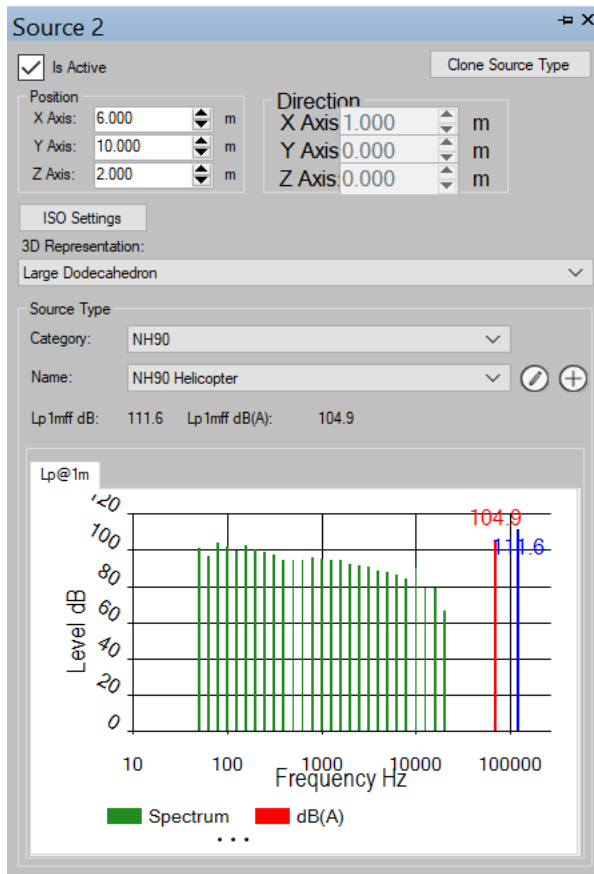
Elektromagneettinen yhteensopivuus

Emissio	yhdenmukainen EN50081-1 (1992) kanssa
Immissio	yhdenmukainen EN50082-2 (1997) kanssa

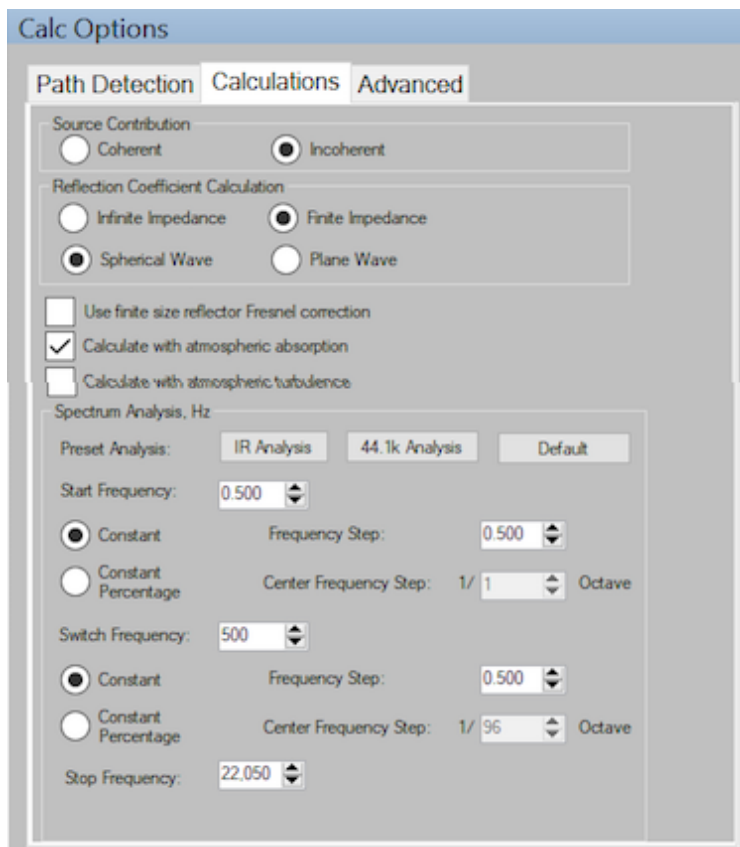
Liite 9. Laskentaan vaadittu vastaanotin (Receiver Noise Ratio)



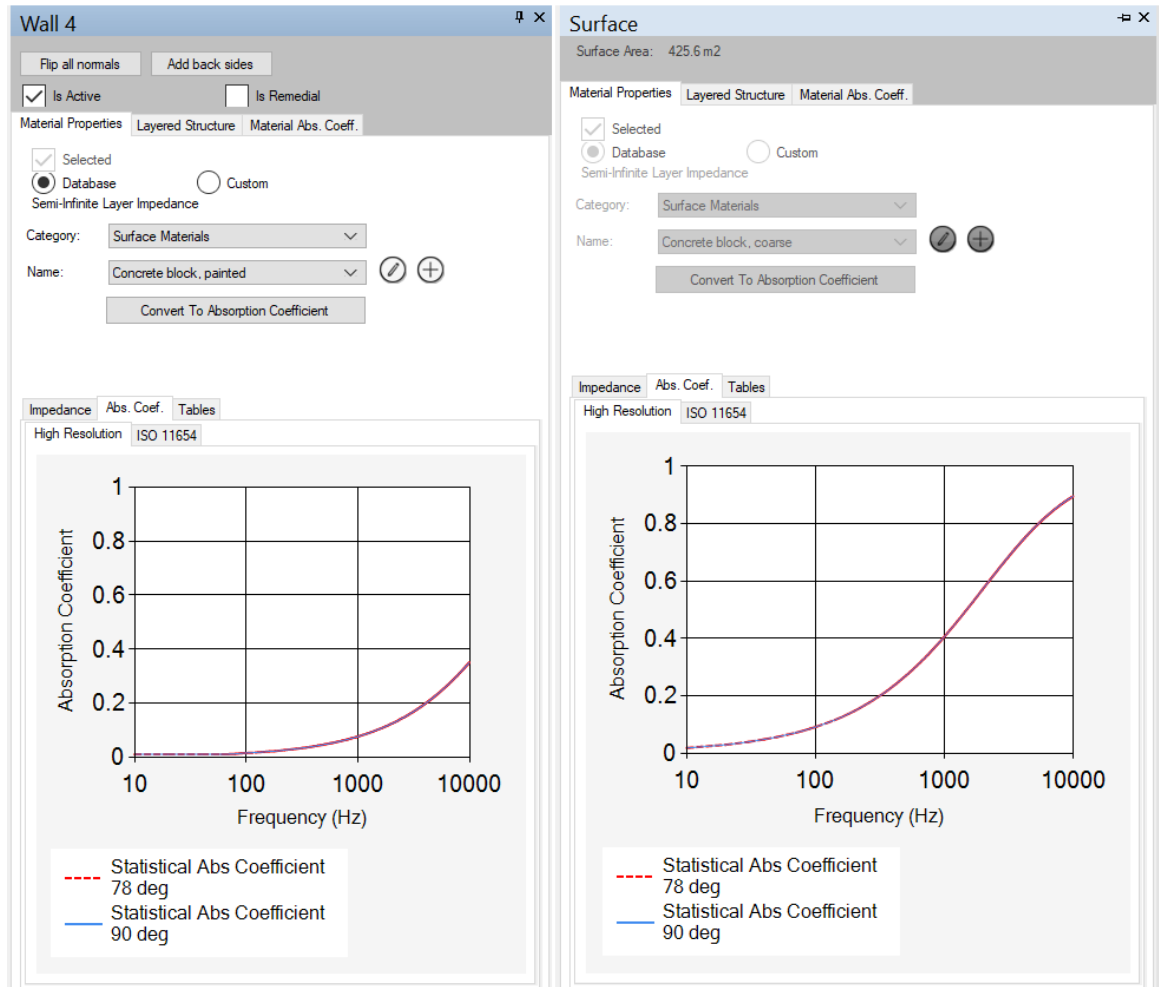
Liite 10. Äänilähteen mallinnus (Sound Source)



Liite 10. Jälkikaiunta-ajan laskennan asetukset



Liite 11. Pintojen materiaaliasetukset



Liite 12. Nosto-oven tyypikilpi

