

Marko Pekkarinen

**KUSTANNUSTEHOKKAAN MELUNVAIMENNUSKEINON TUNNISTAMINEN
TRAKTORIN OHJAAMOSSA**

**KUSTANNUSTEHOKKAAN MELUNVAIMENNUSKEINON TUNNISTAMINEN
TRAKTORIN OHJAAMOSSA.**

Marko Pekkarinen
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Autoala, YAMK
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Master-tutkinto, Autoala

Tekijä: Marko Pekkarinen

Opinnäytetyön nimi: Kustannustehokkaan melunvaimennuskeinoon tunnistaminen traktorin ohjaamossa

Työn ohjaaja: Hannu Heikkilä

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2022

Sivumäärä: 46 + 3

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää, miten kartoittaa traktorin ohjaamoon tulevat äänet ja vaimentaa melua kustannustehokkaasti. Työn toimeksiantaja oli Valtra Oy:n tuotekehitys. Melutasojen vaimentamisen merkitys on viime vuosina korostunut kilpailun ja asiakkaiden vaatimusten myötä. Työn tarkoituksena oli löytää meluhaittojen lähteet ja selvittää melun syntyyn vaikuttavat mekanismit. Meluhaittojen löydyttyä päätavoitteena oli löytää kustannustehokas keino meluntorjuntaan traktorin ohjaamossa.

Tutkimusstrategiseksi menetelmäksi otettiin käyttöön kvantitatiivinen tutkimusmenetelmä. Menetelmän valinta sopi paremmin avoimiin tutkimuskysymysten analysointiin. Lukujen avulla pystyttiin havainnoimaan luotettavammin vastaukset tutkimuskysymyksiin. Käytännön testien avulla pystyttiin todentamaan oikeat johtopäätökset ja vertaamaan niitä teoreettisiin akustisiin ilmiöihin.

Työssä tehtiin ohjaamon referenssimittauksia, joiden pohjalta tehtiin erilaisia muutoksia ohjaamoon ja ohjaamon kiinnityksiin. Lisäksi tehtiin muutamia kokeiluja ohjaamon ulkopuolisille komponenteille. Näiden muutoksien jälkeen verrattiin tuloksia ensimmäiseen referenssimittaukseen, jotta pystyttiin todentamaan erilaisten muutoksien vaikutus kokonaismeluun.

Tutkimuksissa havaittiin, että suurimmat vaikuttajat kokonaismeluun johtuivat dieselmoottorin palotapahtumista, voimansiirron taajuudesta, ilmakompressorin imutaajuudesta ja moottorinjäähdyttimen tuulettimen korkeista lapataajuuksista.

Traktorin ohjaamoon on haasteellista tehdä isoja muutoksia, ainakin rakenteellisessa mielessä. Ohjaamon nykyrakenteissa äänieristysmateriaali tulisi massalain mukaisesti paksuksi. Ensimmäisenä kannattaisi keskittyä melulähteiden vaimentamiseen, ja jos se ei ole mahdollista, ohjaamon melun vaimentamiseen pitäisi miettiä uusia ratkaisuja perinteisten äänieristysmateriaalien käyttämisen sijaan.

Tämä opinnäytetyö auttaa tunnistamaan merkittävimmät melun aiheuttajat traktorin ohjaamossa ja antaa suunnittelulle lähtökohтия jatkaa tutkimuksia tulevaisuudessa.

Asiasanat: traktorit, työkone, ohjaamo, akustiikka, Valtra, Agco

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Master's degree, Degree Programme in Automotive Engineering Technology

Author: Marko Pekkarinen

Title of thesis: Identification of a cost-effective noise reduction method in the tractor cab

Supervisor: Hannu Heikkilä

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2022 Number of pages: 46 + 3

The purpose of this thesis was to find out how to map the sounds coming into the cab of a tractor and reduce noise in a cost-effective way. The work was commissioned by Valtra Ltd. product development. The importance of reducing noise levels has been emphasized in recent years due to competition and customer requirements. The purpose of the work was to find the sources of noise nuisance and to find out the mechanisms influencing the generation of acoustic noise. After the noise nuisance was discovered, the main goal was to find a cost-effective way to lower noise in the tractor cab.

A quantitative research method was introduced as the research strategy. The choice of method was better suited for open analysis of research questions. The figures made it possible to observe the answers to the research questions more reliably. Practical tests were able to verify the correct conclusions and compare them with theoretical acoustic phenomena.

In the work, reference measurements were made in the cab, on the basis of which various changes were made to the cab and cab attachments. In addition, a few experiments were performed on components outside the cab. After these changes, the results were compared with the first reference measurement in order to be able to verify the effect of different changes on the total noise levels.

The studies found that the major contributors to overall noise levels were due to diesel engine fire events, transmission frequency, air compressor intake frequency, and high blade frequencies of the engine cooler fan.

It is challenging to make big changes to the tractor cab, at least in a structural sense. In the current cab structures, the sound insulation material would become thick in accordance with the mass law. The first step should be to focus on attenuating noise sources, if this is not possible, new solutions should be considered instead of using traditional sound insulation materials.

This thesis helps to identify the most significant noise sources in the tractor cab and provides a starting point for further research in the future.

Keywords: tractors, machine, cabin, acoustic, Valtra, Agco

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on yhtenä osana Master-tutkintoa Oulun Ammattikorkeakoulussa. Työn aihealue muodostui AGCO Valtran tuotekehityksen toivomuksesta. Tätä haasteellista opinnäytetyötä tehdessä opin paljon uusia asioita erilaisten akustisten ilmiöiden vaikutuksesta traktorin ohjaamoon. Työtä tehdessä huomasin, että iso asia, joka motivoi minua tekemään tämän työn, johtui juuri uusien asioiden oppimisesta. Akustisten ilmiöiden vaikutus liikkuviin työkoneisiin kirkastui sitä mukaa, kun työssä päästiin käytännön testeihin, joita tukivat teorian ymmärtäminen käytäntöön.

Opinnäytetyön toteuttamisen mahdollisti Agco Valtralta ohjaajani Antti Kalliokoski sekä aineiston hakemisessa että käytännön testeissä. Erityisesti kiitos Antille, kun olit matkassa mukana. Oulun ammattikorkeakoulusta työn ohjaaja Hannu Heikkilä ansaitsee myös kiitokset. Suuret kiitokset, kuuluu myös aviopuolisolleni, kun jaksoit kannustaa minua monena iltana ja olla kärsivällinen tämän opinnäytetyön aikana.

Suolahdessa, 20.5.2022.

Marko Pekkarinen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	AKUSTIIKAN PERUSTEET	8
2.1	Ääni	8
2.2	Taajuus.....	9
2.3	Äänenpaine ja äänenteho	12
2.4	Absorptio, heijastuminen ja ääneneristävyys	15
2.5	Äänenpainetason ja taajuuden vaikutus.....	18
2.6	Massalaki-ilmiö	19
2.7	Koinsidenssi-ilmiö	20
2.8	Resonanssi-ilmiö.....	22
2.9	Massalaki, koinsidenssi ja resonanssi-ilmiöt materiaalissa.....	25
2.10	Seisovat aallot.....	27
2.11	Rakenteista tuleva äänisäteily.....	29
2.12	A-painotus melumittauksissa	34
3	AKUSTISET MITTAUKSET OHJAAMOSSA	35
3.1	Hiljaisen koneen kriteerit	35
3.2	Melun vaimentaminen ohjaamossa	36
3.3	Dieselmoottorimelun vaikutus ohjaamoon.....	36
3.4	Voimansiirtomelun vaikutus ohjaamoon	37
3.5	Pneumatiikan ja hydrauliiikan melu ohjaamossa	38
4	TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET	40
5	POHDINTA	41
	LÄHTEET	42
	LIITTEET	3

1 JOHDANTO

Traktorien ns. turvaohjaamo tuli pakolliseksi Suomessa voimaan v.1969. Taustalla oli traktorien kaatumiseen johtaneet tapaukset. Lopputuloksena suunniteltiin erillinen ohjaamo kuljettajan suojaksi. Ohjaamo suojasi kuljettajaa, mutta melutasot olivat todella korkealla (yli 100 dB). Niistä ajoista on tultu paljon eteenpäin. Kuljettajaa on mietitty ajomukavuudessa, ergonomiassa ja melutasoissa. Nykyiset ohjaamot ovat kuin toimistohuone. Ne ovat ilmastoituja, pölytöiviitä ja hiljaisempia kuin ennen. Kilpailu traktoreiden ohjaamoiden melutasosta eri valmistajien kanssa kiristyy koko ajan. Asiakkaat ovat heränneet myös vaatimaan hiljaisempia ohjaamoita.

Opinnäytetyön aiheeksi muotoutui traktorin ohjaamon sisälle tulevien meluhaittojen tutkiminen ja niiden vaimentaminen kustannustehokkaasti. Toimeksiantajana työssä toimii Valtra-tuotekehitys-yksikkö Suolahdessa, joka kuuluu maailmanlaajuiseen Agco-konserniin. Valtran työ asiakkaiden parissa on jo jatkunut yli 70 vuotta. Vuonna 2021 vietettiin 70-vuotisjuhlavuotta. Henkilöstön määrä Suolahdessa on n. 1000 henkilöä. Agco-konserni on maailman kolmanneksi suurin maatalouskoneiden kehittäjä ja valmistaja. Suomessa Agco omistaa kaksi tehdasta, jotka sijaitsevat Suolahdessa ja Nokialla. Suolahdessa valmistetaan Valtra traktoreita ja Nokialla sijaitseva Agco Power valmistaa muun muassa dieselmootoreita maatalouskoneisiin. Agco perustettiin vuonna 1990 ja se on laajentunut voimakkaasti niistä ajoista. Yhtiön tunnettuja tuotemerkkejä ovat muun muassa Valtra, Fendt, Massey Ferguson, Challenger ja GSI. Henkilöstöä koko konsernissa on yli 20 000. (Valtra)

Työn tarkoituksena on löytää oleelliset melulähteet, jotka vaikuttavat traktorin ohjaamoon ja tutkia kustannustehokkaita meluntorjuntakeinoja. Meluntorjuntakeinojen kustannusvaikutus tulisi olla kohtuullinen, jotta perustraktorin hankintahintaa ei nosteta liikaa muihin valmistajiin nähden. Mahdollisilla muutoksilla on myös varmasti positiivinen vaikutus Valtra brändiin. Ne edistävät kilpailukykyä ja lisäävät työtehokkuutta, jota melu laskee.

2 AKUSTIIKAN PERUSTEET

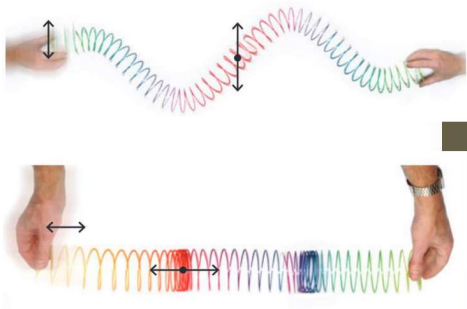
Ääni on suorastaan välttämätön osa ihmisen elämässä. Merkittävin osa viestinnästämme tapahtuu puheen ja kuuloaistin välityksellä. Yhteistä kaikille on akustiikkaan perustuva ilmiö. Sana akustiikka polveutuu kreikkalaisesta sanasta "akoustos" (kuulla). Akustiikka on ääntä tutkiva tiede (äänioppi). Äänioppi voidaan liittää muun muassa musiikkiin, mekaniikkaan, arkkitehtuuriin, meritieteisiin ja psykoakustiikkaan.

Ääni etenee aaltona väliaineessa. Ääniaalto voidaan kuvata kaksiulotteisesti poikkeamana tai painevaihteluna ajan funktiona. Seuraavissa luvuissa tutustutaan äänen teoriaan tarkemmin ja niiden vaikuttamisilmiöihin. (1.)

2.1 Ääni

Kun huudetaan tai soitetään kitaraa, tapahtuu ympäristön ilmaan häiriöitä. Näitä häiriöitä kutsutaan aalloiksi. Häiriön tekijä saa ilman molekyylit liikkeeseen. Värähtelyn lähde (häiriö tekijä) muuttaa ilman molekyyliden tiheyttä ts. ilmanpainetta. Ilmanpaineen muutos saa seuraavat molekyylit liikkeeseen, minkä seurauksena ääni kulkee pitkittäisaaltona äänilähteestä ympäristöön. (1)

Ääniaalto ei etene tyhjiössä vaan tarvitsee aina väliaineen edetäkseen. Väliaine voi olla missä tahansa olomuodossa, kuten nesteenä, kaasuna, kiinteänä ja plasmana. Kun väliaineena on kaasu tai neste ääniaalto etenee pitkittäisenä aaltona. Mekaaninen aalto (kiinteä aine) voi toimia sekä pitkittäisenä, että poikittaisena ääniaaltona (kuvio 1). (2.)



KUVIO 1. Poikittainen ja pitkittäinen aaltoliike (3, s 2)

Taulukosta 1 voidaan todeta, että äänen nopeus vaihtelee väliaineiden mukaan. Se, kuinka nopeasti äänen tihentymäaallot ja harventumat liikkuvat väliaineessa, riippuu siitä, kuinka nopeasti molekyylit työntävät toisia molekyylejä liikkeelle. Esimerkiksi ilmassa molekyylit ovat hyvin paljon erillään toisistaan, joten se hidastaa äänen etenemistä. Teräksessä ääni kulkee 17 kertaa nopeammin. Teräksen ominaisuutena on atomien ”lähekkäin olo”. (4)

TAULUKKO 1. Äänen nopeudet eri väliaineissa.

Väliaine	Nopeus (m/s)
Tyhjiö	0
Ilma	n. 343
Vesi	n. 1500
Alumiini	n. 6300
Teräs	n. 6000
Lasi	n. 4500
CO ₂	n. 259
Polykarbonaatti	n. 2200

Äänennopeus lasketaan kaavalla

$$v = f\lambda, \quad (\text{KAAVA 1})$$

jossa f on taajuus (Hz), v (m/s) ja λ aallonpituus (m).

Äänen nopeuteen vaikuttaa myös lämpötila. Ilmassa 0 °C:n lämpötilassa äänennopeus on 331 m/s ja +20 °C:n lämpötilassa on 343 m/s.

2.2 Taajuus

Taajuudesta esimerkkinä voidaan mainita hyttysille tunnusomainen korkeataajuinen ininä. Se syntyy siipien vinhasta nopeudesta. Hyttynen räpyttää siipiään lähes 800 kertaa sekunnissa. Hyttysen siipien räpytyksestä tulee tunnusomainen korkeataajuinen ininä. (5.)

Taajuus eli frekvenssi (f) kertoo, kuinka monta värähdystä tapahtuu aikayksikössä. Taajuuden ja jaksonajan välillä vallitsee seuraava yhteys.

$$f = \frac{1}{T}, \quad (\text{KAAVA 2})$$

jossa T on jaksonaika (s). Tästä voidaan johtaa suure hertsi (Hz). Yhden hertsin jaksonaika on yksi sekunti, joka voidaan todeta kaavasta 3.

$$\text{Hz} = \frac{1}{s}, \quad (\text{KAAVA 3})$$

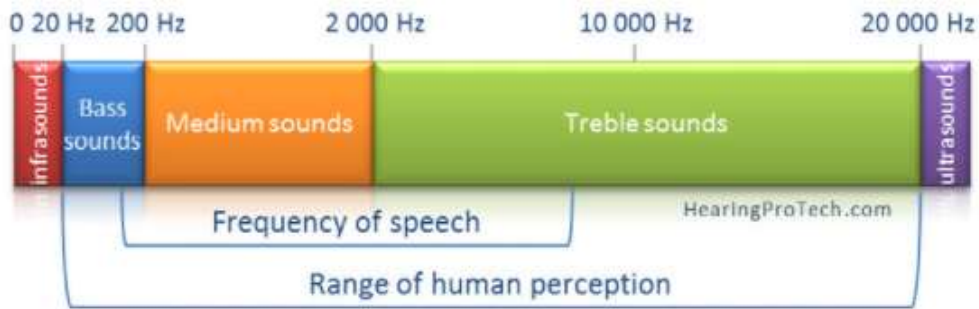
jossa s on sekunti.

Hertsi on nimetty saksalaisen fyysikon Heinrich Rudolf Hertzin (1857 - 94) mukaan tunnustuksena hänen työstään sähkömagnetismin alalla. Hertz osoitti kokeellisesti ensimmäisenä radioaaltojen leviämisen. (6.)

Mitä enemmän värähdyksiä ääniaallossa on, sitä korkeampi ääni syntyy. Tästä syystä hyttysen ääni kuuluu ininänä. Ihmiskorvan ns. kuuloalue on yleensä 20 - 20 000 Hz:n alueella. Alle 20 Hz:n ääniä kutsutaan infraääniksi. Infraääniä voidaan havaita tuntoaistilla tärinänä. Infraäänit voivat aiheuttaa mm. merisairausten kaltaisia oireita. Luonnossa esiintyy myös infraääniä, ja esim. tuuli voi aiheuttaa voimakkaita infraääniä. Osa ihmisistä voi kuulla vielä 14 Hz taajuisten infraäänien.

Ultraääni on ääntä, jonka taajuus on yli 20 kHz. Ihminen ei näitä ääniä kuule, mutta monet eläimet käyttävät niitä hyväkseen. Esimerkiksi lepakot suunnistavat ultraäänien avulla. Lääketiede käyttää ultraääntä tutkimuksissa. Ultraäänillä on yksi huono ominaisuus: ne etenevät huonosti väliaineissa. Käytännössä ne eivät etene ilmassa kuin muutamia metrejä. Ihmisen korva on herkin 2 - 4 kHz:n äänille, ja herkkyys heikentyy voimakkaasti, kun taajuus alenee. (7)

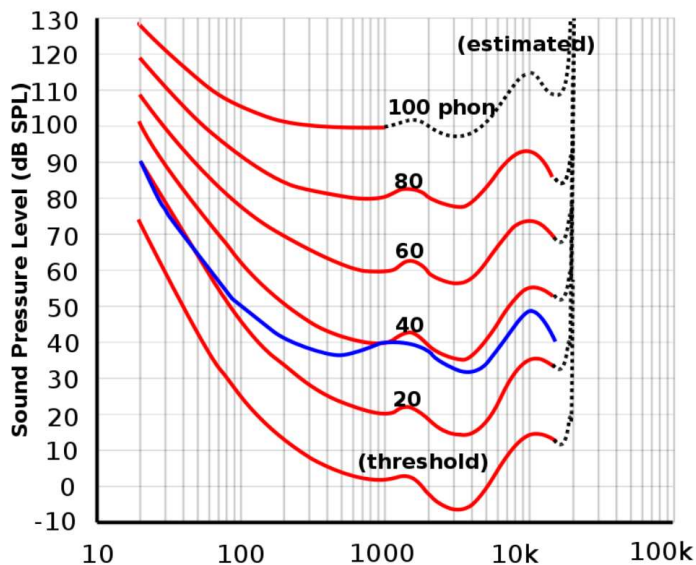
Taajuudet voidaan jaotella kuvion 2 mukaisesti. Bassoäänit ovat 20 - 200 Hz, keskiäänit 200 - 2000 Hz, diskanttiaänit 2000 - 20 000 Hz. Infraäänit ovat alle 20 Hz:n taajuuksia ja ultraäänit yli 20 kHz.



KUVIO 2. Taajuuksien luokittelu. (8)

Ihminen havaitsee helposti puheäänien. Evoluutio on kehittänyt ihmistä siten, että kuulon alue on herkistynyt ”pienelle alueelle”. Tästä syystä kuulemme puheäänien (200 - 4000 Hz) hyvin, mutta korkeita ääniä ei niinkään hyvin. Aivan selvää, joka tapauksessa on, että ihmisen evoluutio jatkuu.

Ihminen havaitsee eri taajuiset äänet eri lailla, vaikka äänitaso olisi samankaltainen. Tätä varten on kehitetty äänekkyyssokäyrästä. Jokainen foonimäärä kuulosta yhtä äänekkäältä, vaikka taajuus muuttuu. Alhaalla olevasta kuvaajasta 3 voidaan todeta ihmisen kuuloalueet (standardi ISO 226:2003).



KUVIO 3. Vakioäänekkyyssäyrästä (9)

2.3 Äänenpaine ja äänenteho

Ääni on energiaa. Ihmisen kuuloaistimus on logaritminen. Eri taajuisia äänenlähteitä ei huomata, jos ne eivät erotu tarpeeksi eri äänenvoimakkuuksilla. Tähän erovaisuuteen tarvitaan sopiva mittayksikkö (desibeli). Päinvastoin kuin usein luullaan, desibeli (dB) ei ole itsenäinen mittayksikkö, kuten sekunti tai watti. Sen tarkoitus on ilmoittaa kahden arvon ilmaistun tasonvälinen logaritminen suhdeluku. Jotta ei tarvitsisi käyttää suuria lukuja, käytetään sen sijaan logaritmista asteikkoa, joka ilmaistaan desibeleinä (dB). Desibeli on logaritminen, ja siihen pätee seuraava lauseke (kaava 4). (10)

$$\text{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{mitattu teho}}{\text{vertailuteho}} \right), \quad (\text{KAAVA 4})$$

Desibelejä laskettaessa onkin muistettava aina muuntaa desibelit ensin tehoiksi. Esimerkiksi $50 \text{ dB} + 50 \text{ dB} = 10^{-7} \times 10^{(50/10)} + 10^{-7} \times 10^{(50/10)} = 0,0000001 + 0,0000001 = 0,0000002 \text{ W/m}^2 = 10 \log(0,0000002/10^{-12}) \approx 53,01 \text{ dB}$. (11)

Laskukaavasta voidaan havaita, että äänitehon kaksinkertaistuessa äänitaso kasvaa aina $\sim 3 \text{ dB}$. Kuvitellaan mielessämme huone, jossa on kaksi laitetta. Niiden äänitehot ovat 50 dB . Yhteisteho on kasvanut vain 53 desibeliin (ei siis 100 desibeliin). Vastaavasti, jos toisen laitteen ääni on hiljaisempi kuin toisen, sen vaikutus kokonaisäänitasoon on pieni. Taulukosta 2 huomataan sama ilmiö. Mitä isompi ero on sitä vähemmän se vaikuttaa kokonaistehoon. (11)

TAULUKKO 2. Kahden äänilähteen tuottama ero.

Kahden äänilähteen tuottaman äänen yhteenlaskettu dB ero							
Äänitason erotus (dB)	0	2	4	6	8	10	
Lisäys suurempaan äänilähteeseen (dB)	3	2	1.5	1	0.6	0.4	

Taulukosta 3 voidaan nähdä äänitehon ja desibelien yhteys.

TAULUKKO 3. Äänitehon ja desibelien suhde toisiinsa.

Äänitehon (W/m ²) ja dB yhteys		
dB	W/m ²	W/m ²
0 (kuulokynnys)	10 ⁻¹²	0,000 000 000 001
30 (kuiskaus)	10 ⁻⁹	0,000 000 001
60 (normaali puhe)	10 ⁻⁶	0,000 001
120 (kipuraja)	10 ⁰	1

Äänenpaine on äänitehon aikaansaama äänenpainemittarilla mitattavissa oleva ominaisuus. Äänenpainetasolle L_p määritellään äänilähteen aikaansaaman äänenpaineen ja vertailupaineen suhteena seuraavalla yhtälöllä. (11)

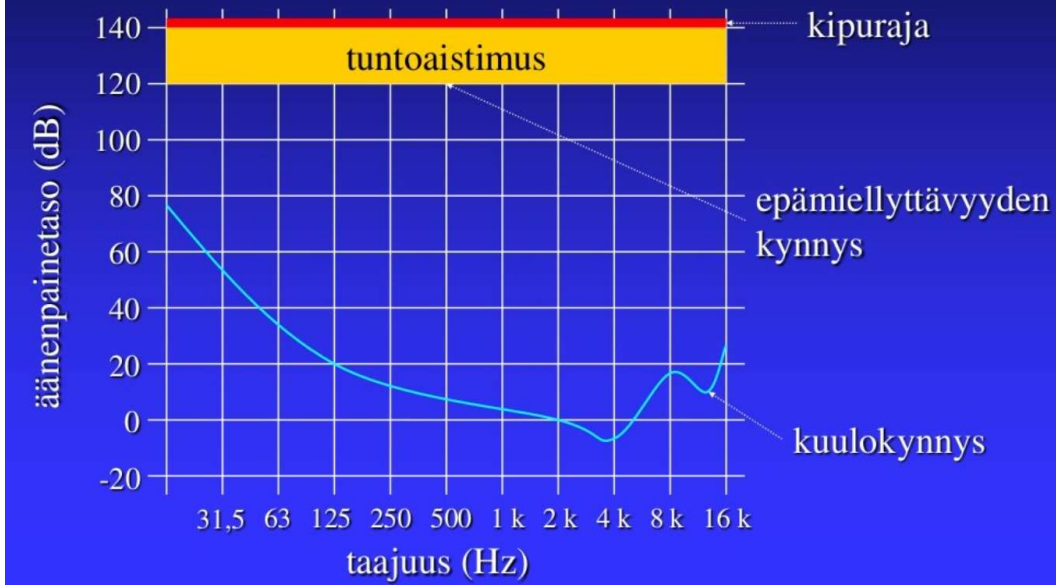
$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}, \quad (\text{KAAVA 5})$$

jossa p = äänenpaine (Pa) ja p_0 = vertailuäänepaine 2×10^{-5} (Pa) vastaa likimain kuulokynnystä 1000 Hz:n taajuudella. Äänenpainetasossa 20 dB:n nousu tarkoittaa paineen kymmenkertaistumista. Etäisyyden kaksinkertaistuksessa äänenpaine pienenee 6 dB. Äänenpaine on aina lähteen, ympäristön ja paikan mitattu ominaisuus. Tällöin pitäisi hyvän tavan mukaan ilmoittaa myös etäisyys mitattavasta lähteestä. Esimerkiksi yhden metrin etäisyydestä mitattu äänenpaine on 60 dB, ja tällöin voidaan käyttää merkintää 60 dB/1 m. (12)

Ihmisen kuuloaistimus on siis logaritminen. Tästä johtuen havaitsemme vain n. 3 desibelin muutoksen melutasossa. Melun koetaan kaksinkertaistuvan melutason muuttuessa n.10 desibeliä. (13)

Kuviosta 4 voidaan todeta, että ihmisen kuuloalue on herkimmillään 2000 - 4000 Hz:n taajuusalueella. Lopullinen ääniaistimus syntyy tietysti aivoissamme. Siihen vaikuttavat taajuus, äänen spektri ja tarvittava äänenpaine. Ääni lopulta kuullaan subjektiivisesti joko miellyttävänä tai epämiellyttävänä. Ääni voidaan kokea jatkuvana, satunnaisena tai impulssimaisena. Äänen häiritsevyyteen vaikuttavat myös kuulijan herkkyyks, kokemukset ja asenteet. (13)

Dynamiikka-alue



KUVIO 4. Kuulon dynamiikka-alueet. (14)

Kuviosta 4 voidaan päätellä myös se, että meluntorjunnan kannalta kannattaisi panostaa yli 100 Hz:n taajuuksiin. Alle 100 Hz:n taajuudet tarvitsevat paljon meluenergiaa, jotta ne vaikuttaisivat ihmisen kuuloon haitallisesti. Yli 4 kHz taajuuksilla kuulokynnys nousee taas hieman.

Kuviosta 5 voidaan todeta, että n. 80 desibelin äänilähde häiritsee kuulijaa. Kun mennään tästä ylöspäin taulukossa kuulon vaurioituminen voi olla jo riskinä. Yleinen kuulonsuojausraja Suomessa työntekijällä on 85 dB, jonka jälkeen on pakko käyttää kuulonsuojaimia. (13)



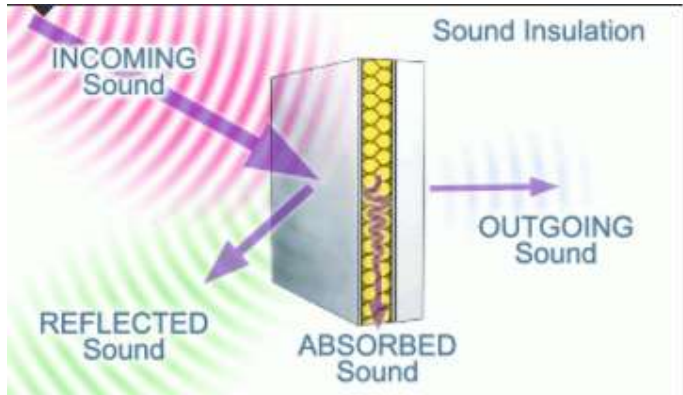
KUVIO 5. Äänenpainetasot. (14)

Ihmisen aivot (psykoakustiikka) tuovat myös oman lisäyksen äänilähteiden havainnoimisessa. Voimakas ääni voi peittää "hiljaisimmat" äänet, vaikka nekin voivat häiritä omalla taajuusalueellansa. Aivot sulkevat siis ns. toisarvoisina pidettäviä ääniä. Ihmisen äänimuisti on erittäin lyhyt 1 - 2 s. Aivoissa tapahtuu myös kummallinen ilmiö. Helmut Haas henkilö tutki äänimaailmaa v. 1949 ja huomasi, että kuultaessa useita samankaltaisia äänilähteitä kuulijaa huomaa vain lähinnä olevan äänilähteen. Ilmiötä kutsutaan Haas-efektiksi. Ilmiötä käytetään hyväksi esim. konserttisaleissa. Tarkoituksena on säilyttää äänen tulosuunta oikeana, vaikka se todellisuudessa voi tulla eri kaiuttimesta. Ilmiössä pitää olla tarkkana aikaerojen kanssa. Ihmisen kuulo pystyy havaitsemaan yli 40 ms:n erot äänilähteistä. Pienet muutokset koetaan yhden ja saman äänilähteen ominaisuuksiksi, mutta jos ääneen tulee äkillinen muutos, se tulkitaan "uudeksi" äänilähteeksi. (15)

2.4 Absorptio, heijastuminen ja ääneneristävyys

Materiaaleihin liittyy kolme erilaista ominaisuutta. Niillä on äänenvaimennuskyky (absorptio), heijastuminen ja lisäksi äänieristyskyky (kuvio 6). Mitä enemmän tilassa on ääntä vaimentavaa materiaalia (absorptioala), sitä alhaisemmaksi syntyvä ääniteho jää. Ääntä voidaan myös heijastaa tai

äänilähteen voi eristää ympäristöstään. Ideaalista olisi käyttää sellaisia materiaaleja, joilla on nämä kaikki ominaisuudet. Sen takia käsitellään kaikkia kolmea ominaisuutta tässä samassa luvussa. (16)



KUVIO 6. Äänenvaimennus. (20)

Jokaisella tilalla on oma akustinen profiili. Tilan profiili koostuu äänilähteestä, pinnoista ja väliaineiden läpi kulkevasta ääniaallosta. Kaikki nämä seikat vaikuttavat, kuinka kuulija kokee äänen ja sen laadun. Pinnan koko vaikuttaa suoraan sen siirtämään ilman määrään. Erityisesti suuret, ohuet ja tasaiset pinnat voivat toimia suurina äänilähteinä, mikäli niiden jäykkyys ei ole riittävä. Äänen laatu voidaan jakaa vielä miellyttävään ja epämiellyttävään ääneen. Äänien epämieluisuus tai mielletävyys koetaan lähes poikkeuksetta subjektiivisesti. Miellyttävä ääni voi olla esim. kitaran sointu tai sateen ropina. Epämiellyttäväksi koetaan yleensä koneitten ja laitteiden ääniä. (17.)

Huone, jossa on paljon sisustuselementtejä, kuten verhoja, mattoja, huonekaluja eri paikoissa muodostaa erilaisen jälkikaiun kuin kovaseinäinen tyhjä huone. Ääniaaltojen heijastumiseen vaikuttavat geometriset muodot ja pintojen pehmeys. Ääniaalto heijastuu hyvin samalla tavalla kuin valo. Heijastuskulmat ovat samoja kuin tulokulmat. Äänen aallonpituudella on merkitystä miten se etenee tilassa. Esimerkiksi huoneen dimensiot vaikuttavat aallon kiertymiseen väliaineessa. Tilakokemus muodostuu siis hyvinkin monista tekijöistä. Arkielämässä emme useinkaan havainnoi suuria tiloja yksilökohtaisesti, mutta kuulemme pienissä tiloissa yksityiskohtaisia vivahteita. Näiden avulla teemme oman mielipiteen mieltymysten ja kokemusten mukaisesti, vaikka niillä ei olisi merkitystä todellisuuteen. Todellinen äänimaailmamme on täynnä elämää. Jotkut äänet voivat häiritä toista, mutta toista kuulijaa ei ollenkaan. Käytännössä traktorin ohjaamossa heijastuksia syntyy todella paljon johtuen ympärillä olevista kovista pinnoista. (17)

On kuitenkin huomioitava, että hyvin vaimennettu tila ei ole välttämättä hyvä akustiikaltaan. Jonkinlainen tasapaino tilan koon ja eristyksen kanssa onkin suhteutettava toisiinsa. Mikäli tilaa vaimennetaan liikaa, emme välttämättä kuule tarvittavia ääniä ulkomaailmasta, jolloin äänimaailmasta tulee ongelma. Jälkikäytäntö-aika saadaan laskettua Sabine kaavasta. (16)

$$T = 0,16 \frac{V}{A}, \quad (\text{KAAVA 6})$$

jossa A on absorptioala ja V on tilavuus. (16)

Heijastumatta jäänyt ääniteho absorboituu pintamateriaaliin muuttuen yleensä lämmöksi. Mitä suurempi absorptiosuhde on, sitä pienempi osa äänitehosta heijastuu takaisin tilaan. Vaimennuskyky ilmastaan absorptiosuhteella, joka on materiaalin pinnan kykyä vaimentaa ääntä. Absorptiokertoimen arvo eri taajuuksilla vaihtelee välillä 0 ja 1. 0 on täysin heijastava (ääni ei vaimennu) ja 1 täysin vaimentava pinta. Absorptioeroin ilmaistaan suurella (α). Yleisesti voidaan olettaa, että absorptiomateriaali vaimentaa tehokkaasti ääniaaltoja, joiden aallonpituus on pienempi kuin 4 X materiaalin paksuus. Esimerkiksi äänen, jonka taajuus on 100 Hz, aallon neljännes on 0,85 m. Tästä johtuen matalataajuisien ääniaaltojen vaimentamiseen tarvitaan suuria paksuuksia. Tätä voidaan parantaa yhdellä keinolla, asennetaan huokoinen materiaali irti sen takana olevasta rakenteesta. Tällä toimenpiteellä voidaan hieman "hujata" ääniaallon pituutta. (18)

Äänenvaimennus- eli absorptioluokat eri materiaaleilla luokitellaan seuraaviin: A, B, C, D ja E (standardi EN ISO 11654 tai ISO 354). Vaimennuskyky mitataan taajuuksilla 100 - 5000 Hz. Tuotteet, jotka kuuluvat absorptioluokkaan A ovat parhaita vaimennuskyvyiltään (absorptio). Vastaavasti huonoimpaan luokkaan kuuluvat E tuotteet. (19)

Pinnan "rosoisuudella" ja paksuudella on merkitystä siihen, miten ne suuntautuvat eteenpäin. Mitä paksumpi materiaali on, sitä enemmän se vaikuttaa matalataajuisien äänien hajaantumiseen. Tämä tuokin ison haasteen todellisessa maailmassamme. Paksujen materiaalien implementoiminen traktorin ohjaamoon tuo isoja haasteita vähäisten tilojen vuoksi.

Kuvitellaan 200 mm:n levy absorboivaa materiaalia. 100 Hz (3.4 m ääniaalto) menee siitä läpi, mutta 10 kHz (34 mm:n ääniaalto) kimpoaa siitä takaisin varmasti. 1 kHz (340 mm:n ääniaalto) voi

kenties hajota siinä. Kuvitellaan 200 mm:n levy ohennetaan 20 mm:n levyyn. Voimme päätellä, että materiaalin ominaisuudet eivät riitä heijastamaan haluttuja taajuuksia pois.

Käsitteellä äänieristys kuvataan rakenteen kykyä eristää ilmaääniä tilojen välillä ja siitä käytetään käsitettä ilmaäänieristyslukua R (dB). Mitä suurempi luku on, sitä parempi on rakenteen ilmaäänieristävyys (kuvio 6).

Ääneneristävyttä ei pidä sekoittaa äänenvaimennukseen, jossa äänienergia muuttuu yleensä lämmöksi. Ääntä vaimentamat materiaalit ovat usein huokoisia ja kevyitä, joten ne eivät ole hyviä materiaaleja äänen eristämiseen. Äänieristys toimii massanehdoilla. Mitä suurempi materiaalin massa on, sitä parempi sen ääneneristävyys on. (16)

Ääneneristävyden kannalta esim. 10 dB:n äänieristys tarkoittaa, että rakenne päästää 1/10 äänienergiasta läpi. Kannattaa muistaa myös, että todellisuudessa rakenteen eristävyteen vaikuttaa vielä taajuusriippuvuus.

2.5 Äänenpainetason ja taajuuden vaikutus

Suunniteltaessa ohjaamoihin ääntä eristäviä rakenteita on äänen taajuudella iso merkitys. Äänen taajuuden muuttuessa, myös rakenteen ääneneristyskyky muuttuu, ja se on otettava huomioon sekä matalilla että korkeilla taajuuksilla. Olisi hyvä ottaa ohjaamon erityiseen tarkasteluun taajuudet 100 - 6000 Hz, koska niillä on enemmän merkitystä. Korva on etenkin varsin herkkä 0,5 - 4 KHz taajuuden tiloissa. Taajuus vaikuttaa äänen voimakkuuden kokemiseen. Esimerkiksi taajuudella 125 Hz äänenpaineen pitää olla vähintään 20 dB, ennen kuin se havaitaan tai vastaavasti 1000 Hz taajuudella se on vain muutamia desibelejä, jotta se havaitaan. Kuviosta 7 voidaan todeta erilaisten äänenpaineen muutoksien vaikutuksen ihmiskorvaan. (20)

Ihmiskorvin havainnoitavat äänenpainetasojen muutokset	
dB	Muutostaso
1-2	Huomaamaton muutos
3-4	Havaittava, melko pieni
5-6	Selvästi havaittava
7-8	Suuri muutos
Yli 10	Iso muutos

KUVIO 7. Äänenpainetasojen ero. (21)

2.6 Massalaki-ilmiö

Ääniaallon kohdatessa rakenteen, se aiheuttaa rakenteeseen värähtelyä. Kevyt rakenne värähtele samasta äänenpaineesta enemmän kuin raskas rakenne. Tämä huomataan selvästi erityisesti matalilla taajuuksilla. Rakenteeseen syntyviä ääniaaltoja on rakenteen toisella puolella sitä enemmän, mitä suurempi rakenteen värähtely on. Näin ollen rakenteen massa vaikuttaa ääneneristykseen todella paljon. Tässä kuitenkin pitää muistaa, että massalaille on myös olemassa raja-arvo, joka on 100 kg/m^2 . Ääneneristävyys kasvaa massaa lisäämällä tämän arvon alapuolella tehokkaasti, mutta tämän jälkeen massan lisäyksellä ei ole niin tehokasta vaikutusta. Ääneneristävyyden kannalta massan lisääminen on hyödyllistä vain silloin, kun rakenne on lähtötilanteessa kevyt. Perussääntönä voidaan pitää, että massan kasvattaminen kaksinkertaiseksi parantaa ääneneristävyyttä 6 dB tai taajuuden kaksinkertaistuessa. Esimerkiksi 1 mm teräslevyn kasvattaminen 2 mm levyksi parantaa äänieristystä 6 dB. (22)

Massalain vaikutuksen ääneneristävyyteen voidaan laskea kaavan 7 mukaan

$$R = 20 \lg(mf) - 49, \quad (\text{KAAVA 7})$$

jossa R on rakenteen ääneneristävyys (dB), m on rakenteen massa ja f on äänentaajuus (Hz) Matalataajuisiin ääniin massan lisääminen on oivallinen keino, jos sitä pystytään hyödyntämään. Tämä ei kuitenkaan kaikissa tapauksissa ole järkevää eikä kustannustehokasta. (23)

Arvioidaan 22mm paksun polyesterilevyn (yleisesti käytössä oleva akustiikka levy) ilmaääneneristävyyttä taajuudella 200 Hz.

$$R_{200} = 20 \lg(3 \times 200) - 49 = 6.5 \text{ dB} \quad (\text{KAAVA 8})$$

Lasketaan esimerkki 6 mm lasilevyllä, joka on paksuudeltaan nykykäytössä olevan ohjaamon lasi.

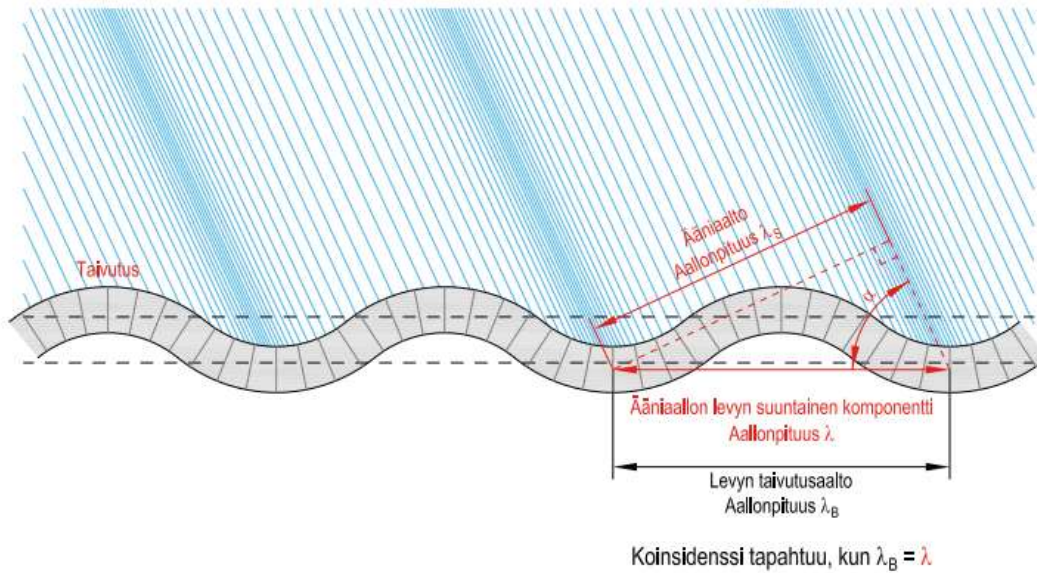
$$R_{200} = 20 \lg(15 \times 200) - 49 = 20.5 \text{ dB} \quad (\text{KAAVA 9})$$

Esimerkkilaskuista huomataan, että matalilla taajuuksilla polyesterinlevyn massa ei riitä poistamaan melua massalain vuoksi. Huokoisten materiaalien vaimennus on tehokkainta, kun materiaalin paksuus on vähintään neljäsosa aallonpituudesta. Absorboivien materiaalien eristävyyttä voidaan lisätä sijoittamalla ne irti heijastavasta taustasta. (22)

Painon suhteen optimoitu rakenne on nelikerrosrakenne, jossa on sisältä ulos luettuna vuorotellen pehmeä, kova, pehmeä ja kova kerros. Sisin kerros on ilmaäänien absorbentti. Kovat kerrokset voivat olla mm. metallia tai muovia. Keskellä olevan pehmeän kerroksen merkitys on olla mahdollisimman erilaista materiaalia. Se ei kuitenkaan saa olla umpisoluista ja jäykkää, kuten polyuretaania tai styroksia, koska ne kytkevät kovat kerrokset yhdeksi jäykäksi rakenteeksi. (24)

2.7 Koinsidenssi-ilmiö

Kun rakenteeseen kohdistuu oikeassa kulmassa ääniaalto, se voi liikkua samalla nopeudella äänen rakenteeseen aiheuttaman taivutusaallon kanssa. Koinsidenssi-ilmiössä levyn pintaan oikeassa kulmassa osuva ääniaalto aiheuttaa taivutusaallon, joka läpäisee levyn todella hyvin, jolloin sen ääneneristävyyttä laskee dramaattisesti (kuvio 8). Rajataajuutta lähestyttäessä äänienergia välittyy tehokkaasti rakenteen puolelta toiselle. Ilmaääneneristävyyden kasvu hidastuu jo rajataajuutta lähestyttäessä ja rajataajuudella saavutetaan minimi. Koinsidenssin rajataajuus on sitä alhaisempi, mitä suurempia ovat rakenteen kimmomoduuli, materiaalin paksuus ja mitä pienempi on pintamassa. Raskaan ja jäykän rakenteen koinsidenssi rajataajuus on pieni. (24; 23.)



KUVIO 8. Koinsidenssi-ilmiö levyssä. (25)

Kaikilla yksinkertaisilla rakenteilla on koinsidenssitaajuus. Rakenteen koinsidenssitaajuuden olisi hyvä olla ihmisen kuulon kannalta tärkeän taajuusalueen ulkopuolella eli vähintään n. 3000 Hz. Moniseinäisen rakenteen tapauksissa täytyy määrittää joka seinämälle erikseen, mikäli niitä ei ole liimattu esim. yhteen. Vaimennus ei heikkene samanaikaisesti jokaiselle taajuudelle, vaan siihen vaikuttaa äänen tulosuunta. Ohuen teräslevyn (10–2 mm) koinsidenssitaajuus on yleensä n. 1,3 - 5 kHz alueella. (24; 23.)

Yksinkertaisen rakenteen koinsidenssitaajuus voidaan laskea kaavalla.

$$F_c = \frac{c^2}{2\pi h} \times \sqrt{\frac{12g(1-\mu^2)}{E}}, \quad (\text{KAAVA 10})$$

jossa

F_c = Koinsidenssitaajuus (Hz)

c = äänennopeus (m/s)

h = materiaalin paksuus (m)

g = materiaalin tiheys (kg/m^3)

μ = Poisson'in luku

E = materiaalin kimmomoduuli (N/m^2)

Lasketaan esimerkki 3 mm teräslevystä, jota käytetään ohjaamon pohjassa.

$$F_c = \frac{340^2}{2\pi \times 0.003} X \sqrt{\frac{12 \times 7850(1-0.3^2)}{210 \times 10^9}} \approx 3918 \text{ Hz} \quad (\text{KAAVA 11})$$

Levyrakenteiden liimaamista yhteen pitäisi välttää, koska koinsidenssitaajuus laskee sen myötä. Ohuita levyjä kannattaa suosia tämän ilmiön vuoksi. Tarkoitus on saada koinsidenssitaajuus mahdollisimman ylös, jotta vältytään tältä ilmiöltä. (16)

Lasketaan esimerkki 6 mm:n lasista, joka on käytössä ohjaamossa.

$$F_c = \frac{340^2}{2\pi \times 0.006} X \sqrt{\frac{12 \times 2500(1-0.25^2)}{75 \times 10^9}} \approx 1877 \text{ Hz} \quad (\text{KAAVA 12})$$

Koinsidenssitaajuus sijoittuu kuulon herkälle alueelle ja aiheuttaa ääneneristävyyteen selvän alentuman n. 2000 Hz jälkeen.

Yksinkertaisen lasin koinsidenssitaajuus voidaan myös laskea karkeasti seuraavalla kaavalla:

$$f_g = \frac{12000 \text{ Hz}}{d}, \quad (\text{KAAVA 13})$$

jossa d on lasin paksuus (mm). (26)

2.8 Resonanssi-ilmiö

Jokaiselle rakenteella tai materiaalilla on sille ominainen taajuus, jolla se pyrkii värähtelemään. Näitä ominaistaajuuksia on kullakin rakenteella ääretön määrä. Resonanssiin liittyy ns. ominaistaajuus. Heikosti suunniteltu rakenne voi tuottaa rakenteellisia ja akustisia resonansseja. Tarkoituksensa sopimaton rakenne voi toimia itsessään, mutta se voi tuoda koneen käyttämiseen haasteita. (24;26;16)

Resonanssitaajuuksiin vaikuttaa rakenteen massa, materiaalin jäykkyys ja lisäksi rakenteen mitat. Rakenteen ominaistaajuuteen voidaan vaikuttaa myös vaimennuksella. Yleensä traktorin ohjaamossa käytetään ns. raskasmattoa, joka lisää rakenteen massaa. Mitä suurempi massa rakenteella on, sitä alemmaksi ominaistaajuuden alaraja putoaa. Ominaistaajuus f voidaan laskea kaavan 14 mukaan. (22)

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (\text{KAAVA 14})$$

jossa k (N/m) on jousen jäykkyys ja m (kg) on massa.

Lasketaan esimerkki $3 \times 1000 \times 1000$ mm teräslevyn ominaistajuus, joka on ohjaamon lattian rakenteen levyn paksuus.

$$k = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{(210 \times 10^9) \times 0.003^3}{12(1-0.3^2)} \approx 519,23 \text{ Nm} \quad (\text{KAAVA 15})$$

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} \times \left(\left(\frac{\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{w} \right)^2 \right)$$

$$= \sqrt{\frac{519,23 \text{ Nm}}{7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.003 \times 1 \times 1 \text{ m}}} \times \left(\left(\frac{\pi}{1} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{1} \right)^2 \right) = 14.75 \text{ Hz}, (\text{KAAVA 16})$$

jossa k jousivakio, E kimmokerroin, h on levyn paksuus, l on levyn pituus, w on levyn leveys, ν on poissonin vakio, m on tiheys.

Lasketaan esimerkki ($6 \times 1276 \times 1526$ mm) ohjaamon tuulilasin ominaistajuus.

$$k = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} = \frac{(75 \times 10^9) \times 0.006^3}{12(1-0.25^2)} \approx 1440 \text{ Nm} \quad (\text{KAAVA 17})$$

$$f = \sqrt{\frac{k}{m}} * \left(\left(\frac{\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{w} \right)^2 \right)$$

$$= \sqrt{\frac{1440 \text{ Nm}}{2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0.006 \times 1.276 \times 1.526 \text{ m}}} * \left(\left(\frac{\pi}{1.526} \right)^2 + \left(\frac{\pi}{1.276} \right)^2 \right)$$

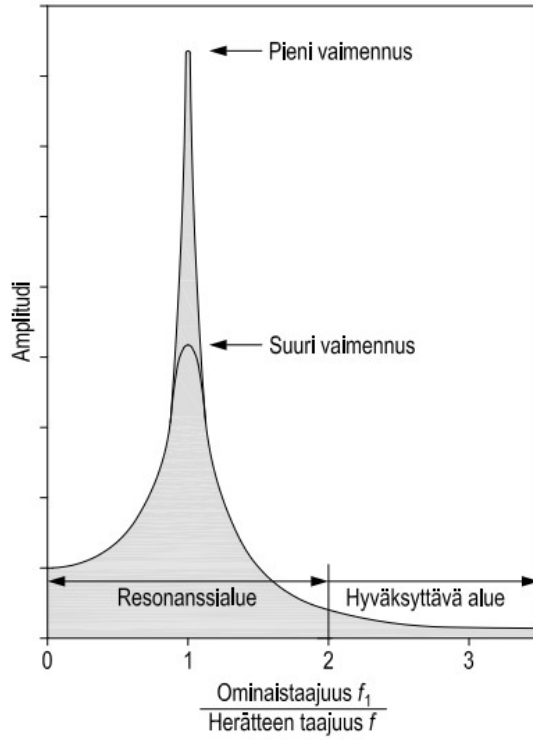
$$= 11.51 \text{ Hz} \quad (\text{KAAVA 18})$$

Rakennetta ei voi suunnitella sellaiseksi, ettei se resonoi ollenkaan. Sen vuoksi on tärkeä, että ensimmäinen ominaistajuus jää alle 100 Hz, mikä on ihmisen kuulolle tärkeän taajuusalueen alapuolelle.

Kun kappale värähtelee toisen kappaleen läheisyydessä se voi joissakin tapauksissa aiheuttaa värähtelyä viereiseen kappaleeseen. Usein rakenteiden vaimennus on pieni, jolloin värähtely siirtyy toisen rakenteen värähtelijän ominaistajuudelle. Mekaanisesta resonanssista on usein haittaa. Koneet ja komponentit voivat hajota, meluta tai vahingoittua joutuessaan resonanssiin, jopa siltoja on hajonnut tämän ilmiön vuoksi. On olemassa myös "hyviä resonansseja" joita hyödynnetään esim. sähköpiireissä (televisio) ja akustisissa soittimissa (kitara). Resonanssi ilmiötä käytetään myös materiaalitutkimuksissa mittaamalla aineen resonanssitaajuuksia, joista voidaan saada tietoa aineen rakenteesta. (27)

Yksi hyvä esimerkki ominaistajuuden merkityksestä, on Iso-Britanniasta Millennium sillasta, joka valmistui vuonna 2000. Ongelmia ilmeni jo avajaispäivänä. Silta lähti kaikkien yllätykseksi resonoi-maan kävelijöiden vaikutuksesta. Onneksi tämä huomattiin ajoissa ja silta jouduttiin sulkemaan lähes kahdeksi vuodeksi muutostöiden vuoksi. Juurisyy sillan värähtelylle oli sillan sivusuuntainen ominaistajuus. Ominaisajuuteen vaikuttavat myös rakenteen vetokuormitus ja puristuskuormitus. Kummallakin on erilainen vaikutus taajuuteen. Esimerkiksi mitä kireämmällä kitaran kieli on, sen korkeampi taajuus siitä tulee, kun sitä soitetaan. (27)

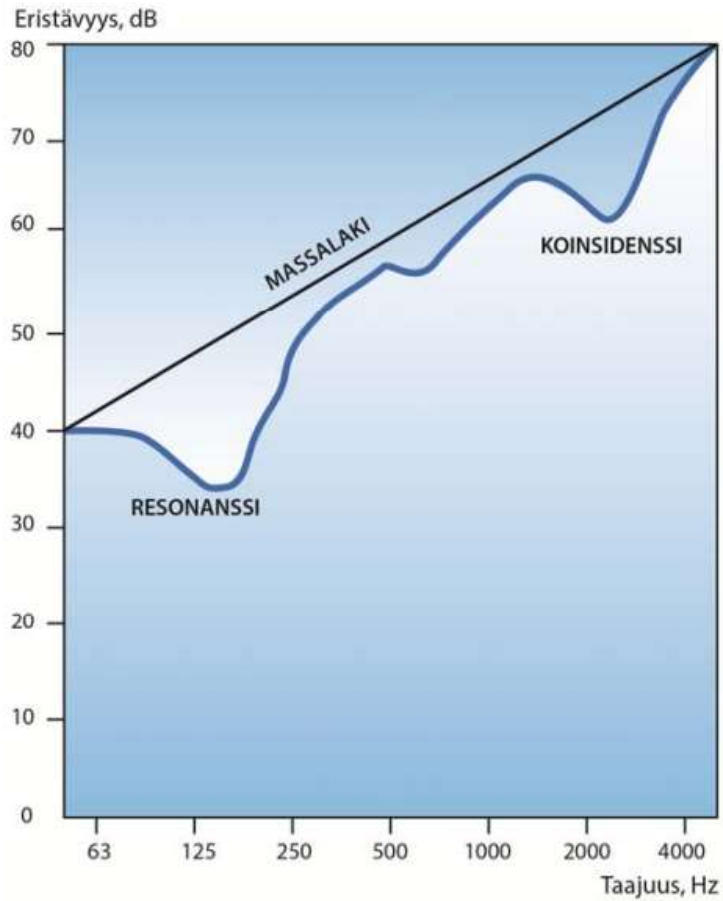
"Resonanssi-ilmiö liittyy suoraan materiaalin ominaistajuuteen. Ominaisajuuden alapuolella olevilla taajuuksilla värähtelijä värähtelee voimakkaammin kuin ominaistajuuden yläpuolella olevilla taajuuksilla" (16). Kuviosta 9 voidaan päätellä, että ominaistajuuden suhde herätteeseen tulisi olla vähintään 2, jotta välttyttäisiin harmillisilta resonanssi-ilmiöiltä.



KUVIO 9. Resonanssi-ilmiö. (25)

2.9 Massalaki, koinssidenssi ja resonanssi-ilmiöt materiaalissa.

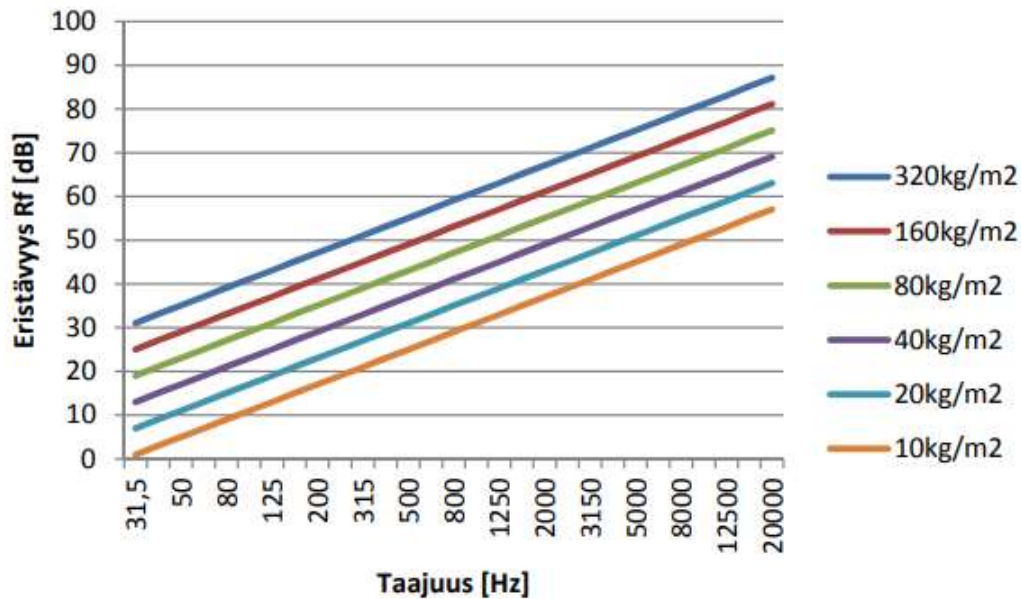
Materiaaliin eristävyyteen vaikuttaa myös kolme tekijää: massalaki, koinssidenssi ja resonanssi. Ne voidaan havainnollistaa kuvion 10 mukaisesti.



KUVIO 10. Massalain, koinsidenssitajuuden ja resonanssi vaikutukset ideaalieristävyteen. (28)

Materiaaleilla on tietynlaiset ominaisuudet kun niitä tarkastellaan akustisesta näkökulmasta. Materiaalia tulisi käyttää sen resonanssin ja koinsidenssin arvojen välillä.

Massalain perusteella voidaan yleisesti esittää myös seuraavanlainen oletamus (kuvio 11).



KUVIO 11. Massalain mukaiset ääneneristävyydet erimassaisille rakenteille. (28)

Kuvaajasta voidaan todeta, että massan kaksinkertaistaminen vastaa aina 6 dB parannusta ääneneristävyyteen. Kannattaa muistaa myös, että materiaalit ovat taajuusriippuvaisia. (26.)

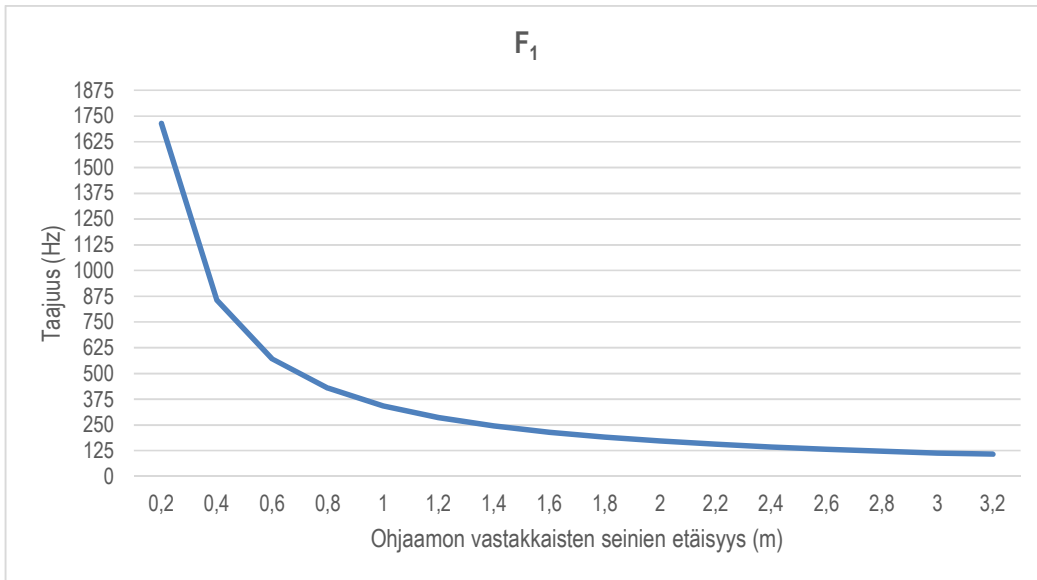
2.10 Seisovat aallot

Seisovat aallot syntyvät tilassa, jossa kaksi vastakkaisiin suuntiin etenevää harmonista aaltoliikettä interferoivat keskenään eli vahvistavat toisiaan. Akustiikassa seisovia aaltoja kutsutaan huonemoodiksi. Ilmiö syntyy kun tilan mitta on puolet ääniaallon pituudesta tai sen monikerta. Aalto vahvistaa itseään kimmotessaan toisesta pinnasta ja jää soimaan voimakkaasti. Moodit ovat varsinkin kuutiomallisten tilojen ongelma. Traktorin ohjaamo on esimerkiksi lähellä kuutiomallia. Kevytseinäisissä rakenteissa matalat taajuudet kulkevat helposti rakenteiden läpi, eivätkä jää voimakkaasti soimaan. (29)

Lasketaan esimerkki ohjaamosta. Seisova aalto voidaan laskea seuraavalla kaavalla. (22; 1)

$$f_1 = \frac{v}{\lambda X^2}, \quad (\text{KAAVA 18})$$

jossa f_1 on perustaajuus (kuvio 12).

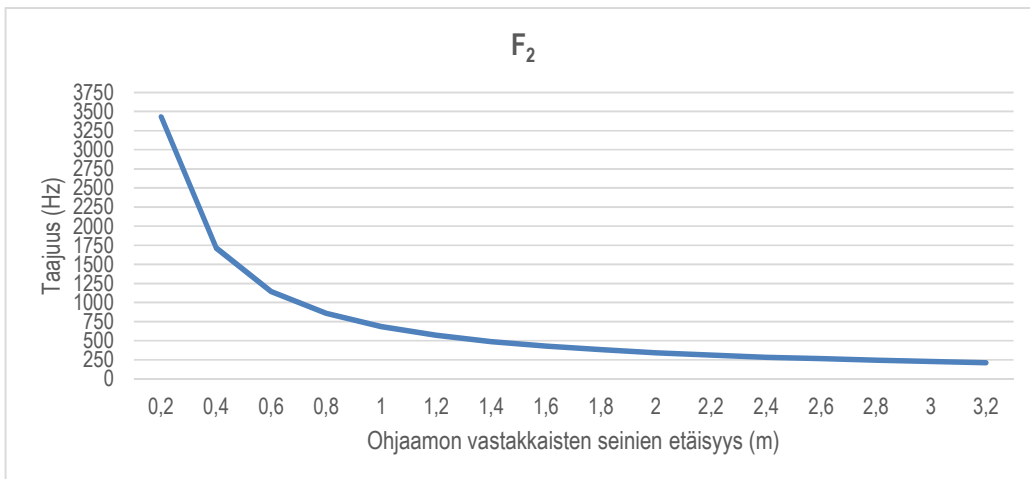


KUVIO 12. Perustaajuus.

$$f_2 = 2f_1,$$

(KAAVA 19)

jossa f_2 on toinen harmoninen taajuus (kuvio 13).

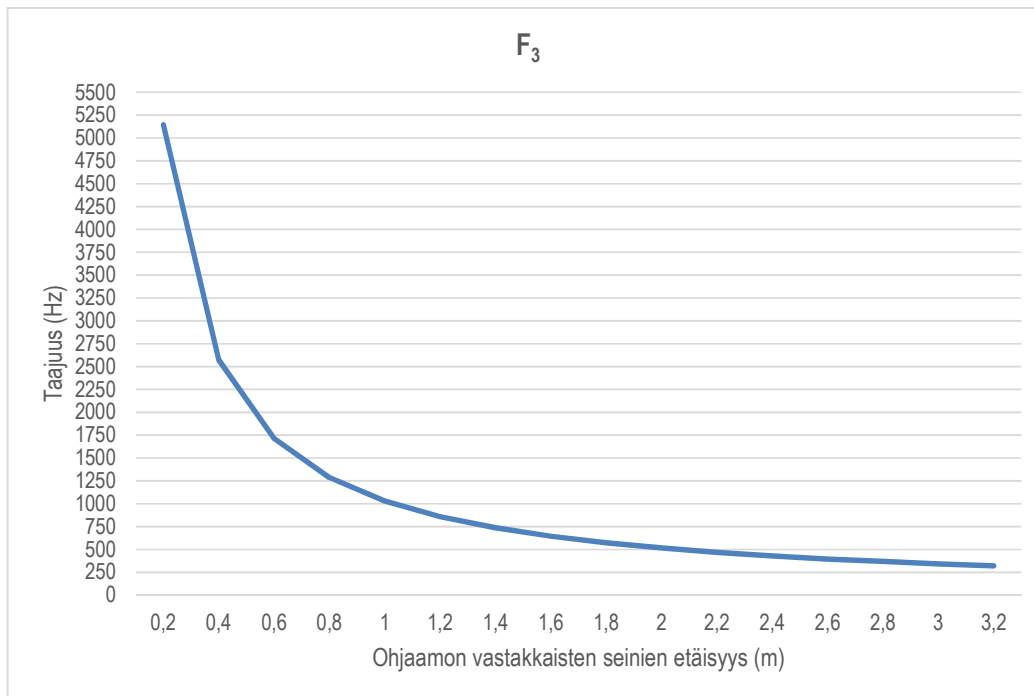


KUVIO 13. Toinen harmoninen taajuus.

$$f_3 = 3f_1,$$

(KAAVA 20)

jossa f_3 on kolmas harmoninen taajuus (kuvio 14).



KUVIO 14. Kolmas harmoninen taajuus.

Kuvioista 12–14 voidaan päätellä, että ohjaamon sisämitat (1.3 - 1.5 X 1.5 X 1.6) asettuvat n. 250 - 650 Hz:n välille. Jos näiden taajuuksien välillä syntyy komponenteista herätteitä, ne voivat aiheuttaa seisovia aaltoja ohjaamon sisälle. Seisovat aallot voivat ilmetä häiritsevinä voimakkaina ääninä kuljettajalle.

Seisovien aaltojen voimakkuus riippuu paljon siitä, millaisia materiaaleja tilassa on. Mitä pienempi tila on ja mitä kovempia pinnat ovat, sitä voimakkaammin ne heijastavat ääntä. Huonemoodit eivät synny ainoastaan kahden samansuuntaisen rajapinnan välille. Huonemoodi tyyppiä on kolme erilaista aksiaali (vaakasuuntainen), tangentiali (sivuava) ja oblique (viistosuuntainen). Kaikkein voimakkain on aksiaalimoodit. (30)

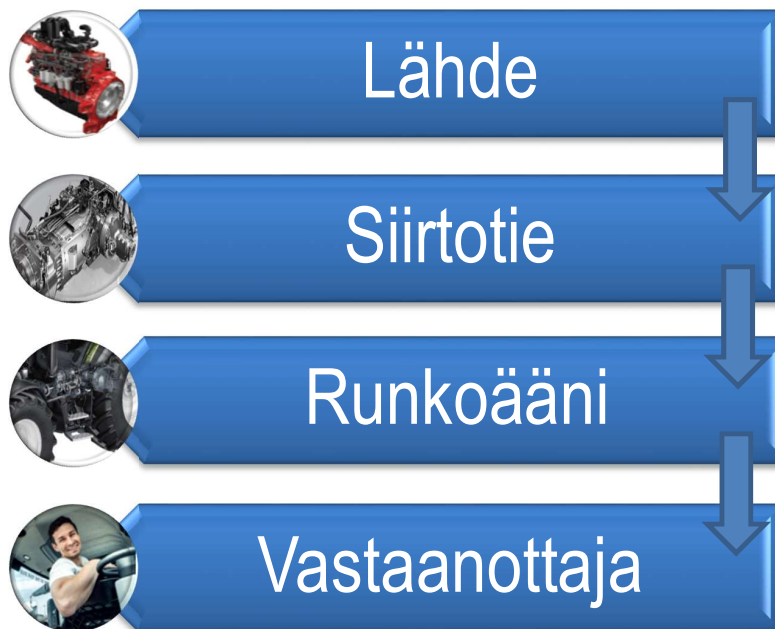
2.11 Rakenteista tuleva äänisäteily

Kuviossa 15 olevilla kahdella asialla on yhteinen ilmiö. Niillä on yhteistä samanlaiset fysikaaliset mekanismit, joiden ympärillä ne toimivat.



KUVIO 15. Äänilähteet. (31;32)

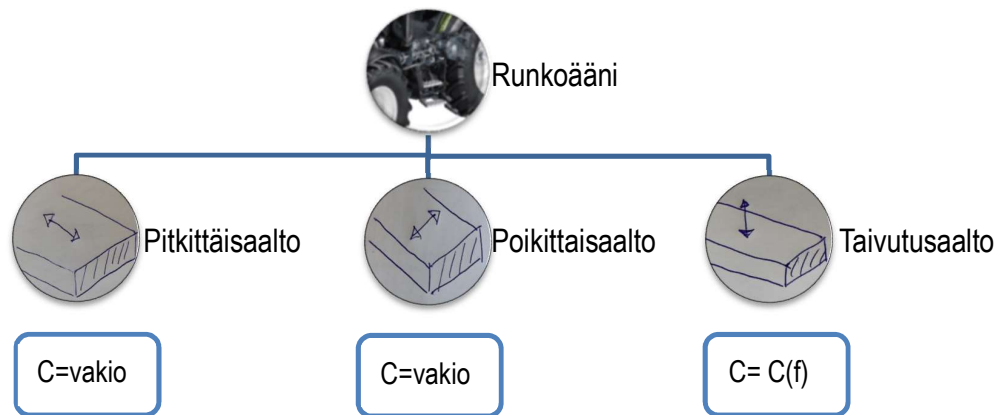
Monissa teknisissä sovelluksissa on tärkeää osata ennustaa. Kuinka paljon jokin värähtelevä rakenne tuottaa melua suunnitteluvaiheessa. Suunniteltava kokonaisuus voidaan jakaa pienempiin komponentteihin ohuet värähtelevät paneelit/levyt, kotelot, tärinäneristimet ja tukipalkit ovat usein komponentteja, jotka säteilevät ääntä. On erittäin hyödyllistä tutkia äänen säteilytehokkuutta peruskomponenteissa, jotta voit muodostaa akustisen kuvauksen rakenteesta. Kuviossa 16 on havainnollistettu runkoäänen kulkumekanismi traktorin ohjaamoon. Dieselmoottorin värähtely kulkeutuu voimansiirtoa pitkin ohjaamorunkoon ja rungon kautta se kulkeutuu viimein ilmaäänenä kuljettajalle. (21)



KUVIO 16. Äänenkulku mekanismit. (32)

”Kiinteässä väliaineessa etenevää värähtelyä kutsutaan runkoääneksi. Runkoäänien etenemissuunta on se suunta, johon äänen energia etenee”. Värähtely (runkoääni) voi edetä kiinteässä väliaineessa monin eri tavoin, mm. pitkittäis-, poikittais-, taivutus- ja vääntöaaltoina. (22)

Melun kannalta tärkein on taivutusaalto. Ohuissa levyissä tämä korostuu, koska taivutusaaltoon liittyvä värähtelynopeus on levyn pinnassa olennaisesti suurempi kuin muilla aaltoon liittyvillä aaltotyypeillä. Taivutusaalto poikkeaa pitkittäis- ja poikittaisaalloista myös siten, että sen etenemisnopeus riippuu taajuudesta. Massiivisissa ja taivutusjäykkissä kappaleissa muutkin aaltotyypit voivat olla melun kannalta merkittäviä. Polttomoottorissa melua aiheuttavat taivutuksen lisäksi mm. vääntöaallot ja koko moottorin liike jäykkänä kappaleena. Kaikkiin aaltotyyppeihin liittyy rakenteen ominaisuuksia, joiden arvot riippuvat rakenteen mitoista ja materiaaliominaisuuksista. Hyvin ääntä säteilevät rakenteet alkavat myös värähdellä herkästi äänen vaikutuksesta ja ne voivat tästä syystä myös eristää ääntä huonosti. Kappaleen äänensäteilyominaisuudet riippuvat myös siitä, aiheuttaako värähtelyn ilma- vai mekaaninen heräte. (22)



KUVIO 17. Runkoääni. (32)

Taivutusaaltojen etenemisnopeus ja aallonpituus levyssä ovat äänen säteilyn kannalta keskeisiä tekijöitä (kuvio 17). Taivutusaallon etenemisnopeus levyssä määräytyy seuraavasta kaavasta. (22)

$$c_b = \sqrt{2\pi fh \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}} = \sqrt{1.8fhc_L} \quad (\text{KAAVA 21})$$

jossa

f on taajuus (Hz)

h on levyn paksuus (m)

E on kimmomoduuli (N/m²)

ρ on tiheys (kg/m³)

ν on Poissonin luku

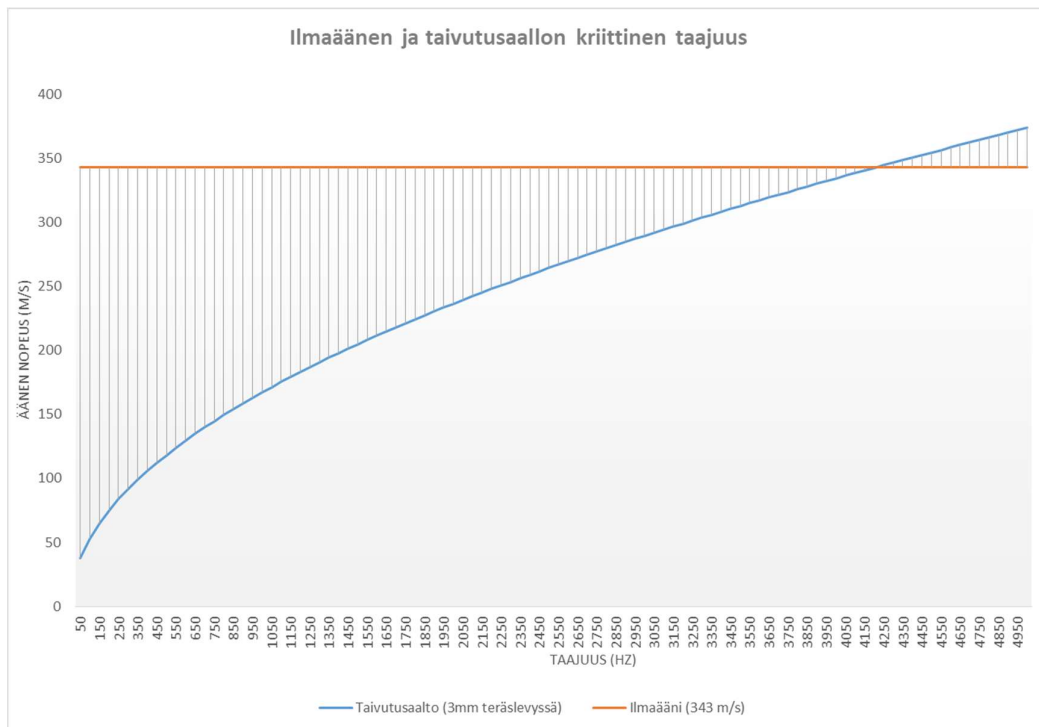
c_L on pitkittäisaallon nopeus materiaalissa (m/s)

Taivutusaallon aallonpituus λ_B saadaan jakamalla nopeus taajuudella.

$$\lambda_B = \frac{c_b}{f} \quad (\text{KAAVA 22})$$

Tehdään kuvaaja (kuvio 18) 3mm teräslevylle, jota käytetään ohjaamossa.

$$\lambda_B = \frac{c_b}{f} \quad (\text{KAAVA 23})$$



KUVIO 18. Taivutusaallon ja ilmaään kriittinen taajuus.

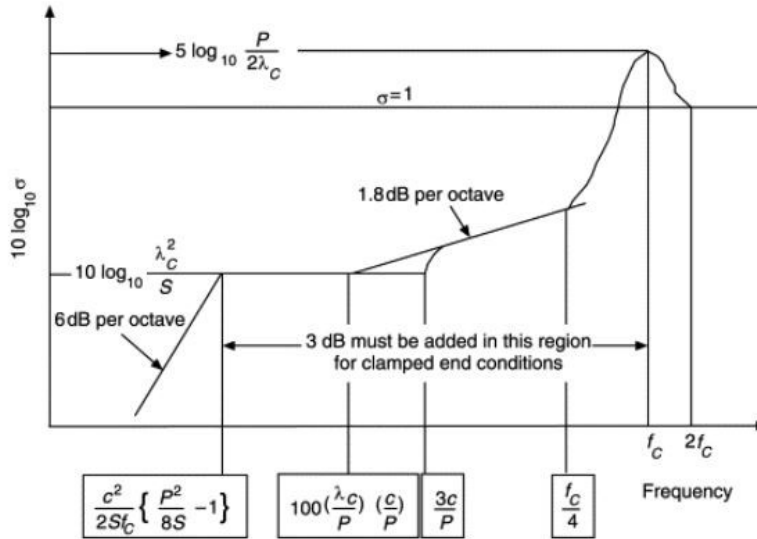
Kuviosta 18 voidaan huomata se, että taivutusaallon kohdatessa ilmaäänen nopeuden n . 4200 Hz:n kohdalla saavutetaan kriittinen taajuus. Kriittisen taajuuden jälkeen äänensäteily nousee. Vä-littyvän äänen voimakkuus riippuu mm. rakenteiden häviöstä, liitoshäviöistä ja sisäisistä materiaalin häviöistä. Ääniteho alenee puoleen, jos säteilevä pinta-ala pienenee 50 %, värähtelynopeus pie-nenee 30 % tai säteilysuhde pienenee 50 %. (22)

Äänilähteen ilmaan säteilemä ääniteho (σ) valitulla taajuudella tai taajuuskaista voidaan laskea kaavalla 24.

$$\sigma = \frac{P}{\rho c S v^2}, \quad (\text{KAAVA 24})$$

jossa P on värähtelevän äänilähteen säteilemä ääniteho, ρ on ilman tiheys, c on äänen nopeus ilmassa, S on äänilähteen pinta-ala ja v^2 on nopeuden neliön aikakeskiarvon pinta-alakeskiarvo. Käytännössä säteilysuhde on pienillä taajuuksilla < 1 ja suurilla taajuuksilla ≈ 1 . (24)

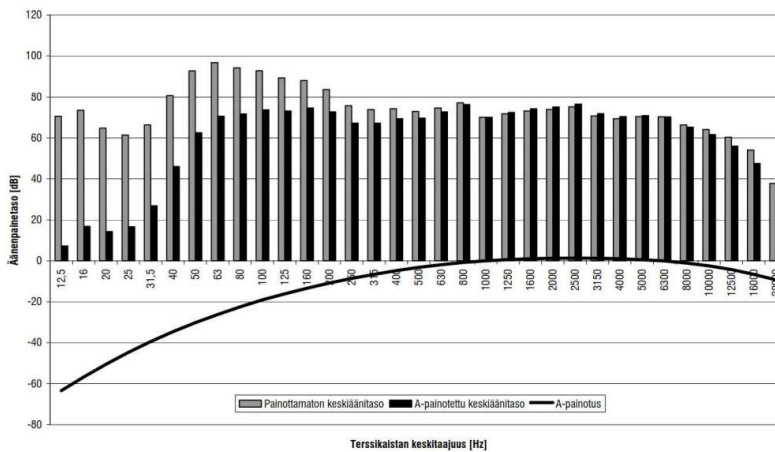
Levyt säteilevät ääntä tehokkaasti. Kun akustinen aallonpituus on samankaltainen tai sitä suurempi kuin rakenne on. Kaikki tuotettu ääni energia ei karkaa pinnasta. Suurin osa siitä vain tarttuu vä-rähtelevän pinnan ympärille eikä koskaan pakene pois. Yksinkertaisesti se lisää värähtelevän ra-kenteen massaa. Tämä johtuu juuri tästä akustisesta aallonpituudesta, kun kappale on liian pieni verrattuna äänen aallonpituuteen nähden. Säteilytehokkuuteen vaikuttaa monia tekijöitä. Se riippuu myös värähtelevästä muodon pinnasta. Hyvin ääntä säteilevät rakenteet alkavat myös värähdellä herkästi äänen vaikutuksesta ja voivat tästä syystä myös eristää ääntä huonosti. Yksinkertaisesti tuetun levyn äänen säteilytehokkuus voidaan esittää kuviossa 19. (22)



KUVIO 19. Yksinkertaisesti tuetun levyn tuottama äänensäteily. (33)

2.12 A-painotus melumittauksissa.

Ihmisen kuuloaisti ei ole yhtä herkkä koko taajuusspektrillä, minkä vuoksi on otettu käyttöön erilaisia painotuksia, kuten A-, B, C tai D-painotusta. Näistä neljästä A-painotus (kuvio 20) on yleisin käytössä oleva ja vastaa ihmisen kuuloaistin taajuusvastetta. Voidaan myös puhua tietyntyylisestä suodattimesta. A- ja C-suotimet kuvaavat ihmisen kuuloaistin taajuusominaisuuksia erilaisille meluille. Suodin ilmaistaan usein A-kirjaimella dimension perässä dB(A). (34)



KUVIO 20. A-painotus. (35)

3 AKUSTISET MITTAUKSET OHJAAMOSSA

Traktorin ohjaamon meluun vaikuttaa monia asioita mm. geometriset muodot, rakenteiden ominaisuuksuudet, materiaalit, pyörivien laitteiden ja koneiden epätasapainot, ohjaamon kiinnitys, liikkuvat osat, värähtelevät pinnat, putkien/letkujen siirtotiet ja pintojen kovuus/pehmeys. Pohdittaessa ohjaamon äänieristettä tai rakennetta täytyy siis huomioida monia seikkoja.

Työn tavoitteena oli mitata ohjaamoon vaikuttavat melulähteet. Tutkimuksissa löytyi 4 erilaista kohdetta, jotka vaikuttavat suurelta osin ohjaamon sisämeluun. Työ jakautui ajallisesti n. vuoden ajalle. Mittaaminen tapahtui siten, että laitoimme kaksi mikrofonia kuljettajan pään korkeudelle ohjaamon sisään simuloidaksemme kuljettajan vasenta ja oikeaa korvaa. Kolmas mikrofoni laitettiin voimansiirron ja ohjaamon väliin. Kuormitimme esimerkiksi traktorin voimansiirtoa takanavasta kiinnitettyä dynamometriin (kuormittava ajo). Mittaamisessa keskityimme korkeimman äänenpaineen tuottaviin taajuuksiin. Mittaaminen tehtiin ns. akustisessa mittaushallissa, joka sijaitsee Valtran tuotekehityksessä Suolahdessa. Halliin on rakennettu ääntä eristävä kammio, jotta ylimääräinen taustamelu ei vaikuttaisi mittaustuloksiin.

Mittausten tuloksena huomattiin, että moottorin palotaajuudet, voimansiirto, paineilmakompressori ja hydraulikan melut olivat isoimmat melun lähteet. Yksi merkittävimmästä melunlähteistä oli dieselmoottorin palotaajuus n. 100 Hz alueella. Yhdessä tapauksessa voimansiirto oli merkittävin melun tuottaja ja toisessa tapauksessa paineilmakompressori. Moottorin jäähdytyksen tuuletin on myös yksi mainitsemisen arvoinen melunlähde.

3.1 Hiljaisen koneen kriteerit

Jotta voitaisiin määritellä, mikä on hiljainen kone, pitäisi selvittää tuotannossa olevan koneen meluominaisuudet. Ensimmäiseksi kannattaisi selvittää äänien syntymekanismit ns. peruskoneessa. Tavoitteena tulisi olla riittävän hiljainen kone, jolloin ei tarvita peruskoneen päälle rakennettuja meluntorjuntavirityksiä, vaan ne ovat jo valmiina koneen rakenteissa osana suunnitteluprosessia. Hiljaisempien rakenneratkaisujen kehittäminen edellyttää aina enemmän resursseja ja aikaa.

Värähtelevät rakenteet ovat usein merkittäviä melunsyntymekanismeja. Tärkeää lisäinformaatiota saadaan koneen erilaisilla värähtely- ja äänimittauksilla. Äänen lähteen ja vastaanottimen ominaisuudet liitoksessa voidaan suunnitella sellaisiksi, että runkoäänen siirtyminen on vähäistä tai tehotonta. Liitoskohtien mobiliteetti vaikuttaa myös rakenteen äänensäteilyyn. Koneen pinnan värähtelynopeus voi olla äänensäteilyn suhteen vähäistä, mutta se voi rakenteessa herättää jonkin pinnan soimaan tehokkaasti.

3.2 Melun vaimentaminen ohjaamossa

Traktorin ohjaamossa ensimmäinen tapa melun torjunnassa olisi vähentää lähteen tuottamaa melua esim. pako- ja imuäänien vaimennuksilla. Toinen tapa on kasvattaa etäisyyttä melunlähteestä (ääni vähenee käänteisen neliön mukaisesti kun etäisyys kasvaa). Jos nämä eivät ole mahdollisia, seuraava keino on heikentää melun siirtymistä kuuntelijalle. Ääni siirtyy kahden mekanismin välityksellä joko kummankin tai ainoastaan toisen kautta, ilmanteitse ja rakenteita pitkin. Rakenteita pitkin kulkeutuva äänisäteily voidaan vaimentaa erottamalla sen lähde muusta rakenteesta käyttäen esim. tärinäeristimiä. Jos värähtelevää toimilaitetta ei voi eristää, voidaan rakenteeseen tehdä joustava katko eli eristetään se kokonaan omaksi rakenteeksi.

Värähtelyn etenemistä on hankalaa tarkastella koko rakenteessa. Rakenne kannattaa pilkkoa pienempiin osakokonaisuuksiin, jolloin on helpompi havainnoida äänilähteiden siirtoteitä.

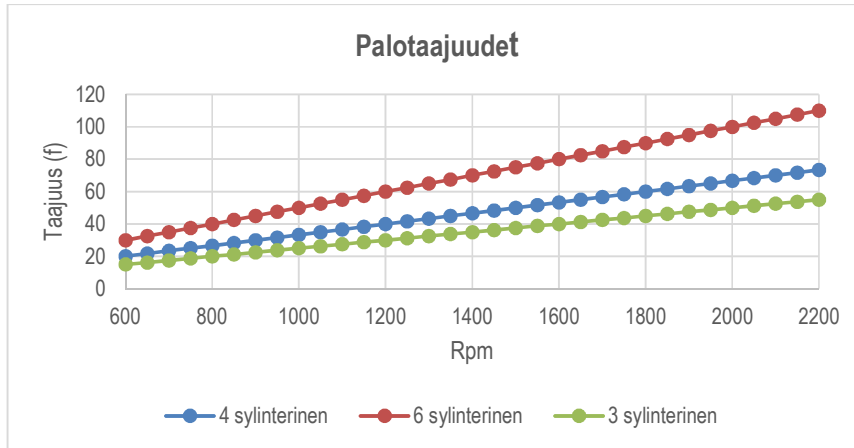
3.3 Dieselmoottorimelun vaikutus ohjaamoon

Moottorin ääni koostuu joukosta tonaalisia komponentteja, jotka ovat peräisin moottorin mekaanisesta toiminnasta. Polttomoottorissa kaikki energia on lähtöisin polttoaineen palamisesta. Staattiset voimat eivät synnytä melua. Nykypäivänä dieselmoottorissa on yleensä turboahdin, joka tuo oman lisän meluun. Ahtamaton moottori on hivenen hiljaisempi kuin ahdettu. (22)

Pako- ja imumelu koostuvat polttoaineen palamiseen ja virtauksiin liittyvistä ääneksistä ja laajakaislaisesta melusta. Tärkein pakomelun komponentti on palotaajuus. Polttoaineen palaminen sylinterissä aiheuttaa kaasun äkillisen laajenemisen johtuvan iskun, joka toimii värähtelyn herätteenä. Palotapahtuma (palotaajuus) noudattaa aina sylinterien lukumäärän puolikas kerrottuna kampiakselin pyörimistaajuudella. (36)

Liitteestä 1 ja 2 mitattujen taajuuksien perusteella moottorin toinen kertaluku (100 Hz) nousee melun kannalta epäsuotuisasti. Liitteet on poistettu opinnäytetyöstä työn tilaajan toiveesta.

Kuviosta 21 voidaan todeta dieselmoottorien palotaajuuksien ero eri sylinterimäärillä. Kuvaajasta voimme päätellä, että 3- tai 4-sylinterisen ero ei ole iso. Traktorin ns. normaali työkierrokset ovat n. 1500 rpm.



KUVIO 21. Palotaajuudet.

3.4 Voimansiirtomelun vaikutus ohjaamoon

Voimansiirto tuottaa myös merkittävää melua ympäristöönsä. Usein siihen liittyy vaihteiston tai muun rakenteen mekaaninen ominaistaajuus. Hammaspyörien ryntötaajuuskomponentin synnyttämä värähtely ja melu vahvistuvat ominaistaajuudella. Voimansiirto melu on voimakkaasti pyörimisnopeudesta riippuva. Suorahampaiset hammaspyörät synnyttävät tunnetusti voimakkaamman herätteen kuin vinohampaiset pyörät. Jos voimansiirrossa pyritään akselien ym. keveyden vuoksi käyttämään mahdollisimman suuria pyörimisnopeuksia, korostuu voimansiirtomelun merkitys. Pyörimisnopeus ei kuitenkaan itsessään synnytä melua, vaan epäkeskisyys, josta aiheutuva herätevoima on verrannollinen pyörimisnopeuden neliöön. Hydraulisen voimansiirron merkitys melulähteenä on tapauskohtainen-, johtuen pumppujen sykintätaajuuksista. (22)

Voimansiirron aiheuttama meluongelma on tyypillisesti spesifisellä taajuudella esiintyvä voimakas ääni. Tämä johtuu monista asioista esimerkiksi hydraulipumppujen synnyttävästä painesykintätaajuudesta. Hydrauliikkaventtiilit synnyttävät laajakaistaista virtausääntä. Esimerkiksi hydrauliikka-komponentti kiinnitetään jäykästi ohueen levypintaan, syntyy varmasti melua.

Hand (1982) havaitsi, että kun nopeus kaksinkertaistuu, vaihteistomelu lisääntyy 6-8 dB. Hän havaitsi myös, että kuorman kaksinkertaistuksessa melu nousee 2,5 - 4 dB. (37)

Vaihteiston perustaajuudet voidaan laskea seuraavalla kaavalla

$$f = \frac{nN}{60}, \quad (\text{KAAVA 25})$$

jossa f on hammaspyörän perustaajuus (Hz), n on hammaspyörän nopeus (rpm) ja N on hammaspyörän lukumäärä. (37)

Perustaajuuden lisäksi voimansiirto tuottaa monikertoja näistä. Yleensä merkittävimmät ovat näistä toinen ja kolmas monikerta ($f_2 = 2f$, $f_3 = 3f$ jne). (37)

Voimansiirron melut ovat yleensä korkeammilla taajuuksilla esiintyviä kuin moottorin palotaajuudet. Tämä johtuu hammaspyörien ja pumppujen korkeammista pyörintänopeuksista.

Voimansiirron runko on yleensä massiivinen. Tämä on haasteellista melujen suhteen, koska valurautakomponentit ovat pinta-alaltaan suuria. Mitä suurempi komponentti on, sen tehokkaammin se säteilee ääntä ympäristöön. Liitteen 3 mukaisesti yhdessä tapauksessa merkittävin melun aiheuttaja oli yksi voimansiirron komponentti. Liite on poistettu opinnäytetyöstä työn tilaajan toiveesta.

3.5 Pneumatiikan ja hydrauliiikan melu ohjaamossa

Paineilma- ja moottorimelulla on hyvin samankaltaiset ilmiöt, imu- ja pakomelut. Paineilmaa järjestelmään tuottaa mäntäkompressori, jota traktorin moottori pyörittää jatkuvasti hihnan välityksellä. Mäntäkompressorissa mäntä imee ilmaa kompressorin sylinteriin, jolloin imuventtiili on auki (imutahti). Männen noustessa ylös imuventtiili sulkeutuu. Ilma puristuu riittävään paineeseen, jolloin

poistoverkko avautuu päästään (pakotahti) paineilman järjestelmään. Ylipaine päästetään suoraan ulkoympäristöön.

Melu, joka syntyy kompressorissa, johtuu imu- ja pakotahdeista, kun venttiilit aukeavat ja sulkeutuvat männän puristus ja imutahdeissa. Myös putkien liitosten aiheuttamat suunnanmuutokset häiritsevät ilman virtausta aiheuttaen melua.

Yleisin hydrauliiikan melua tuottava komponentti on pumppu. Pumpun nesteääntä esiintyy painesykintätaajuudella ja sen kerrannaistaajuuksilla. Nesteääntä on kapeakaistaista, joka voidaan erottaa selvästi muista taajuuksista. Liitteen 1 ja 2 mukaisen mittauksen mukaan ilmakompressorin melu nousi selkeästi esille. Liitteet on poistettu opinnäytetyöstä työn tilaajan toiveesta.

4 TULOKSET JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittauksia tehtäessä ohjaamomelun kannalta merkittäviksi tekijöiksi osoittautuivat matalataajuiset dieselmoottorin palotaajuudet, voimansiirron taajuudet ja pneumatiikan taajuudet. Ohjaamon melun kannalta merkittävimmäksi siirtotieksi osoittautui ilmaääni. Näiden pohjalta voidaan todeta seuraavia suosituksia suunnittelun tueksi.

1. On pyrittävä valitsemaan jo suunnittelun alkuvaiheessa mahdollisimman hiljaisia komponentteja tai välttämään sellaisia komponentteja, jotka tuottavat 250–650 Hz:n taajuuksia.
2. Traktorin ohjaamo voidaan kuvitella olevan eräänlainen kaiutin. Kaiuttimen kalvo värähtelee ilmassa, ja se tuottaa ilmanpainetta, joka havaitaan äänenä. Mitä enemmän kalvolla on amplitudia, sitä voimakkaampana ääni koetaan. Käytännössä tästä voidaan johtaa analogia traktorin ohjaamon. Ohjaamon rakenteiden pinnat toimivat vastaavanlaisesti kaiuttimen kalvoina, jotka tuottavat ääntä. Mitä enemmän rakenteella on pinta-alaa, sitä paremmin se tuottaa ääntä. Runkoäänen äänitehoon pätee seuraava asia. Se on verrannollinen kappaaleen pinnan normaalin suuntaisen värähtelynopeuden neliöön ja suoraan verrannollinen säteilevän pinnan alaan ja säteilysuhteeseen.
3. Ensimmäisenä pitäisi miettiä komponenttien eristämistä/vaimentamista, siten, etteivät ne pääse tuottamaan harmillisia taajuuksia muihin rakenteisiin. Jos tämä ei onnistu, niin viimeinen keino on äänen vaimentaminen ohjaamossa.
4. Kannattaa muistaa, että koko systeemi on niin hyvä kuin sen huonoin komponentti/rakenne.
5. Melun vähentämisen suunnittelun ensimmäisenä päämääränä tulisi olla sellaisten komponenttien valinta, joista syntyy vähiten melua. Vasta tämän jälkeen turvaudutaan muihin toimenpiteisiin. On halvempi vaihtaa huono komponentti, kuin tehdä kustannuksiltaan kalliimpi äänenvaimennus ohjaamoon.

5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli selvittää traktorin ohjaamoon tulevien äänien ja melun vaimentaminen kustannustehokkaasti.

Vuoden aikana testattiin ohjaamoita erilaisilla kokoonpanoilla mm. eri voimansiirroilla ja varustuksilla. Jokaisen testiajon ensimmäisenä prosessina mitattiin ns. referenssimittaus, johon vertasimme erilaisten muutoksien vaikutukset ohjaamoon. Tällä menetelmällä voitiin saada luotettavat ja toistettavat mittaustulokset vertailukelpoisiksi. Mittauskaluston asettelupaikat otettiin huomioon ohjaamossa. Taustamelun vaikutus minimoitiin sillä, että mittaus tapahtui akustisessa hallissa. Hallin hiljaisuuden vuoksi taustamelulla ei ole merkitystä kokonaistuloksiin.

Työssä saavutettiin sille asetetut tavoitteet, jos ei oteta rengasmelua huomioon. Rengasmelun tutkiminen voisi olla myös tulevaisuudessa varteen otettava tekijä. Tämä opinnäytetyö auttaa tunnistamaan merkittävimmät melun aiheuttajat traktorin ohjaamossa ja antaa lähtökohtia jatkotutkimuksille, kun mietitään ohjaamon rakenteita tai muiden melunaiheuttajien äänen vaimentamiselle. Värähtelyjen ja melujen vaimentaminen on liikkuvissa työkoneissa haastavaa, koska kasvavan kone-tehon lisääminen ja komponenttien keveys tuovat melua lisää. Ohjaamoiden rakenteet ja dimensiot eivät mahdollista helposti perinteisten paksujen äänieristeiden käyttöä, joten ohjaamon kannalta tulisi miettiä uusia ratkaisuja meluntorjuntaan.

LÄHTEET

1. Pohjola, Markku 2016. Soitinten fysiikka. Oulun yliopisto. Fysiikan koulutusohjelma. Pro Gradu-tutkielma. Hakupäivä 10.5.2022. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201702231185.pdf>.
2. Akustiikkapalvelut. Mitä ääni on? Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.akustiikkapalvelut.fi/akustiikan-perusteet/aani>.
3. Mäkinen, Sakari 2015. Kuvakaappaus. Mekaaninen aaltoliike. Hakupäivä 10.5.2022. <https://peda.net/p/Jarkko%20Helin/fysiikka/fvm/ma2/av/ma>.
4. Binogi 2022. Äänen eteneminen. Hakupäivä 10.5.2022. <https://app.binogi.fi//aeaenen-eteneminen>.
5. Puttonen, Mikko 2017. Mikään ei lennä niin kuin hyttynen. Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.hs.fi/tiede/art-2000005149034.html>.
6. Wikipedia. Hertz, Heinrich 2022. Hakupäivä 10.5.2022. https://fi.wikipedia.org/wiki/Heinrich_Hertz.
7. Vairimaa, Reetta 2020. Eläimet viestivät taajuuksilla, joita ihminen ei kuule: mitä kirahvi, norsu, delfiini ja lepakko sanovat? Uutiset ja tiedotteet. Helsingin yliopisto. Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.helsinki.fi/fi/uutiset/elamantieteet/elaimet-viestivat-taajuuksilla-joita-ihminen-ei-kuule-mita-kirahvi-norsu-delfiini-ja-lepakko-sanovat>.
8. HearingProTech. Kuvakaappaus. Characterization of sound. Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.hearingprotech.com/en/topics/noise/characterization-of-sound.html>.
9. Wikipedia. Equal-loudness contour 2022. Hakupäivä 15.5.2022. https://en.wikipedia.org/wiki/Equal-loudness_contour.
10. Wikipedia. Desibeli 2021. Hakupäivä 10.5.2022. <https://fi.wikipedia.org/wiki/Desibeli>.

11. Climecon 2022. Climecon-dokumentit. Äänitekniikan opas. Hakupäivä 10.5.2022.
https://climeconair.com/fi-fi/documents/?_sft_document_type=opas.
12. Wikipedia. Äänenpaine 2022. Hakupäivä 10.5.2022.
<https://fi.wikipedia.org/wiki/%C3%84%C3%A4nenpaine>.
13. Seppänen, Saara 2015. Metalliteollisuudessa esiintyvän melun mittaaminen, arviointi ja mittausmenetelmien kehittäminen työturvallisuuden näkökulmasta. Tampereen teknillinen yliopisto. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Hakupäivä 10.5.2022.
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/23524/Seppanen.pdf?sequence=3>.
14. Smed, Jouni 2010. Kuvakaappaus. Digitaalisen äänenkäsittelyn perusteet. Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.slideshare.net/JouniSmed/digitaalisen-nenksettelyn-perusteet-kalvot-2010-27768740>.
15. Wikipedia. Precedence effect 2022. Hakupäivä 10.5.2022.
https://en.wikipedia.org/wiki/Precedence_effect.
16. Puuinfo 2020. Ohjeet. Ääneneristys puutalossa. Hakupäivä 10.5.2022
<https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/aaneneristys-puutalossa/>.
17. Sjöman, Mikael 2015. Huoneakustiikka. Tampereen ammattikorkeakoulu. Viestinnän koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.5.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/94806/Sjoman_Mikael.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
18. Tuunainen, Leevi 2018. Akustiikkalevyn standardin mukainen absorptioalan mittaus. Karélia ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/145737/AkustiikkalevynStandardinMukainenAbsorptioalanMittaus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
19. SFS-EN ISO 354:2003(E). Acoustics-Measurement of sound absorption in a reverberation room. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Hakupäivä 15.12.2021. <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/3/13506.html.stx>. Vaatii lisenssin.

20. Kimmco Isover 2022. Optimized Acoustic Comfort. Hakupäivä 12.5.2022. <https://www.kimmco-isover.com/building/why-insulation-buildings/optimized-acoustic-comfort>.
21. Manninen, Timo 2010. Vaaralliset äänet. Lahden Ammattikorkeakoulu. Musiikin koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.5.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/23608/Manninen_Timo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
22. Tanntari, Jukka & Saarinen, Kari 1995. Työkoneiden melun vähentäminen – perusteet. Tampere: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
23. Rönkkö, Antti & Pajarinen, Tuomas 2018. Ilmaääneneristävyyden suunnittelu ja mittaus oppilaitoskohteessa rakenne- ja taloteknisestä näkökulmasta. Karelia-Ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan- ja talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.5.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/146426/Ronkko_Antti.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
24. Hentinen, Markku, Hynnä, Pertti, Lahti, Tapio, Nevala, Kalervo, Vähänikkilä, Aki, Järvi-
luoma, Markku 2002. Värähtelyn ja melun vaimennuskeinot kulkuvälineissä ja liikkuvissa
työkoneissa. VTT tiedotteita 2160. Espoo. Hakupäivä 10.5.2022.
<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2002/T2160.pdf>.
25. Puuinfo 2021. Kuvakaappaus. Ohjeet. Ääneneristys puutalossa. Hakupäivä 10.5.2022
<https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/aaneneristys-puutalossa/>.
26. Laine, Petteri, Yli-Kätkä, Veli-Matti, Hosiokangas, Jari 2014. Ikkunoiden ääneneristävyyso-
minaisuudet ja niiden vaikutus julkisivujen ääneneristävyyteen. Kirjallisuusselvitys. Li-
kennevirasto. Helsinki. Hakupäivä 10.5.2022. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2014-52_ikkunoiden_aaneneristavyysominaisuudet_web.pdf.
27. Hyttinen, Lari 2021. Blogi päivitys 18.1.2021. Hakupäivä 10.5.2022. <https://cad-works.fi/en/articles/staattinen-laskenta-ei-aina-riita-varaudu-resonans>.

28. Laine, Petteri, Yli-Kätkä, Veli-Matti, Hosiokangas, Jari 2014. Kuvakaappaus. Ikkunoiden ääneneristävyysominaisuudet ja niiden vaikutus julkisivujen ääneneristävyyteen. Kirjallisuusselvitys. Liikennevirasto. Helsinki. Hakupäivä 10.5.2022. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2014-52_ikkunoiden_aaneneristavyyso ominaisuudet_web.pdf.
29. Wikipedia. Seisova aalto. Hakupäivä 10.5.2022. https://fi.wikipedia.org/wiki/Seisova_aalto.
30. Jussila, Risto 2016. Makuuhuoneesta äänen jälkituotantotilaksi. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Elokuva ja televisio koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.5.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/118542/Jussila_Risto.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
31. Lindfors, Tuomo 2018. Kuvakaappaus. Kitara. Hakupäivä 10.5.2022 <https://www.flickr.com/photos/tlindfors/25137372977>.
32. Valtra. Kuvakaappaus. Valtra brand design guide. Hakupäivä 10.5.2022
Valtran intranetistä otettu kuva.
33. Sound Radiation 2022. Kuvakaappaus. Sciencedirect. Hakupäivä 10.5.2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/sound-radiation>.
34. Vartio, Jussi 2017. Ilmastoinnin aiheuttamat ääniongelmät opetustiloissa kotkantien kampuksella. Oulun Ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.5.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132355/vartio_jussi.pdf?sequence=1.
35. Vartio, Jussi 2017. Kuvakaappaus. Ilmastoinnin aiheuttamat ääniongelmät opetustiloissa kotkantien kampuksella. Oulun Ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. Hakupäivä 10.5.2022. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/132355/vartio_jussi.pdf?sequence=1
36. Saarimäki, Jukka 2019. Uusien dieselmoottoreiden värähtelymittaukseen perustuva kunnonvalvonta. Tampereen yliopisto. Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma.

Diplomityö. Hakupäivä 10.5.2022. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117031/SaarimakiJukka.pdf?sequence=2>

37. Raichel, Daniel R. 2006. The science and applications of acoustics. School of Architecture. Urban design and landscape design the city college of the city university of New York. Hakupäivä 10.5.2022. https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_198.pdf.