

Perttu Peltola

Suurten ilmavirtojen poistoilmalaitteen kehittäminen

Opinnäytetyö
Talotekniikka


Maaliskuu 2014




MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

| | | | |
|---|--|-----------------------|------------|
|  MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences | Opinnäytetyön päivämäärä | | |
| Tekijä(t) Perttu Peltola | Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikan koulutusohjelma, LVI-tekniikka | | |
| Nimeke Suurten ilmavirtojen poistoilmalaitteen kehittäminen | | | |
| Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kehittää Lindab Groupin mallistoon suurten ilmavirtojen poistoilmalaite, tutustua tuotekehitysprosessin kulkuun sekä tuottaa tarvittava tekninen dokumentaatio valmiin tuotteen myyntiä varten.</p> <p>Tuotteelle haettiin optimaalisinta rakennetta valmistamalla useita sarjoja prototyyppejä, joille tehtiin lukuisia testejä laboratoriossa. Tuotekehitysprosessi oli tämän tuotteen kohdalla hieman totutusta kaavasta poikkeava, sillä vaatimusmäärittelyn ja tuotteen luonnostelun jälkeen prosessi eteni enemmän tai vähemmän abstraktissa järjestyksessä. Tästä hyvänä esimerkkinä, että ensimmäiset viralliset piirustukset laadittiin vasta, kun tuotteella oli valmis rakenne ja kaikki laboratoriomittaukset oli tehty.</p> <p>Tuotteen rakenteen suunnittelussa keskityttiin tekemään mahdollisimman hiljainen tuote etsimällä optimaalinen imukartion rakenne ja valitsemaan oikea vaimennusmateriaali. Tuotteesta saatiin mitattua kaikki tarvittava tekninen dokumentaatio, joka on tämän työn liitteenä.</p> <p>Prosessin lopputuloksena on valmis, teknisiltä ominaisuuksiltaan erinomainen, mutta kustannuksiltaan edullinen tuote, joka koostuu jo ennestään valmistuksessa olleista standardi-osista. Tämä prosessi myös opetti, että poikkeamalla totutusta kaavasta ja olemalla innovatiivinen voidaan ylittää erittäin hyvään lopputulokseen.</p> | | | |
| Asiasanat (avainsanat) tuotekehitys, ilmanvaihto, poistoilma, suuret ilmavirrat | | | |
| Sivumäärä 27+7 | <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Kieli Suomi</td> <td style="width: 50%;">URN</td> </tr> </table> | Kieli Suomi | URN |
| Kieli Suomi | URN | | |
| Huomautus (huomautukset liitteistä) | | | |
| Ohjaavan opettajan nimi Mika Kuusela | Opinnäytetyön toimeksiantaja Lindab Group, Business area ventilation, Comfort division | | |

DESCRIPTION

| | | | |
|--|----------------------------|---|--|
|  MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences | | Date of the bachelor's thesis | |
| Author(s) Perttu Peltola | | Degree programme and option Building services, HVAC-technology | |
| Name of the bachelor's thesis Development of exhaust device for high air volumes | | | |
| Abstract <p>The aim of this thesis was developing the exhaust device for high air flows for Lindab Group. Other purposes was getting familiar with product development processes and prepare technical documentation for "market ready" product.</p> <p>For finding the best structural solutions many prototypes was produced. All prototypes were also tested on laboratory. For that reason the product development process was little bit abnormal in this case. After the requirement specification and sketching the product, the process continued in an abstract order. For example, the first official drawings were created when the product already had the final structure and when the all laboratory tests were done.</p> <p>The main goal of this product development process was to develop as silent product as possible. That was done by trying to find the optimal structure for inlet cone and choosing the right attenuation material. All essential technical data was also measured and it can be found as attachment of this thesis.</p> <p>The final result of this process is a new product with excellent technical features and low production costs. The new product consists of standard parts, which already can be found from Lindab's product range. This process shows that innovatively going beyond procedure in the development process can bring great results.</p> | | | |
| Subject headings, (keywords) product development, ventilation, exhaust air, big airflows | | | |
| Pages 27+7 | Language Finnish | URN | |
| Remarks, notes on appendices | | | |
| Tutor Mika Kuusela | | Bachelor's thesis assigned by Lindab Group, Business area ventilation, Comfort division | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | TUTKIMUSKOHTTEEN ESITTELY..... | 2 |
| 3 | TUOTEKEHITYS..... | 3 |
| 3.1 | Tuotekehityksestä prosessina..... | 3 |
| 3.2 | Tehtävän rajausta ja tarkennus | 4 |
| 3.3 | Luonnostelu- ja viimeistelyvaihe..... | 5 |
| 4 | ILMANVAIHTOLAITOKSEN ÄÄNITEKNIikka..... | 6 |
| 4.1 | Ääni fysikaalisena ilmiönä | 6 |
| 4.2 | Äänen vaimeneminen | 9 |
| 4.3 | Ilmanvaihdon äänilähteet..... | 9 |
| 4.3.1 | Puhaltimen ääni..... | 9 |
| 4.3.2 | Virtausääni | 10 |
| 4.3.3 | Päätelaitteiden aiheuttama ääni..... | 11 |
| 5 | MITTAUSMENETELMÄT | 11 |
| 5.1 | Kaiuntahuonemenetelmä | 15 |
| 5.2 | Mitattavat parametrit ja arvot | 17 |
| 5.3 | Prototyypit ja niiden rakenne..... | 17 |
| 5.3.1 | Säätöpelti..... | 18 |
| 5.3.2 | Äänenvaimennin | 18 |
| 5.3.3 | Imukartio..... | 19 |
| 5.4 | Laitteiden oman äänenkehityksen mittaaminen..... | 20 |
| 5.5 | Vaimennuksen mittaaminen | 21 |
| 6 | TULOKSET | 21 |
| 6.1 | Äänitasokäyrät ja painehäviöt..... | 22 |
| 6.2 | Vaimennus | 22 |
| 6.3 | Tuotteen lopullinen rakenne | 23 |
| 7 | POHDINTA | 25 |
| | LÄHTEET..... | 26 |

LIITTEET

- 1 Vaimennustaulukot (ensimmäiset prototyypit)
- 2 Ääni- ja painehäviödiagrammit+ vaimennukset (valmis tuote)

KÄSITTEET JA MÄÄRITELMÄT

Acutec:

Lindab Groupin rekisteröimä kaupp nimi polyesterikuidulle. Polyesterikuitu on materiaali, joka koostuu polyeteenitereftalaatista ja se on hajuton ja homehtumaton materiaali, joka ei juurikaan sido itseensä kosteutta

A-painotus:

Taajuuspainotus, joka korjaa äänitasot vastaamaan ihmisen keskimääräisen kuuleman taajuusvastetta.

Bernoullin yhtälö:

Kokoonpuristumattomaan kitkattomaan virtaukseen sovellettava yhtälö.

Diffuusi äänikenttä:

Diffuusista äänikentästä puhutaan silloin kuin äänenpaine on vakio kaikissa kohdin huonetta.

Intensiteetti:

Fysiikassa esiintyvä suure, joka kertoo kuinka paljon energiaa aikayksikössä siirtyy aallon mukana pinnan läpi pinta- alayksikköä kohden.

K-Arvo:

Ilmanvaihtotekniikassa laitteelle ominainen arvo, joka esiintyy ilmavirran ja paineen välistä suhdetta kuvaavassa yhtälössä $q_v = k \cdot \sqrt{\Delta p}$

Markkinaselvitys:

Selvitys jonkin tuotteen tai palvelun kysynnästä markkinoilla.

Oktaavi:

Äänen taajuus kaksinkertaistuu.

Puhaltimen ominaiskäyrä:

Puhaltimen teknisiä ominaisuuksia kuvaava diagrammi.

PVA:

Lindabin valmistama pyöreä äänenvaimennin, jonka vaimennusmateriaalina toimii mineraalivilla

PVD:

Lindabin valmistama pyöreä äänenvaimennin, jonka vaimennusmateriaalina toimii polyesterikuitu.

Referenssikohde:

Mallikohde, jossa tuotetta tai palvelua käytetään.

Sabine:

Sabineen kaava, joka kuvaa jälkikaiunta-ajan, huoneen tilavuuden ja absorptioalan yhteyttä.

SIT/Six thinking hats:

Kuusi ajatushattua on Edward De Bonon kehittämä tekniikka ajattelun ja keskustelun apuvälineeksi.

(Taajuus)dekadi:

Luonteeltaan logaritminen väli, jonka yläraja on alarajan kymmenkerta.

Tuotekonsepti:

Tuotteen tain palvelun varhaisin ilmentymä, seuraava askel ideasta tai aloitteesta.

Äänenpainetaso L_p :

Suure, jolla mitataan äänen voimakkuutta, tarkalleen äänenpaineen tehollisarvon ja vertailupaineen suhteen neliön kymmenkantainen logaritmi kymmenellä kerrottuna (dB).

Äänen tehotaso L_w :

Äänilähteen ympäristöön säteilemä ääniteho (W)

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää Lindabin tuotevalikoimaan suurten ilmavirtojen poistoilmalaite, jonka käyttökohteita ovat esimerkiksi teollisuuden kiinteistöt, hallit, varastot, huoltoasemat ja marketit. Aihe kiinnostaa Lindabia, koska myyntiorganisaatiossa on havaittu kysyntää tämän kaltaiselle tuotteelle sekä tuotevalikoimassa on havaittu puute tämän kaltaisen laitteen osalta. Opinnäytetyössä selvitettäviä asioita ovat muun muassa tuotteen todellinen kysyntä sekä urakoitsijoiden ja suunnittelijoiden tarpeet tämän kaltaiselle laitteelle. Tarkoituksena on myös suunnitella laitteelle säännökset täyttävä rakenne, optimaalisin valmistusmenetelmä, selvittää sarjavalmistuksen kannattavuus ja tuotteen tekniset ominaisuudet kuten k-arvot, painehäviöt, oma äänenkehitys ja vaimennus. Tarkoituksena on myös selvittää, onko tällainen tuote mahdollista valmistaa järkevästi sekä vastaavatko sen tekniset ominaisuudet sille asetettavia vaatimuksia.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään pääasiallisesti tuotteen teknisiin ominaisuuksiin sekä valmistusteknisiin seikkoihin. Työssä ei käsitellä tuotekehitysprosessin kaupallista puolta.

Lindab on kansainvälinen ohutlevy- ja terästuotteita kehittävä, valmistava ja markkinoiva konserni. Yritys on erikoistunut ratkaisuihin, joilla voidaan yksinkertaistaa rakentamista ja parantaa rakennusten sisäilmastoa. Yrityksen liikevaihdosta 80 % tulee liiketilojen uudisrakentamisesta ja saneerauksista ja noin 20 % asuinkiinteistöjen uudisrakentamisesta ja saneerauksista. Konsernin liikevaihto vuonna 2011 oli noin 780 miljoonaa euroa. Lindabin päämarkkina-alueita ovat Pohjoismaat, Länsi-Eurooppa sekä Keski- ja Itä-Eurooppa. Suomessa Lindab toimii kolmella eri liiketoiminta-alueella, joita ovat Ventilation, Building Components ja Buildings. Lindab työllistää noin 4300 henkilöä 31 maassa. Suomessa työntekijöiden määrä on noin 120. /1/.

Tähän opinnäytetyöhön liittyvät mittaukset tehtiin Lindabin laboratoriossa Tanskan Farumissa. Lindabilla on käytössään yksi maailman parhaista ilma- ja akustiikkalaboratorioista, jotka täyttävät EN ISO 72325 -standardit. Ilmalaboratoriossa pystytään simuloimaan erilaisia huoneolosuhteita sekä tekemään suuriakin täysmittakaavakokeita ilmastonin päätelaitteille ja jäähdytyspalkeille. Äänilaboratoriossa taas on käytet-

tävissä 203m³ kaiuntahuone kiertävällä Brüel & Kjær- mikrofoniella varustettuna. Kaiuntahuoneen mitat ovat 7,2x2,5x4,7 metriä, ja se painaa 147 tonnia. Huone kelluu 32 ilmatyynyn päällä rakenteellisen melun ehkäisemiseksi.

2 TUTKIMUSKOHTTEEN ESITTELY

Suuria ilmavirtoja käsittelevän ilmanvaihdon suunnittelussa on olemassa useita eri näkemyksiä, mutta alan ammattilaisten kanssa käytyjen keskustelujen lopputuloksena löytyi myös kaikkia näitä yhdistävä tekijä: raha. Tärkein tekijä siis tämän kaltaisessa laitteessa on edullinen hinta. Tämän kaltaisen tuotteen parissa ollaankin kompromissien äärellä: kuinka kehittää tuote, jossa on kaikki hyvät ominaisuudet, kuten äänettömyys, huollettavuus, helppo säädettävyys- ja asennus sekä huomaamaton ulkonäkö yhdistettynä edullisiin tuotantokustannuksiin. Tavoitteena on kehittää tuote, jossa edellä mainitut ominaisuudet kohtaavat. Huomioon otettavia seikkoja on siis useita. Tähän kun vielä yhdistetään eri valmistusmenetelmien vertailu ja esimerkiksi imukartion eri muotojen vertailu, vietiin suunnitteluprosessi pitkälle haettaessa parasta tapaa valmistaa poistoilmalaite suuria ilmavirtoja varten.

Suomessa on voimassa erittäin tiukat standardit ja säännökset, jotka ohjaavat rakentamista sekä asettavat vaatimuksia rakennustarvikkeille ja -materiaaleille. Tämän työn kannalta tärkeimmät viranomaisten ohjeet tulevat ympäristöministeriön asetuksesta koskien ilmanvaihdon päätelaitteiden tyyppihyväksyntävaatimuksia, sekä tämän ohjeen taustalta löytyvät Suomen rakennusmääräyskokoelman osat:

C1 Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksessa, määräykset ja ohjeet

D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet

E1 Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet

E7 Ilmanvaihtolaitteistojen paloturvallisuus.

Uusimman tiedon mukaan tyyppihyväksyntä ilmanvaihtoon liittyvissä komponenteissa on jäämässä historiaan, ja se tullaan korvaamaan tulevaisuudessa CE- merkinnällä. Ympäristöministeriö on kuitenkin antanut julki monisteen, jossa esitetään, että ilmanvaihtolaitteistoihin kuuluvien tuotteiden tyyppihyväksyntämenettelyä jatkettaisiin ja jopa edelleen kehitettäisiin CE- merkintää täydentävänä menettelynä. CE- merkinnät tullaan ottamaan käyttöön Euroopassa sitä mukaa, kun harmonisoituja tuotestandarde-

ja valmistuu. Eurooppalaisia standardeja on valmistunut ja valmisteilla ainakin päätelaitteille, keskusilmastointikoneille ja kanaville. /2, s.3- 4/.

Tämän projektin tiimoilta valittiin kuitenkin ohjenuoraksi sen, että tuote tulee täyttämään ilmanvaihdon päätelaitteiden tyyppihyväksyntään vaadittavat vaatimukset. Tätä tyyppihyväksyntää tullaan myös tuotteelle hakemaan. /2, s.11- 15/.

Tyyppihyväksyntäohjeet 2008 asettaa ilmanvaihtolaitoksen päätelaitteille vaatimuksia seuraavien asioiden tiimoilta: materiaaliominaisuudet, lujuus, tiiviys, puhtaus, mittatarkkuus ja yhteensopivuus, sekä virtaus- ja äänitekniset ominaisuudet /3, s.3/.

3 TUOTEKEHITYS

Tuotekehityksen tarkoituksena on joko parantaa jotain olemassa olevaa tai kehittää jotain uutta markkinoiden tarpeisiin. Lähtökohtaisesti tuotekehitysprosessin tarkoituksena on muuttaa tekniset mahdollisuudet ja markkinatarpeet myytäviksi palveluiksi tai tuotteiksi, joskin tuotekehitysprosessia voi käyttää myös ongelmanratkaisun välineenä, jolla optimoidaan markkinoihin ja teknologioihin liittyvää ymmärrystä ja osaamista yrityksessä. Tuotekehitys on etenkin nykyään hyvin tärkeää yrityksille, sillä ilman uusia innovaatioita ja jatkuvaa kehittymistä on vaikea vastata nykypäivän markkinoiden asettamiin haasteisiin. Yrityksillä on kuitenkin erilaisia toimintamalleja tuotekehityksenkin suhteen, ja tapa jäsennellä tuotekehityksen vaiheita vaihtelee yrityksestä riippuen. Suurin kahtiajako tässä syntyy siitä, onko tuotekehitys teknologiaorientoitunut vai markkinaorientoitunut. Tuotekehityksen ohjaamiseen suurissa yrityksissä käytetään yleensä jonkinäköistä laatujärjestelmää. Niin myös Oy Lindab Ab:n tapauksessa. /4, s.5-7/.

3.1 Tuotekehityksestä prosessina

Ehkäpä oleellisin seikka tuotekehityksessä on hyödyntää jo olemassa olevaa tietoa, kuten tutkimustuloksia ja kokemuksia. Alun alkaen tuotekehitys on kohdistunut lähinnä valmistettavissa oleviin, konkreettisiin tuotteisiin, mutta nykyaikana tuotekehitystä tehdään lisääntyvässä määrin myös ohjelmistojen ja palvelujen parissa.

Tuotekehitysprosessissa ei pelkästään kehitetä uutta tuotetta, vaan prosessia tulee tarkastella laajemmasta näkökulmasta. Itse fyysiseen tuotteeseen liittyy useita tärkeitä seikkoja, jotka tulee ottaa huomioon koko prosessin ajan ja joihin tulee hakea ratkaisuja. Käytännössä uutta tuotetta tulee ajatella kokonaisuutena, joka sisältää vähintäänkin seuraavat asiat: tuotemerkki, brändi, muotoilu, laatu ja hintataso. Tietenkin tuotteen kysyntää markkinoilla tulee analysoida. Näiden asioiden lisäksi valmiilla, markkinoille lanseerattavalla tuotteella tulee olla toimiva tuotetuki, joka sisältää ainakin asennus- ja käyttöohjeet. Ihanteellisena tavoitteena on pystyä tarjoamaan tuotetukea läpi koko tuotteen elinkaaren. Tämä on yksi laatuvaikutelmaa ja siten tuotteen arvoa nostavista tekijöistä. /5, s. 29-86/.

Tuotteistaminen on tuotekehityksen muoto, jonka perustana on jokin jo olemassa oleva, tiettyä asiakasta tai tilannetta varten kehitetty tuote tai palvelu, jolle on havaittu olevan myös laajempaa kysyntää. Tällaisessa tuotekehityksen muodossa kehitetään tuotteen ympärille ainoastaan valmis ”paketti” ja sen tuotetuki. Lindabin tapauksessa tuotteistaminen on yritykseen vakiintunut käytäntö, ja hyvinkin moni mallistosta löytyvä tuote on kehitetty ensisijaisesti palvelemaan jonkin tietyn asiakkaan tarpeita ja myöhemmin lisääntyneen kysynnän seurauksena päätetty tuotteistaa avoimille markkinoille.

Tuotekehitysprosessin kulku vaihtelee jonkin verran toimialasta sekä tuotteen luonteesta riippuen. Tuotekehitysprosessin tavoitteet ja vaiheet ovat silti melko lailla riippumattomia toimialasta tai tuotteen luonteesta. Seuraavissa kappaleissa pyritään kuvaamaan tuotekehitysprojektin perusteita vaihe vaiheelta.

3.2 Tehtävän rajaus ja tarkennus

Tuotekehitysprosessi aloitetaan yleensä markkinaselvityksellä ja markkinaselvitykseen liittyvien kysymysten asetteluun tulisi kiinnittää erityisen paljon huomiota. Kysymys tulisi asetella esimerkiksi seuraavalla tavalla: Minkälaisen tuotteen asiakas haluaa? Mitä kilpailijat tarjoavat? Mikä on kohderyhmä? Mitkä ovat taloudelliset intressit? Minkälaisia valmistusmenetelmiä ja -välineitä yrityksellä on käytettävissä? Etenkin tämä viimeinen kohta on usein tuotekehitysprosessissa niin sanottu pullonkaula, sillä konekantaan kohdistuvat investoinnit voivat epäonnistuessaan suistaa koko yrityksen taloudellisiin vaikeuksiin ja jopa konkurssiin.

Tärkeätä on myös pohtia omaa tuotevalikoimaa ja miettiä, onko juuri tällä kyseisellä yrityksellä jo olemassa oleva tuote, jota kehittämällä voidaan tuottaa lisäarvoa sille. Näiden kysymysten vastaukset pohjustavat pitkälti tuotekehitysprosessin suuntaa.

Tuotteelle ja koko prosessille pitää jo tässä vaiheessa tehdä kustannuslaskelma. Mitä prosessi maksaa ja mitä sen odotetaan tuottavan? Kustannuslaskelman jälkeen analysoidaan jo olemassa olevaa tietoa markkinoiden (asiakkaiden) todellisista tarpeista kehityksen kohteena olevan tuotteen suhteen.

Kustannuslaskelman jälkeen tulee laatia vaatimusmäärittely. Vaatimusmäärittelyn laatiminen on myös yksi tuotekehitysprosessin ensimmäisistä vaiheista, mutta silti hyvin kriittinen lopputuloksen kannalta. Vaatimuslistassa määritellään karkeasti tuotteen ulkonäkö, laaditaan ehkä ensimmäiset mallit, selvitetään lainsäädännön asettamat vaatimukset, selvitetään tuotteen toivotut funktiot sekä tarkastellaan kokonaisuutta asiakkaan näkökulmasta. Nimenomaan asiakkaan ”rooliin” asettuminen on erittäin oleellista, jotta tuotetta voidaan tarkastella oikeasta näkökulmasta.

Vaatimusmäärittelyn jälkeen seuraavana askeleena on ideoida tuotekonsepti. Tässä vaiheessa laadittavan tuotekonseptin ei tarvitse olla se lopullinen versio, mutta jonkinlainen selkeä näkemys lopputuloksesta tulisi saavuttaa. Ideoinnin välineinä voidaan käyttää esimerkiksi erilaisia ideointitekniikoita. Hyväksi havaittuja tekniikoita ovat esimerkiksi Edward de Bonon kehittämä malli SIT (six thinking hats) ja aivoriihi. Tuotekonseptin laadintaan on tarjolla myös hyviä, ilmaisia apuja, kuten asiakkaiden kuunteleminen, loppukäyttäjien kuunteleminen, tuotekehityksen kanssa tekemisissä olevien ihmisten konsultointi jne. Tärkeintä on kuitenkin pysyä tässä vaiheessa riittävän abstraktilla tasolla ja varoa kuitenkaan menemättä liian syvälle itse luovuuskäsitteen tarkasteluun. Tärkein seikka on pitäytyä hyvässä teknisessä lähestymistavassa. /5, s.29-86, /6, 10.5.2012/.

3.3 Luonnostelu- ja viimeistelyvaihe

Luonnosteluvaiheessa uudesta tuotteesta laaditaan ensimmäiset kuvat, mitoitus, sekä tekniset laskelmat. Tämän vaiheen laskelmat ja luonnokset ovat kuitenkin suuntaa antavia lopputulokseen nähden. Kuitenkin alustavat piirustukset sekä valmistustekniikoiden simuloinnit helpottavat huomattavasti myöhempiä vaiheita.

Tämän vaiheen asiat tapahtuvat jo yrityksestä ja tuotteen luonteesta riippuen hieman toisistaan poiketen, mutta yleisesti ottaen tämän vaiheen jälkeen valmiina tulisi olla laskelmien ja alustavien piirustuksien lisäksi ainakin alustavat kokoonpanokuvat. Monessa tapauksessa, kuten tässäkin projektissa valmistettiin myös ensimmäiset prototyypit tämän vaiheen aikana.

Viimeistelyvaiheen tarkoituksena on laatia lopullisen tuotteen kaltaiset prototyypit, tehdä lopulliset mittaukset ja saattaa tarvittava tuotedokumentaatio valmistusta ja käyttäjää varten lopulliseen asuunsa. Viimeistelyvaiheessa tulee myös valmistaa tuotteesta ensimmäinen ”sarja”, jota yleensä kutsutaan nollasarjaksi. Tämän ensimmäisen sarjan tarkoituksena on optimoida tuotantoprosessia sekä etsiä siitä mahdollisia virheitä. Tämän opinnäytetyön kaltaisissa projekteissa tässä vaiheessa on yleensä valmiina myös niin sanottu referenssikohde. Referenssikohteen avulla saadaan kerättyä arvokasta tietoa tuotteen toiminnasta kentällä ja näin voidaan vielä tehdä pieniä parannuksia ennen tuotteen varsinaista lanseeraamista myyntiin. /5, s.118- 165/. /6/.

4 ILMANVAIHTOLAITOKSEN ÄÄNITEKNIikka

Äänitekniikka on tässä projektissa suhteellisen suuressa roolissa, sillä kehityksen kohteena oleva laite toimii myös ”äänenvaimentimena” eri huonetilojen välillä, vaikka äänenvaimentimen primäärinen tehtävä tässä tuotteessa onkin vaimentaa säätöpellin aiheuttamaa ääntä. Tämän osion tarkoituksena on käsitellä hieman äänitekniikan perusasioita.

4.1 Ääni fysikaalisena ilmiönä

Ääni on kimmoisessa väliaineessa etenevää paineenvaihtelua. Se etenee ali- ja ylipaineisina vyöhykkeinä ja on siis pitkittäissuuntaista aaltoliikettä, eli värähtelyä. Ääni tarvitsee aina liikkuaakseen väliaineen. Äänen eteneminen jaetaan yleensä kahteen eri kategoriaan, ilma-ääneen (äänilähteestä ilman välityksellä ympäristöön leviävä ääni) tai runkoääneen (rakenteessa: metallissa, betonissa tai puussa) tai muussa kiinteässä aineessa etenevä mekaaninen värähtely, joka aiheuttaa ääntä. Onkin siis hyvin tärkeää, että kaikki nämä reitit otetaan huomioon ilmastoinnin ääniteknisessä suunnittelussa. Yksinkertaisin värähtely on sinimuotoista aaltoliikettä, jossa taajuus kuvaa jaksojen

lukumäärä aikayksikössä. Äänen taajuuden yksikkönä käytetään hertsiä, joka on kansainvälisen SI-järjestelmän mukainen yksikkö. Yksi hertsi tarkoittaa taajuutta, jossa värähdysjaksot toistuvat sekunnin välein ($\text{Hz} = 1/\text{s}$). Kuvassa 1 on esimerkki taajuuden ja aallonpituuden suhteesta. Aallonpituus on samanvaiheisten peräkkäisten aaltorintamien välinen etäisyys aallon etenemissuunnassa. /7, s.1/

| f | λ |
|---------|--------------|
| Taajuus | Aallonpituus |
| (Hz) | (m) |
| 63 | 5,4 |
| 125 | 2,72 |
| 250 | 1,36 |
| 500 | 0,68 |
| 1000 | 0,34 |
| 2000 | 0,17 |
| 4000 | 0,09 |
| 8000 | 0,04 |

Taajuuden ja aallonpituuden suhde

KUVA 1. Taajuuden ja aallonpituuden suhde

$$\lambda = c/f \quad (1)$$

c äänennopeus 20°C:n lämpöisessä ilmassa merenpinnan tasalla (344 m/s).

λ aallonpituus

f taajuus (Hz)

Kun ääni etenee väliaineessa, merkitsee se samalla tietyn tehon P siirtymistä. Kun tämä teho siirtyy poikkipinnan A kautta, kutsutaan suuretta P/A äänen intensiteetiksi I . Koska intensiteetti, kuten muutkin äänisuureet mukaan lukien korvan kuulokynnys, vaihtelee useiden kymmenpotenssien alueella, käytetään äänitekniikassa yleensä logaritmista asteikkoa. Ilmaaänen paine- ja intensiteettitasojen L_p ja L_I laskenta on kuvattu yhtälössä 2. /7, s.1/.

$$L_1 = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \approx L_p = 10 \cdot \lg \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

*referenssitasoina käytettävä seuraavia:

$$\begin{aligned} I_0 & 10^{12} \text{ W/m}^2 \\ p_0 & 2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2 (= \text{Pa}) \\ L:n \text{ yksikkö} & (\text{dB}) \end{aligned}$$

Äänen painetasoa käytetään sen takia, että vain se on mitattavissa luotettavasti. Koska äänitekniisiin laskelmiin tarvitaan äänilähteen aiheuttamaa tehotasoa, on tunnettava näiden kahden suureen välinen yhteys tietyllä etäisyydellä äänilähteestä. Tavallisesti äänen tehotaso L_w on lukuarvoltaan suurempi kuin äänen painetaso L_p . Tälle on olemassa myös looginen selitys: äänen tehotaso pysyy vakiona etäännyttäessä äänilähteestä, mutta painetaso vähenee, mitä kauempana äänilähteestä mittauspiste sijaitsee. Nämä suureet ovat laskettavissa yhtälöstä 3. /7, s.1/.

$$L_w = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_0} = L_p + 10 \cdot \lg \frac{A}{A_0} = L_p + 8 + 20 \lg \frac{r}{m} \quad (3)$$

*Yhtälön viimeinen osa pätee r-säteisen puolipallon pinnalla ja $L_w \approx L_p + 18 \text{ dB}$, jos $r = 3 \text{ m}$.

*Referenssisuureina käytettävä $P_0 = 10^{-12} \text{ W}$ ja $A_0 = 1 \text{ m}^2$

Useiden eri äänilähteiden yhteisvaikutuksesta aiheutunut äänen kokonaispainetaso voidaan laskea yhtälöstä 4. /7, s.1/.

$$L_p = 10 \lg \sum_i 10^{L_{p_i}/10 \text{ dB}} \quad (4)$$

Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että mikäli mittauspisteen ympäristössä on kaksi yhtä voimakasta äänilähdettä samalla etäisyydellä, on niiden yhdessä aiheuttama äänen painetaso 3dB korkeampi kuin yhden äänilähteen aiheuttama äänen painetaso. Vastaa-

vasti taas kymmenen yhtä kaukana mittauspisteestä sijaitsevan, yhtäläisen äänilähteen aiheuttama äänen painetaso on 10 dB korkeampi kuin yksittäisen äänilähteen. /8, s.62/.

4.2 Äänen vaimeneminen

Ääni vaimenee sen kulkiessa kanavistossa eteenpäin, tosin täytyy muistaa, että äänen määrä kanavistossa voi myös lisääntyä tilanteessa, jossa ilman virtausnopeus kanavistossa kasvaa liian suureksi. Vaimenemisen määrään vaikuttaa lähinnä kanavan materiaali sekä muoto. Pyöreissä peltikanavissa ja sileissä betonikanavissa äänen vaimeneminen on hyvin vähäistä, vain luokkaa 0,03-0,3 dB/m. Suorakaidekanavat vaimentavat ääntä hieman tehokkaammin, mutta siltikin vaimennuksen määrä on niin vähäinen, että suunnittelussa kanaviston vaimennus jätetään huomioimatta lähinnä ylimääräiseksi varmuudeksi.

Useimmissa tapauksissa kanavan sisäpinta on päällystetty jollakin ääntä absorboivalla aineella, kuten villalla, saadaan ääntä vaimennettua etenkin matalilla taajuuksilla. Nykypäivänä äänieristettyjen kanavien rakentaminen on kuitenkin jäänyt pitkälti historiaan ja ääntä vaimennetaan useimmiten siihen tarkoitetuilla äänenvaimentimilla. Äänenvaimentimessa vaimennus voi perustua joko äänen absorptioon, pääteheijastukseen tai ääniaallon kumoamiseen. /8, s.77-80/.

4.3 Ilmanvaihdon äänilähteet

Ilmanvaihto on yleensä rakennuksen merkittävin ääntä aiheuttava järjestelmä, joten äänitekninen suunnittelu on hyvin tärkeässä roolissa luotaessa toimivaa ilmanvaihtojärjestelmää. Ilmanvaihtolaitoksen äänilähteet jaetaan yleensä vielä kahteen ryhmään: (1) Ääntä aiheuttavat mekaaniset laitteet, kuten pumpput, puhaltimet, kompressorit ja (2) Ilmavirtauksen aiheuttama ääni kanavissa, säätölaitteissa sekä päätelaitteissa. /3, s.41-52/.

4.3.1 Puhaltimen ääni

Puhallin on merkittävin yksittäinen äänilähde ilmastointilaitoksessa, joten sen äänitehotasot on ehdottomasti oltava tiedossa. Koko ilmastointilaitoksen äänilaskenta pe-

rustuu pitkälti puhallin- tai konevalmistajan ilmoittamiin lähtöarvoihin, joten laitevalmistajan antamien arvojen pitää olla luotettavasti mitattuja, esimerkiksi ISO-5801-standardin mukaisesti. Yleensä puhallinta joudutaan ajamaan useammalla eri pyörimisnopeudella, joten laitevalmistajan pitää ilmoittaa myös äänitehotaso useammalla toimintapisteellä. Tämän takia puhaltimille yleensä ilmoitetaan sen ominaiskäyrästä, josta voidaan lukea puhaltimen kokonaisäänitehotaso kaikissa toimintapisteissä. /3, s.41-52/.

Puhaltimen synnyttämään äänitehoon vaikuttaa pyörimisnopeuden lisäksi moni muukin asia, kuten asennustapa. Asennustavan tulisi olla aina virtausteknisesti edullinen, sillä se vaikuttaa imu- ja painepuolelle siirtyviin äänitehoihin. Myös puhaltimen tyyppi (aksaali, radiaali, sekavirta), liikkuvien osien tasapainotus sekä moottorin aiheuttama ääni vaikuttavat asiaan. /3, s.41-52/.

4.3.2 Virtausääni

Ilmavirtaus kanavassa on lähes poikkeuksetta aina turbulenttista, eli pyörteistä, jolloin se aiheuttaa ääntä. Ilma aiheuttaa ääntä myös kulkiessaan mutkien, haarojen, muunnoksien, säätölaitteiden ja venttiilien läpi. Virtausmelun vaikutus syntyvään äänitehoon on hyvin ratkaisevassa roolissa, joten se on otettava huomioon kanaviston ja siihen liitettävien laitteiden suunnittelussa ja valinnassa.

Virtausmelullakin on kuitenkin omat säännönmukaisuutensa, ja se on täysin laskettavissa. Nykypäivänä virtaustekninen mitoitus voidaan tehdä suunnitteluohjelmistoissa napin painalluksella, mutta teoriaa olisi hyvä tuntea ainakin muutaman niin sanotun nyrkkisäännön verran. Tärkeimpänä nyrkkisääntönä voidaan pitää, että missä paine alenee, syntyy myös ääntä. Siispä suurin äänilähde kanavistossa on säätölaitteet, joilla kuristetaan ilmavirtausta. Säätimiin pätevät karkeasti seuraavat säännöt: ilmavirran kuristuksessa syntyvä äänitehotaso on verrannollinen painehäviön potenssiin 3, ja jos säätimen tilavuusvirta pidetään vakiona kuristusta muuttamalla, on äänitehotaso verrannollinen painehäviön potenssiin 2,5. Kanaviston riittävän väljä mitoitus yhdistettynä painehäviöiden oikeaan mitoitukseen onkin siis hyvin tärkeässä roolissa matkalla onnistuneeseen äänitekniseen suunnitteluun. Paineen tuottaminen vaatii myös aina energiaa, joten ääniteknisesti onnistuneesti mitoitettu ilmastointilaitos on yleensä myös energiataloudellisesti edullinen. /3, s.41-52/.

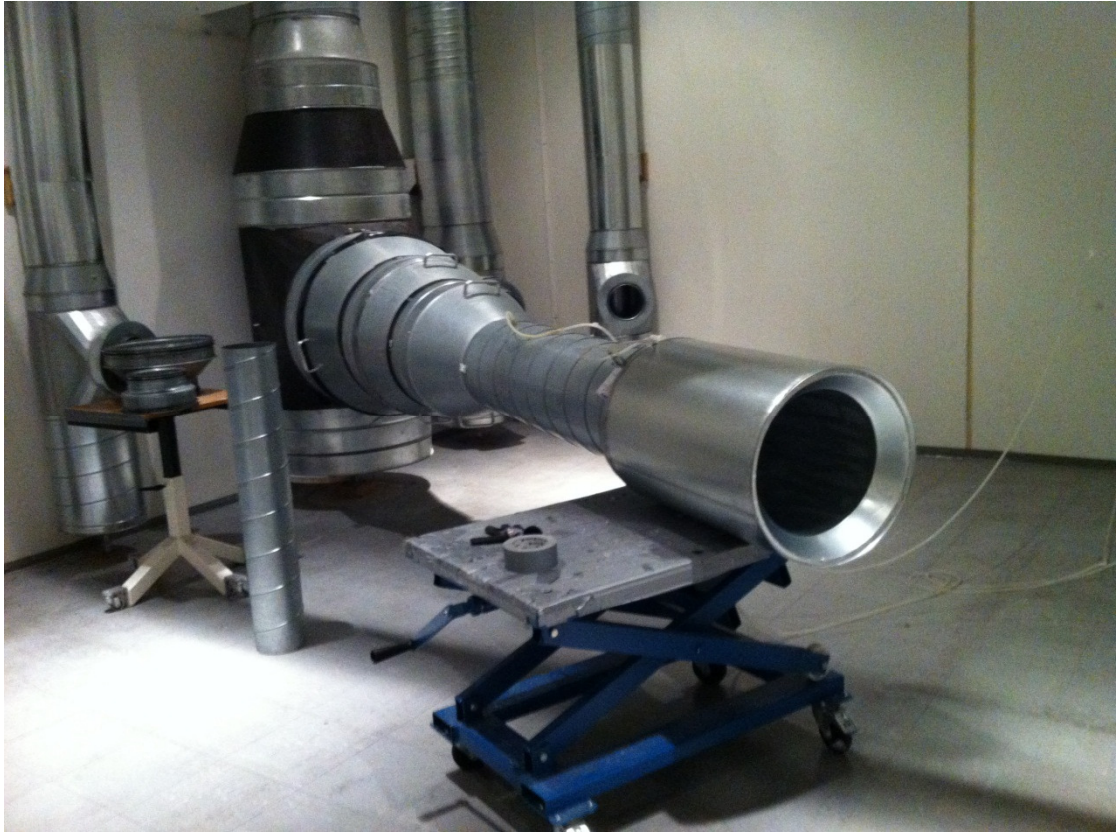
4.3.3 Päätelaitteiden aiheuttama ääni

Päätelaitteella joudutaan useimmissa tapauksissa rajoittamaan ilman virtausta, joten siitä aiheutuu aina myös painehäviötä. Kuten edellisessä kappaleessa mainittiin, paineen kuristaminen aiheuttaa aina myös ääntä.

Päätelaitteet ovat siinä mielessä ääniteknisesti ongelmallisia, että niiden ääni kulkeutuu aina suoraan huonetilaan, joten niiden aiheuttamaa ääntä ei pystytä äänenvaimentimillakaan vaimentamaan. Tämän vuoksi päätelaitteiden valinnassa tulisi aina kiinnittää huomiota niiden säätöpainehäviöön sekä suunnitella kanavisto siten, että ylimääräinen paine pystytään hävittämään säätöpelleillä jo ennen varsinaista päätelaitetta. Yksi päätelaitteiden äänitehotasoon vaikuttava tekijä on myös niiden asennustapa. Päätelaitteiden kohdalla ilman virtauksen tulisi olla mahdollisimman stabiili, jotta välttyttäisiin ongelmilta. Virheellinen asennustapa voi lisätä päätelaitteen äänitasoa jopa 20 dB. /3, s.11- 37/.

5 MITTAUSMENETELMÄT

Tämän osion tarkoituksena on kuvata mittausmenetelmiä, järjestelyjä sekä mitattuja parametreja. Kuvissa 7, 8, 9 ja 10 on kuvattu mittausjärjestelyitä sekä kaiuntahuonetta. Kuvassa 7 näkyy mittauskanavisto, johon mitattava prototyyppi on asennettu. Mittauskanavistossa sijaitsee puhallin, jolla tuotetaan tarvittava ilmavirta kulkemaan prototyypin läpi. Mittauskanavisto on todella pitkä ja huolellisesti vaimennettu kanavisto jotta puhaltimen aiheuttama äänitaso ei kantaudu huonetilaan saakka, vaan huonetilasta mitattava ääni on ainoastaan prototyypin aiheuttamaa virtausmelua. Mittauskanavistossa sijaitsee myös venturiputki, jolla mitataan painetta ja tilavuusvirtanopeutta.



KUVA 7. Prototyyppi liitettynä mittauskanavistoon

Kuvassa 8 näkyy pyörivä Bruel&Kjaer- mikrofoni, jonka tarkoituksena on mitata prototyypin aiheuttama virtausmelu huoneessa. Mikrofonin kiertoa keuhassa, jotta saataisiin suljettua pois mahdolliset häiriöt huoneen äänikentässä.



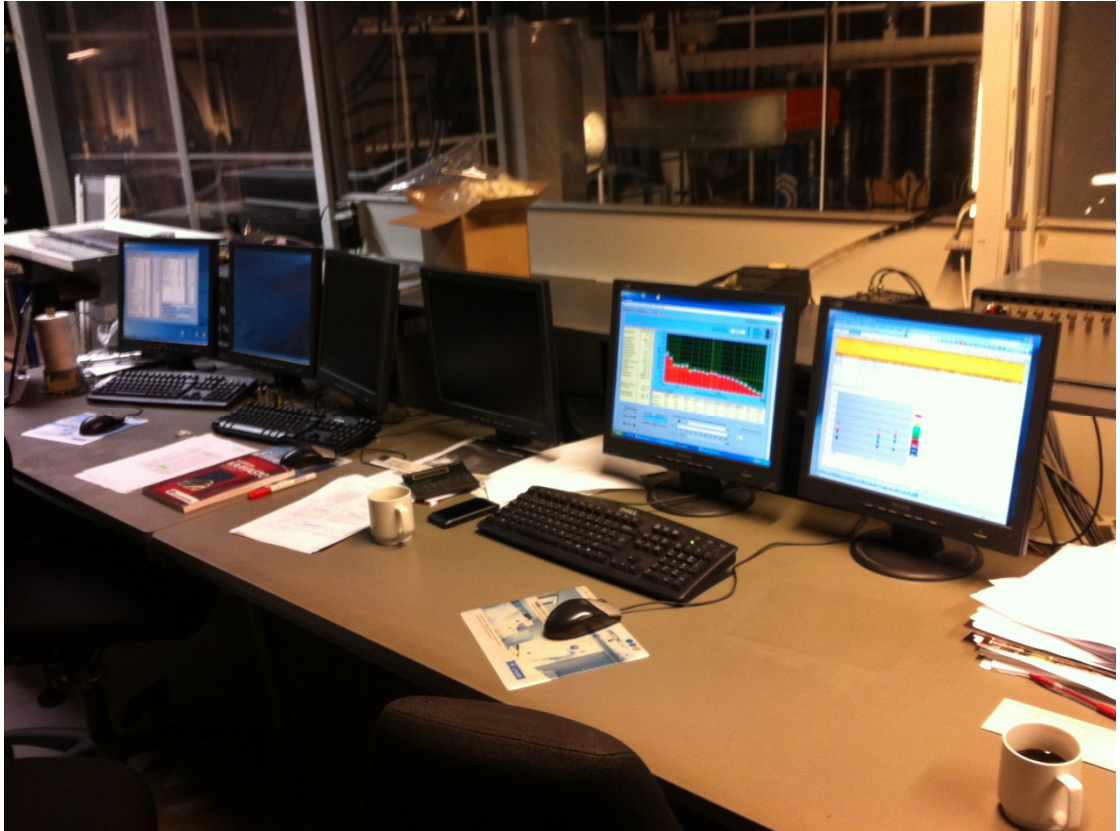
KUVA 8. Bruel&kjaer-mikrofoni kaiuntahuoneessa

Kuvassa 9 näkyy prototyyppi kiinnitettynä kaiuntahuoneen läpivientiin. Seinän toisella puolella on kanavisto, johon on asennettu äänigeneraattori. Äänigeneraattori on laite, joka tuottaa tasaista ääntä kaikilla taajuuskaistoilla. Prototyypin vaimennuksen mittaaminen tapahtuu vertaamalla huoneen puolelta mitattua äänitasoa prototyyppi kiinnitettynä äänitasoon ilman prototyyppiä.



KUVA 9. Vaimennuksen mittaaminen kaiuntahuoneessa

Kuvassa 10 nähdään valvomo, jossa sijaitsevat mittausdataa keräävät tietokoneet sekä puhaltimien ohjainlaitteet.



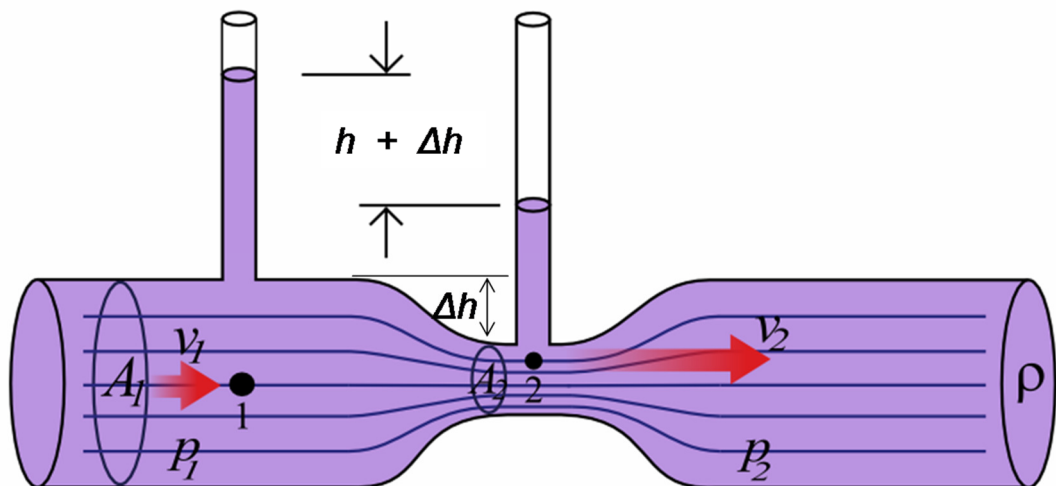
KUVA 10. Valvomo

5.1 Kaiuntahuonemenetelmä

Kaiuntahuone on tila, joka on rakennettu täysin diffuusin äänikentän aikaansaamiseksi. Huoneen seinät ovat tehty mahdollisimman täydellisesti ääntä heijastaviksi jälkikaiunta-ajan maksimoimiseksi. Täysin diffuusi äänikenttä tarkoittaa käytännössä sitä, että äänenpaine on vakio kaikissa kohdin huonetta. Akustisiin mittauksiin soveltuvan kaiuntahuoneen parametrit on määritelty ISO 3741-standardissa. Lindabin äänilaboratorion kaiuntahuone täyttää kyseisen standardin vaatimukset. /3, s.42/.

Laboratoriomittauksissa oleellinen asia on myös tarkka paineen- ja virtausnopeuden määrittäminen. Tämän työn kohdalla laboratoriossa käytettiin venturiputkea paineen- ja tilavuusvirtausnopeuden määrittämiseksi. Venturiputki on hyväksi havaittu väline paine-eroperusteisissa virtausmittauksissa. Venturiputken etuja muihin menetelmiin verrattuna ovat sen tarkkuus, pieni pysyvä painehäviö, sekä yksinkertainen rakenne. Etenkin pieni painehäviö verrattuna esimerkiksi mittalaippaan on ilmanvaihtolaboratorion olosuhteissa suuri etu, sillä mittalaipalla varustettu testikanavisto vaatisi

huomattavasti isommat puhaltimet ja sen kaltainen ratkaisu taas aiheuttaa itsessään paljon melua. Venturiputki on rakenteeltaan tiimalasin muotoinen putki, joka koostuu kolmesta osasta: tulokartiosta, kurkusta ja poistokartiosta. Venturiputken rakenteen periaate on esitetty kuvassa 11.



KUVA 11. Venturiputki /18, 24.3.2014/.

Kaavassa 5 on esitetty paine-eron laskeminen venturiputken eri kohdissa. Yhtälö on periaatteessa yksinkertaistettu Bernoullin yhtälö. Kaavan 6 mukaan taas voidaan laskea tilavuusvirtanopeus, eli kuinka paljon virtaavaa ainetta kulkee putken tietyn kohdan poikkileikkauksen läpi aikayksikössä.

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (5)$$

| | |
|--------|--------------------------|
| p_1 | painetaso kohdassa 1 |
| p_2 | painetaso kohdassa 2 |
| v_1 | nopeus kohdassa 1 |
| v_2 | nopeus kohdassa 2 |
| ρ | virtaavan fluidin tiheys |

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} - 1\right)}} = A_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho \left(\frac{A_2^2}{A_1^2} - 1\right)}} \quad (6)$$

5.2 Mitattavat parametrit ja arvot

Lähtökohtaisesti mitattavia parametreja olivat laitteen vaimennus, oma äänenkehitys sekä K-arvot. K-arvojen mittaaminen oli käytännössä vain varmistusluontoinen toimenpide, sillä laitteen säätöosa on standardituote, eli Iris-tyyppinen säätöpelti. K-arvot, jotka Iris-pellin tarrassa ilmoitetaan, pitivät hyvin paikkansa jokaisen eri koon kohdalla.

Mittausjärjestelyt olivat hyvin yksinkertaiset, sillä systeemi on melko pitkälle automatisoitu. Mittausjärjestelmästä saatiin ulos valmiiksi diagrammi, josta ilmenee k-arvojen lisäksi laitteen aiheuttama äänen tehotaso paineen funktiona mitatulla ilmavirta-alueella. Tämän mittauksen lisäksi mitattiin erikseen vielä jokaisen prototyypin vaimennus oktaavikaistoittain taajuusalueella 63...8000 Hz.

5.3 Prototyypit ja niiden rakenne

Prototyyppejä valmistettiin mittauksia varten yhteensä yhdeksän kappaletta. Mitattavat prototyypit olivat halkaisijaltaan $\varnothing 250$, $\varnothing 315$ ja $\varnothing 400$ ilmanvaihtokanaviin soveltuvia. Kutakin kokoa oli kolme eri versiota. Kaikki koostuvat säätöpelistä, äänenvaimentimesta ja imukartiosta. Eroavaisuuksia ovat lähinnä imukartion muoto sekä vaimennusmateriaali. Seuraavissa kohdissa kerrotaan hieman tuotteiden rakenteesta. Kuvassa 13 näkyy erilaisia prototyyppejä, joista tarkempi kuvaus myöhemmin.

5.3.1 Säätöpelti

Tuotteessa käytetään Lindabin valmistamaa Iris-tyyppistä säätöpeltiä, joka on tarkoitettu ilmamäärän mittaamiseen ja säätämiseen. Iris-tyyppisen säätöpellin ominaisuuksia ovat alhainen äänitaso, keskitetty ilmavirtaus ja kiinteät mittayhteet. Säätöpeltiosa muodostaa mittarenkaan ilmavirran mittaamista varten. Mittaamalla paine-ero mittayhteistä voidaan kaavan avulla laskea ilmavirta. Laitteen säätöasento ja K-arvo ovat samoja lukuja, joten laitteen säätämistä varten ei tarvita erillisiä taulukoita. /9, s.244/.



KUVA 12. DIRU-säätöpelti

5.3.2 Äänenvaimennin

Tämänkaltaisessa tuotteessa aiheutuu yleensä suureksi ongelmaksi säätöpellin aiheuttama ääni. Tästä johtuen äänenvaimennin liitettiin osaksi laitetta. Tässä tapauksessa ääntä vaimennetaan 600 mm pitkällä äänenvaimentimella, jossa eristeenä toimii joko 50 mm mineraalivilla verhoiltuna huovalla ja reikäpellillä tai 50 mm Acutec- polyes-

terikuitu. Acutec- polyesterikuitu on sisäilmanlaadun kannalta ehdottomasti paras ratkaisu ääntä vaimentavaksi materiaaliksi, sillä siitä ei irtoa haitallisia kuituja ilmanvaihtojärjestelmään ja sitä kautta tilojen hengitysilmaan. Tämän työn kohdalla kuitenkin valmistettiin prototyypit myös mineraalivillasta, jotta pystyttiin vertaamaan kyseisten materiaalien akustisia ominaisuuksia.

5.3.3 Imukartio

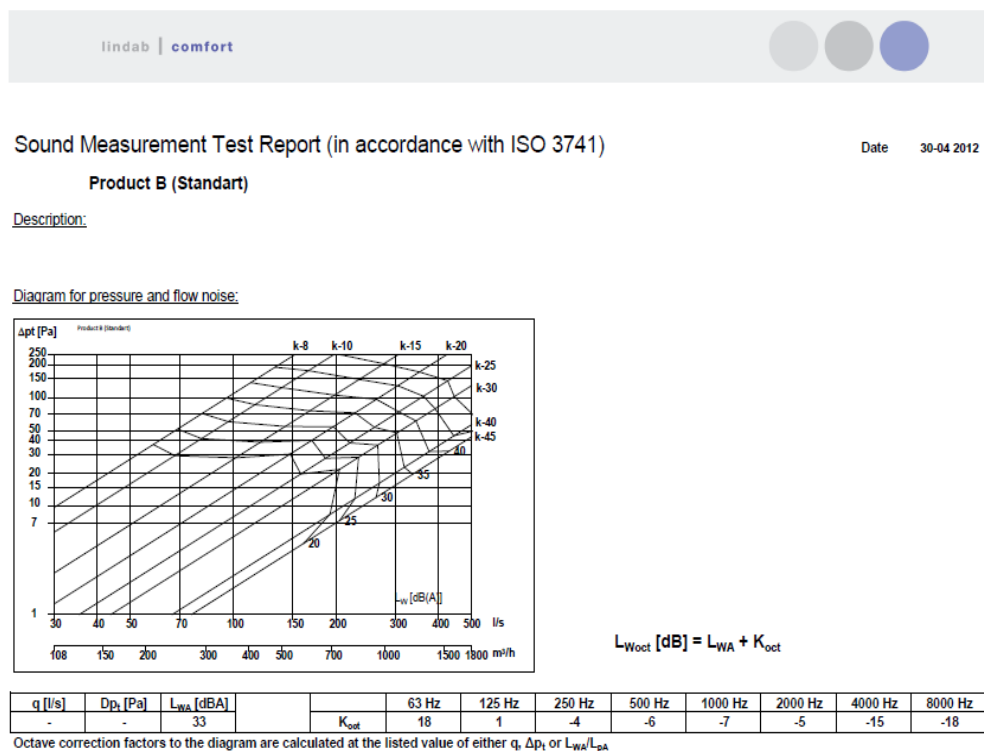
Imukartion tarkoitus on toimia ikään kuin kiihdytyssuppilona laitteen rajapinnassa. Ideana on, että ilman virtausnopeus laitteen rajapinnan ulkopuolella pysyisi mahdollisimman pienenä ja kehittäisi mahdollisimman vähän ääntä ja aiheuttaa mahdollisimman pienen painehäviön. Laboratoriotestejä varten laitetta valmistettiin kahdella erityyppisellä imukartiolla varustettuna. Toinen näistä on malliltaan syvävetotekniikalla valmistettu, pyöreän säteen omaava imukartio, joka on Lindabin valmistama standardituote. Toinen taas on käsin valmistettu, lineaarinen säteen omaava imukartio. Ideana on verrata näitä kahta versiota laboratoriotulosten valossa. Valmistusteknisistä seikoista tuotteeseen tulee todennäköisesti valikoitumaan syvävedetty, tehdasvalmisteen malli.



KUVA 13. Prototyyppijä ilman säätöosia

5.4 Laitteiden oman äänenkehityksen mittaaminen

Prototyyppien mittaaminen aloitettiin mittaamalla niiden kehittämä äänitaso eri nopeus- ja painealueilla. Mittauksissa puhaltimen säätö oli automatisoitu, joten mittauksien välillä tarvitsi ainoastaan käydä vaihtamassa säätöpellin asentoa. Mittauslaitteisto mittasi automaattisesti oman äänenkehityksen lisäksi painehäviön sekä ilmavirran. Jokainen prototyyppi mitattiin kaikilla K-arvoilla, jotka säätöpellin asteikolla ovat ja näiden lisäksi pelti täysin auki ja täysin kiinni. Mittausjärjestelmä mittasi äänenkehityksen neljällä eri äänitasolla käyttäen tiettyä aikakeskiarvoa. Loput arvot ovat näiden perusteella laskennallisia, ja niiden perusteella muodostui äänikäyrä diagrammiin. Mittaukset suoritettiin ISO 3741 -standardin mukaisella menetelmällä. Mittaus toistettiin kaikilla eri säätöasenoilla ja näin saatiin valmis diagrammi. Kuvassa 14 esiintyy yhden prototyypin valmis diagrammi.



KUVA 14. Ääni- ja virtausmeludiagrammi

5.5 Vaimennuksen mittaaminen

Prototyypeille piti mitata myös niiden vaimennuskyky äänen kulkeutuessa kanavasta huonetilaan. Tämä mittaus toteutettiin sijoittamalla mitattava prototyyppi kaiuntahuoneeseen ja viemällä siihen liittyvä kanava toiseen huoneeseen, missä kanavaan tuotettiin ääntä kohinageneraattorilla. Ilmavirtaa ei tässä vaiheessa ajettu ollenkaan laitteen läpi. Kohinageneraattori on laite, joka tuottaa niin sanottua vaaleanpunaista kohinaa. Kohinateho on jakautunut siten, että jokaisella taajuusdekadilla on yhtä paljon kohinatehoa ja tämä teho on kääntäen verrannollinen taajuuteen. Kohinan taso laskee noin kolme desibeliä oktaavia kohden. Tämänkaltaisille laitteille vaimennus ilmoitetaan yleensä desibeleinä seuraavilla taajuuskaistoilla 63,125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 ja 8000 Hz. Vaimennukset mitattiin säätöpellin ollessa täysin kiinni, täysin auki sekä satunnaisilla K-arvoilla tältä väliltä. Tuloksista pystyy päättelemään, että säätöpellin asento ei mainittavasti vaikuttanut vaimennukseen. Taulukossa 1 on esitetty vertailu kahden eri prototyypin (A= mineraalivilla, B= Acutec- polyesterikuitu), sekä 600mm pitkien, Lindabin tuotevalikoimasta löytyvien PVA- ja PVD-äänenvaimentimien vaimennuksista.

TAULUKKO 1. Vaimennusvertailu

Sound Attenuation: $\varnothing 250$

| Attenuation DL | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Product A K-8 | 3 | 9 | 0 | 4 | 8 | 7 | 6 | 7 |
| Product C K-8 | 4 | 8 | 1 | 4 | 7 | 9 | 7 | 10 |
| PVA 250-600-50 | 0 | 3 | 5 | 12 | 29 | 16 | 12 | 8 |
| PVD 250-600-50 | 1 | 3 | 5 | 8 | 17 | 14 | 10 | 8 |

6 TULOKSET

Äänenkehityksen sekä vaimennuksen mittaustulokset saatiin mittausohjelmasta suoraan valmiiksi taulukoiksi. Erillistä mittauspöytäkirjaa ei siis tarvinnut pitää, sillä tietokoneohjelma kirjasi joka mittauksen kohdalla kaiken oleellisen tiedon, kuten senhetkiset ilman ominaisuudet, taustamelutason, ajan yms. Myös kaikki tarvittavat yhtä-

löt olivat syötetty järjestelmään, jonka avulla säästettiin paljon aikaa. Äänenkehityksen mittaustaulukot oktaavikaistakohtaisine korjauskertoimineen on esitetty liitteessä 2. Nämä diagrammit ja taulukot sisältävät valmiit säätökäyrästöt tekniseen dokumentaatioon.

6.1 Äänitasokäyrät ja painehäviöt

Äänitasokäyrät näyttävät eri versioiden kohdalla suhteellisen samanlaisilta, joten tästä voidaan päätellä, että imukartion muodolla ei ole kovin suurta merkitystä tämänkaltaisessa laitteessa vaikka ennen varsinaisia mittauksia näin oletettiin. Imukartiota merkittävämpi asia äänenkehityksen kannalta on lisävarusteena saatava suojaverkko. Suojaverkon vaikutus äänenkehitykseen on suurimmillaan pienellä painealueella. Valmiissa diagrammissa esitetään päätelaitteen äänenkehitys sille tyypillisellä nopeus- ja painealueella. Äänenkehitys ilmoitetaan Lindabin tapauksessa aina A-painotettuna äänen tehotasona L_{WA} . Toinen tapa olisi ilmoittaa nämä A-painotettuna äänen painetasona L_{PA} . Liitteestä 2 löytyviä taulukoita tulkitaan siten, että product A= käsin tehdyllä, lineaarisella imukartiolla varustettu malli, jossa vaimennusmateriaalina reikäpellillä ja huovalla verhoiltu mineraalivilla. Product B= Syvävedetyllä imukartiolla varustettu malli, jossa vaimennusmateriaalina reikäpellillä ja huovalla verhoiltu mineraalivilla. Product C= käsin tehdyllä imukartiolla varustettu malli, jossa vaimennusmateriaalina Acutec- polyesterikuitu. Liitteessä 2 on myös esitetty lopullisen tuotantoversion diagrammit omasta äänenkehityksestä sekä lisävarusteena saatavalla verkolla varustetun laitteen äänenkehitys- diagrammit. Vaimennukset taajuuskaistoittain eri säätöasennoilta löytyvät samaisen liitteen taulukoista.

6.2 Vaimennus

Prototyypin vaimennukset ilmoitetaan taajuuskaistoilla 63...8000Hz ilman A-painotusta. Mittaustulosten valossa näyttäisi toistaiseksi siltä, että tämä osio mittauksista on syystä tai toisesta epäonnistunut. Taulukon 1 arvoja tarkastellessa herättää eniten kysymyksiä prototyypin lähes olematon vaimennus etenkin taajuuskaistoilla 250Hz ja 500Hz. Toisaalta taas arvot taajuuskaistoilla 63Hz ja 125 Hz näyttävät liian hyviltä ollakseen realistisia (taulukko 1). Tämä oli tässä vaiheessa prosessia täysi kysymysmerkki, joten mittaukset jouduttiin näiltä osin tekemään uudestaan mittavirheen poissulkemiseksi. Tietenkään nämä vaimennuksen mittaustulokset 600mm pitkä ää-

nenvaimennin vastaan prototyyppi eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään, sillä mittausten menetelmä- ja ajankohta on ollut näissä tapauksissa hieman erilainen (kaiuntahuone ja mittauskanavisto). Kummatkin järjestelmät täyttävät kyllä standardien asettamat vaatimukset. Prototyyppien vaimennusarvot löytyvät liitteestä 2.

6.3 Tuotteen lopullinen rakenne

Ensimmäisten prototyyppien mittauksien jälkeen jouduttiin vielä tarkastelemaan tuotteiden rakennetta valmistusteknisten seikkojen takia. Ongelmia syntyi lähinnä ulkonaöllisten seikkojen takia, sillä $\varnothing 400$ säätöpellin halkaisija on noin 60mm suurempi kuin pyöreän äänenvaimentimen ulkohalkaisija 50mm eristeellä. Tästä syystä päädyttiin kasvattamaan äänenvaimentimen eristyspaksuutta 30mm lisää, eli nyt eristepaksuus on 80mm ja säätöpellin ja vaimentimen ulkohalkaisija on sama. Toinen tarkastelun arvoinen valmistustekninen seikka oli tuotteen vaipan ja päätyjen valmistustapa. Ensimmäisien prototyyppien vaipat valmistettiin sileästä pellistä mankeloimalla ja hakasaumaamalla. Toinen mahdollinen vaipan sulkemistapa olisi kiekkolankahitus. Päätykappaleet ensimmäisiin prototyyppihin valmistettiin prässiteknikalla. Prässiteknikalla valmistettujen päätykappaleiden suurin etu on, että ne pystytään kiinnittämään vaippapeltiin automatisoidulla sulkijalla. Toinen testattu vaihtoehto, joskin työlämpi, on ajaa vaippapellit profiloitukoneesta läpi ja tehdä päädyt käsin. Tämä tapahtuu hitsaamalla pyöröleikkurilla leikattuun ja reunoista käännettyyn päätyyn lipareet ja kiinnittämällä pääty vaippaan itseporautuvilla ruuveilla tai niiteillä. Kokoon $\varnothing 400$ ei työn tekohetkellä ollut käytettävissä työkalua automatisoituun päädyksulkijaan, joten ainakin kyseinen koko joudutaan valmistamaan ruuvikiinnitteisillä päädyillä. Tarkoituksena olisi, että laitteen ulkonäkö pysyisi samanlaisena koosta riippumatta, joten todennäköisesti kaikki koot päädytään valmistamaan ruuvikiinnitteisillä päädyillä, mutta sileillä kuorilla.

Imukartioksi valittiin syvävedetty malli, sillä se on Lindabin standardituote ja nopeuttaa täten tuotteen valmistusta. Vaimennusmateriaalin valinnassa päädyttiin Acutec-polyesterikuituun sen hygieenisyyden ja allergiaystävällisyyden takia. Acutec on Lindab Groupin rekisteröimä kaupp nimi polyesterikuidulle. Polyesterikuitu on materiaali, joka koostuu polyeteenitereftalaatista, ja se on hajuton ja homehtumaton materiaali, joka ei juurikaan sido itseensä kosteutta. Acutec-levyt, joita Lindab käyttää, on testattu standardin EN 13501-1:2007 mukaisesti. Testissä ne ovat saavuttaneet SRMK:n osa

E7:n mukaisen paloluokan B-s1-d0, eli tuotteet ovat heikosti paloa levittäviä, savun-
tuotto on vähäinen ja materiaali on palotilanteessa pisaroimatonta. Kuvassa 15 on
suunnittelun tuloksena syntynyt 3D-malli valmiista tuotteesta. Kuvassa 16 esiintyy
taas valmis tuote. Tuotteen rakenteeseen liittyvät seikat ovat kuitenkin riippuvaisia
prosessin kehityksestä konsernissa, sillä periaatteessa tuotetta pitää pystyä valmista-
maan useissa eri tuotantoyksiköissä ilman suurempia koneinvestointeja.



KUVA 15. Tuotteen suunnittelun tuloksena syntynyt 3D-malli



KUVA 16. Valmis tuote

7 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Lindabin mallistoon suurten ilmavirtojen poistoilmalaite. Konsernin mallistosta löytyi jo entuudestaan äänenvaimennin imukartiolla, mutta se ei sisältänyt säätöpeltiä, eikä siten ole varsinaisesti päätelaite. Työn tavoitteena oli myös tuottaa tarvittava tekninen dokumentaatio valmista tuotetta varten.

Tämä opinnäytetyön aihe syntyi puhtaasti markkinoiden tarpeesta. Tämänkaltaiselle tuotteelle näytti olevan kysyntää hyvinkin monissa kohteissa, joissa Lindab toimii ilmanvaihtojärjestelmien laitetoimittajana. Työn toteuttaminen lähti liikkeelle ideointivaiheen jälkeen prototyyppien rakentamisella ja niiden testaamisella laboratoriossa. Tämä oli sikäli normaalista tuotekehityksen kaavasta poikkeavaa, että viralliset piirustukset tuotteelle laadittiin vasta ensimmäisen referenssikohteen toimitusten yhteydessä. Tuote on kuitenkin yhdistelmä ”valmiita tuotteita”, joten käytännön toteutus prototyyppien osalta oli mahdollista ilman suunnitelmia pelkkien skitsien avulla. Mittaustulosten vertailu kilpaileviin tuotteisiin herätti paljon kysymyksiä siitä, mikä on oikea tapa ilmoittaa asiat. Pääsääntöisesti tämän kaltaisten teknisten tuotteiden suoritusarvot ilmoitetaan ”todellisuutta” vastaavina, mutta itse havaitsin suuria eroavaisuuksia ilmoitustapojen välillä. Suurimpia eroavaisuuksia teknisten suoritusarvojen ilmoitustavassa ovat seuraavat asiat: ilmoitetaanko vaimennusarvoiksi tuotteen todellinen äänenvaimennus vai lisätäänkö vaimennukseen oletettu ”huonevaimennus”, eli niin kutsuttu Sabine? Vaikutusta on myös sillä, minkä kokoiselle huoneelle Sabine on ilmoitettu. Tämän lisäksi toinen merkittävä asia on, ilmoitetaanko mukaan myös mahdollinen haarakanavan aiheuttama vaimennus. Kolmas merkittävä asia on, ilmoitetaanko äänen tehotaso L_W vai äänen painetaso L_P . Neljäs vaikuttava asia on, lasketaanko mukaan A-painotus.

Lindab päätyi tämän tuotteen osalta ilmoittamaan tekniset arvot muiden tuotteiden kanssa yhtenevällä tavalla eli äänenvaimennuksen keskimääräisenä äänenvaimennuksena kanavasta huoneeseen sisältäen liittyvän kanavan päätevaimennuksen vapaassa asennuksessa. Tuotteen oman äänenkehityksen taas ilmoitamme A-painotettuna äänen tehotasona L_{WA} .

Opinnäytetyöni onnistuminen yrityksen kannalta näyttäisi juuri siltä, mikä olikin odotettu lopputulos. Yrityksellä on nyt valmis tuote sekä tarvittava tekninen dokumentaatio tuotteen myymistä varten. Pääsin itse myös selvittämään tällaisen tuotteen markkinahintaa, vaikuttamaan hinnoitteluun sekä arvioimaan mahdollisia myyntimääriä. Henkilökohtaisesti opin tämän projektin tiimoilta hyvin paljon tuotekehitysprosessista suuressa yrityksessä. Näkisin itseni myös hyvin mielelläni työskentelemässä tuotekehityksen parissa joskus tulevaisuudessa. Valmista tuote-esitteen layoutia ei tämän työn liitteisiin aikataulun puitteissa valitettavasti saatu, mutta sama tekninen dokumentaatio, joka tämän opinnäytetyön liitteistä löytyy, löytyy myös tuotteen teknisestä esitteestä lähitulevaisuudessa.

LÄHTEET

1. Lindab 2012. Tietoa yrityksestä. Verkkodokumentti. <http://www.lindab.fi>. Päivitetty 10.4.2012. Luettu 10.4.2012.
2. Ympäristöministeriö. Moniste numero 133. 2004. Tyyppihyväksyntä vs. CE-merkintä.
3. Seppänen O, Halme A. Ilmastoinnin äänitekniikka. Gummerus Oy 2002.
4. Äijö R. Käyttäjäkeskeinen suunnittelu teollisuusorganisaatiossa. Pro gradu - tutkielma, Helsingin kauppakorkeakoulu, Johtamisen laitos 2004.
5. Tuulenmäki A.2012. Lupa toimia eri tavalla. WSOY Porvoo 2010
6. Wikipedia 2012. Tuotekehitys. Verkkodokumentti. <http://www.Wikipedia.fi>. Päivitetty 10.5.2012. Luettu 10.5.2012.
7. TTT-käsikirja luku 22. ABB Oy 2007.
8. DI Pukkila O. Puhallintekninen käsikirja. Ilmateollisuus Oy 1986.
9. Lindab Ventilation, Air duct systems- katalogi. Lindab Group 2010.
10. Lindab Comfort- katalogi. Oy Lindab Ab 2007.
11. Ympäristöministeriö. Ilmanvaihdon tyyppihyväksyntäohjeet 2010.

12. Suomen standardoimisliitto SFS Ry. Rakennusten ilmanvaihto. Metallilevystä valmistetut pyöreät kanavat ja kanavanosat. Lujuus. SFS Ry. 2003.
13. Suomen standardoimisliitto SFS Ry. Rakennusten ilmanvaihto. Kanavistot. Kanaviston puhdistettavuuden asettamat vaatimukset kanavanosille. 2007.
14. Kylliäinen M. Talonrakentamisen akustiikka. Tampereen teknillinen yliopisto. 2006.
15. Ympäristöministeriö. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2012.
16. Veijalainen, Tuomas. Henkilökohtainen ohjaus 2012-2013. Product Manager, Acoustics. Lindab Group, Comfort Division.
17. Bochen, Daniel. Koulutus laboratorion laitteisiin ja mittaustekniikoihin Lindabin laboratoriossa 28-30.3.2012. Engineer, R&D Department, Lindab Comfort.
18. Wikipedia 2013. Venturi-ilmiö. Verkkodokumentti. <http://www.Wikipedia.fi>. Päivitetty 4.4.2013. Luettu 24.3.2014.

Vaimennustaulukot (ensimmäiset prototyytit)

Sound Attenuation: $\phi 250$

| Attenuation DL | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Product A K-8 | 3 | 9 | 0 | 4 | 8 | 7 | 6 | 7 |
| Product A K-full open | 3 | 9 | 0 | 4 | 8 | 7 | 4 | 6 |
| Product A K-full closed | 4 | 9 | 0 | 4 | 8 | 12 | 9 | 10 |
| Product B K-full open | 3 | 10 | 1 | 4 | 7 | 6 | 4 | 6 |
| Product B K-45 | 3 | 9 | 1 | 4 | 6 | 6 | 5 | 6 |
| Product B K-8 | 2 | 9 | 2 | 4 | 6 | 11 | 9 | 9 |
| Product C K-full open | 4 | 9 | 1 | 4 | 8 | 5 | 2 | 5 |
| Product C K-45 | 3 | 9 | 0 | 4 | 8 | 6 | 3 | 6 |
| Product C K-8 | 4 | 8 | 1 | 4 | 7 | 9 | 7 | 10 |

Sound Attenuation: $\phi 315$

| Attenuation DL | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|---------------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| M11, $\phi 315$ Product A K-Full open | 3 | 6 | 1 | 2 | 7 | 4 | 3 | 4 |
| M11, $\phi 315$ Product A K-70 | 3 | 6 | 1 | 1 | 7 | 6 | 4 | 5 |
| M11, $\phi 315$ Product A K-13 | 3 | 6 | 0 | 1 | 8 | 9 | 7 | 8 |
| M11, $\phi 315$ Product B K-Full open | 2 | 7 | 2 | 2 | 8 | 5 | 3 | 4 |
| M11, $\phi 315$ Product B K-70 | 2 | 7 | 2 | 2 | 7 | 6 | 4 | 5 |
| M11, $\phi 315$ Product B K-13 | 2 | 6 | 1 | 1 | 8 | 8 | 7 | 8 |
| M11, $\phi 315$ Product C K-full open | 3 | 6 | 2 | 1 | 6 | 4 | 1 | 3 |
| M11, $\phi 315$ Product C K-70 | 3 | 6 | 2 | 1 | 6 | 5 | 3 | 4 |
| M11, $\phi 315$ Product C K-13 | 3 | 6 | 1 | 0 | 7 | 8 | 5 | 8 |

Sound Attenuation: $\phi 400$

| Attenuation DL | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|--------------------------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| M1, $\phi 400$ Product A K-full open | 2 | 3 | 1 | 3 | 6 | 4 | 3 | 4 |
| M1, $\phi 400$ Product A K-130 | 2 | 3 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| M1, $\phi 400$ Product A K-16 | 3 | 2 | 0 | 3 | 10 | 7 | 6 | 8 |
| M1, $\phi 400$ Product B K-full open | 2 | 4 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| M1, $\phi 400$ Product B K-130 | 2 | 3 | 1 | 3 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| M1, $\phi 400$ Product B K-16 | 3 | 2 | 0 | 3 | 10 | 7 | 6 | 8 |
| M1, $\phi 400$ Product C K-full open | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 3 |
| M1, $\phi 400$ Product C K-130 | 4 | 3 | 1 | 2 | 5 | 4 | 2 | 3 |
| M1, $\phi 400$ Product C K-16 | 3 | 2 | 1 | 2 | 9 | 6 | 4 | 7 |

Ääni- ja painehäviödiagrammit+vaimennukset

Sound Measurement Test Report (in accordance with ISO 3741)

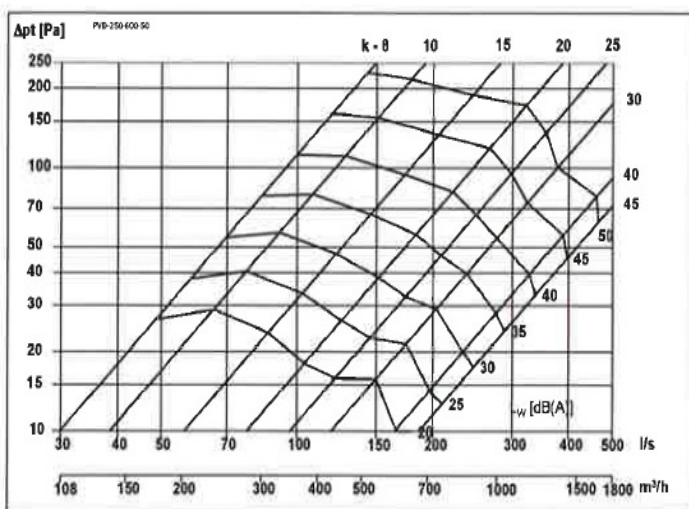
Date 12-11 2012

EXAD-250

Description:

Without Grill

Diagram for pressure and flow noise:



$$L_{Woct} [dB] = L_{WA} + K_{oct}$$

| q [l/s] | Δp _t [Pa] | L _{WA} [dBA] | | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| - | - | 33 | K _{oct} | 13 | 4 | -1 | -5 | -5 | -7 | -14 | -17 |

Octave correction factors to the diagram are calculated at the listed value of either q, Δp_t or L_{WA}/L_{pA}

Calculation of pressure and sound effect according to flow:

Sound effect: $L_{W(oct \text{ or } A)} = k \cdot \log(q) + L_0$

L_W - sound effect [dB]

q - flow [l/s]

k - factor, sound effect [-]

K_{factor} - factor, balancing [l/(s·√Pa)]

Total pressuredrop: $\Delta p_t = c_{pt} \cdot q^2$

L₀ - addend, sound effect [-]

p_t - pressuredifference, balancing [Pa]

Δp_t - total pressuredrop [Pa]

Balancing: $q = K_{factor} \cdot \sqrt{p_t}$

c_{pt} - factor, total pressuredrop [Pa·s²/l²]

| | Total p c _{ptot} | Balancing K-factor | | L _{WA} | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|--------------|------------------------------|-----------------------|---------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 45 | 0,0003 | Not measured | k Lo | 72,5 -143,3 | 37,7 -47,6 | 64,8 -119,2 | 59,7 -110,3 | 63,4 -123,2 | 80,0 -167,2 | 88,0 -192,6 | 108,7 -251,8 | 20,2 -32,2 |
| 40 | 0,0004 | Not measured | k Lo | 67,7 -130,2 | 33,8 -36,3 | 50,4 -81,8 | 55,0 -97,9 | 58,1 -109,3 | 74,5 -152,6 | 85,9 -185,0 | 104,9 -238,6 | 21,6 -34,8 |
| 30 | 0,0007 | Not measured | k Lo | 74,6 -142,3 | -2,6 54,7 | 51,8 -82,6 | 56,0 -98,7 | 57,7 -107,3 | 70,5 -139,4 | 86,0 -175,4 | 97,6 -208,4 | 48,7 -98,3 |
| 25 | 0,0011 | Not measured | k Lo | 64,3 -114,0 | -57,4 190,4 | 60,4 -101,5 | 57,3 -100,1 | 58,1 -106,8 | 64,4 -121,8 | 74,9 -145,1 | 92,3 -190,8 | 58,8 -119,0 |
| 20 | 0,0017 | Not measured | k Lo | 61,2 -103,4 | -84,5 251,8 | 45,3 -63,5 | 58,9 -101,6 | 54,0 -94,6 | 56,4 -99,2 | 75,3 -141,9 | 90,4 -181,7 | 58,5 -116,2 |
| 15 | 0,0032 | Not measured | k Lo | 66,5 -108,7 | 117,0 -212,5 | 63,3 -101,5 | 45,8 -68,0 | 44,5 -67,8 | 54,9 -89,2 | 68,5 -117,9 | 88,7 -167,8 | 52,9 -97,5 |
| 10 | 0,0068 | Not measured | k Lo | 68,7 -104,7 | 143,4 -251,5 | 41,2 -48,2 | 36,4 -42,7 | 42,1 -57,8 | 56,9 -85,7 | 73,3 -119,0 | 91,7 -163,8 | 53,7 -91,5 |
| k - 8 | 0,0112 | Not measured | k Lo | 63,9 -87,7 | 169,5 -291,5 | 57,5 -78,2 | 36,3 -38,5 | 40,1 -48,0 | 52,7 -70,8 | 67,0 -98,6 | 84,9 -140,7 | 57,0 -92,8 |

Ääni- ja painehäviödiagrammit+vaimennukset

Sound Measurement Test Report (in accordance with ISO 3741)

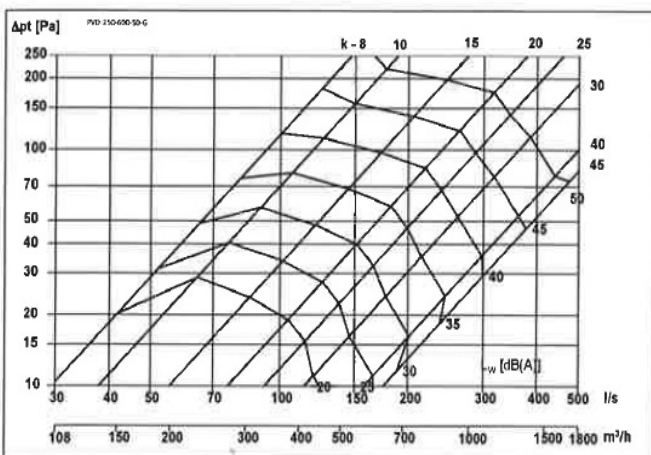
Date 12-11 2012

EXAD-250

Description:

With Grill

Diagram for pressure and flow noise:



$$L_{Woct} [dB] = L_{WA} + K_{Oct}$$

| q [l/s] | Δp _t [Pa] | L _{WA} [dBA] | | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| - | - | 33 | K _{Oct} | 16 | 3 | -3 | -7 | -3 | -10 | -16 | -17 |

Octave correction factors to the diagram are calculated at the listed value of either q, Δp_t or L_{WA}/L_{PA}

Calculation of pressure and sound effect according to flow:

Sound effect: $L_{W(oct \text{ or } A)} = k \cdot \log(q) + L_0$

L_W - sound effect [dB]

q - flow [l/s]

k - factor, sound effect [-]

K_{factor} - factor, balancing [l/(s·√Pa)]

Total pressuredrop: $\Delta p_t = c_{pt} \cdot q^2$

L₀ - addend, sound effect [-]

p_t - pressuredifference, balancing [Pa]

Δp_t - total pressuredrop [Pa]

Balancing: $q = K_{factor} \cdot \sqrt{p_t}$

c_{pt} - factor, total pressuredrop [Pa·s²/l²]

| | Total p c _{ptot} | Balancing K-factor | | L _{WA} | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|-------|------------------------------|-----------------------|----|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 45 | 0,0003 | Not measured | k | 49,7 | -4,8 | 39,3 | 50,0 | 57,6 | 11,4 | 131,8 | 97,6 | 8,2 |
| | | | Lo | -83,1 | 60,7 | -56,2 | -88,2 | -110,1 | 8,8 | -295,3 | -221,6 | -2,0 |
| 40 | 0,0004 | Not measured | k | 59,0 | 25,7 | 48,1 | 55,3 | 59,3 | 24,8 | 138,1 | 103,7 | 9,9 |
| | | | Lo | -105,9 | -14,9 | -77,4 | -100,5 | -114,2 | -24,3 | -310,3 | -235,0 | -6,0 |
| 30 | 0,0008 | Not measured | k | 59,2 | -66,2 | 41,8 | 53,8 | 55,8 | 54,0 | 86,5 | 99,3 | 33,6 |
| | | | Lo | -103,1 | 212,4 | -59,1 | -94,3 | -103,6 | -94,6 | -176,3 | -212,3 | -61,1 |
| 25 | 0,0012 | Not measured | k | 62,7 | -75,2 | 48,9 | 55,4 | 56,8 | 65,9 | 79,4 | 96,0 | 49,1 |
| | | | Lo | -109,2 | 232,1 | -74,2 | -96,3 | -104,0 | -121,6 | -155,3 | -198,9 | -96,1 |
| 20 | 0,0017 | Not measured | k | 62,3 | -76,3 | 45,8 | 54,4 | 53,8 | 61,9 | 74,8 | 88,7 | 52,9 |
| | | | Lo | -105,8 | 231,3 | -65,3 | -91,5 | -94,8 | -110,2 | -140,7 | -178,0 | -103,1 |
| 15 | 0,0033 | Not measured | k | 65,2 | 15,6 | 52,6 | 47,7 | 39,2 | 58,8 | 68,9 | 86,2 | 57,7 |
| | | | Lo | -105,8 | 13,3 | -77,4 | -72,2 | -56,3 | -97,8 | -118,9 | -162,1 | -107,8 |
| 10 | 0,0070 | Not measured | k | 68,0 | 160,3 | 48,1 | 32,8 | 41,6 | 54,8 | 71,5 | 92,5 | 52,4 |
| | | | Lo | -102,9 | -285,9 | -62,6 | -35,2 | -56,4 | -81,0 | -114,8 | -164,9 | -88,3 |
| k - 8 | 0,0116 | Not measured | k | 52,6 | 122,0 | 36,5 | 25,5 | 31,3 | 42,5 | 54,8 | 70,4 | 50,8 |
| | | | Lo | -65,3 | -197,9 | -35,7 | -17,2 | -31,7 | -51,1 | -74,2 | -110,9 | -80,4 |

Sound Attenuation:

| Attenuation DL | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| k-8 | 15 | 20 | 14 | 21 | 16 | 18 | 14 | 12 |
| k-20 | 15 | 21 | 14 | 19 | 16 | 18 | 12 | 10 |
| k-40 | 15 | 21 | 14 | 19 | 16 | 15 | 10 | 10 |

Ääni- ja painehäviödiagrammit+vaimennukset

Sound Measurement Test Report (in accordance with ISO 3741)

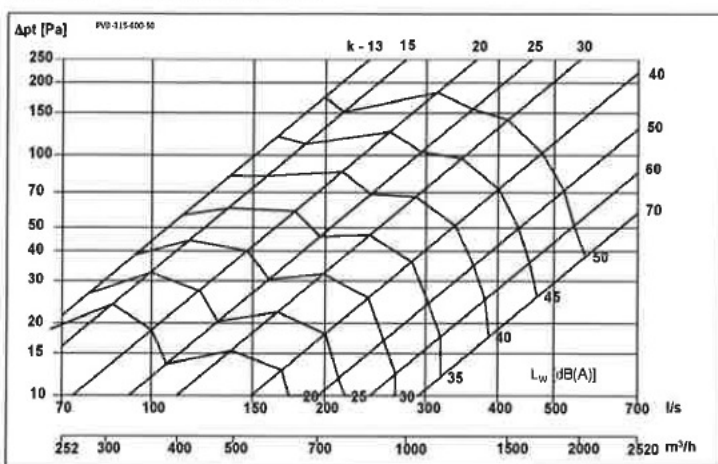
Date 12-11 2012

EXAD-315

Description:

Without Grill

Diagram for pressure and flow noise:



$$L_{Woct} [dB] = L_{WA} + K_{oct}$$

| q [l/s] | Dp _t [Pa] | L _{WA} [dBA] | | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| - | - | 33 | K _{oct} | 11 | 2 | -2 | -5 | -5 | -6 | -16 | -24 |

Octave correction factors to the diagram are calculated at the listed value of either q, Δp_t or L_{WA}/L_{pA}

Calculation of pressure and sound effect according to flow:

Sound effect: $L_{W(oct \text{ or } A)} = k \cdot \log(q) + L_0$

L_w - sound effect [dB]

q - flow [l/s]

k - factor, sound effect [-]

K_{factor} - factor, balancing [l/(s·√Pa)]

Total pressuredrop: $\Delta p_t = c_{pt} \cdot q^2$

L₀ - addend, sound effect [-]

p_i - pressuredifference, balancing [Pa]

Δp_t - total pressuredrop [Pa]

Balancing: $q = K_{factor} \cdot \sqrt{p_i}$

c_{pt} - factor, total pressuredrop [Pa·s²/l²]

| | Total p c _{ptot} | Balancing K-factor | | L _{wA} | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|--------|------------------------------|-----------------------|----|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 70 | 0,0001 | Not measured | k | 59,7 | 38,5 | 51,6 | 53,5 | 52,8 | 61,1 | 63,6 | 91,3 | 90,0 |
| | | | Lo | -114,3 | -51,8 | -92,9 | -101,9 | -100,6 | -121,6 | -132,1 | -212,1 | -216,6 |
| 60 | 0,0002 | Not measured | k | 64,6 | 54,9 | 55,5 | 57,1 | 56,0 | 62,6 | 73,8 | 98,0 | 90,0 |
| | | | Lo | -126,7 | -94,3 | -101,5 | -110,3 | -108,6 | -125,5 | -157,4 | -228,2 | -215,9 |
| 50 | 0,0003 | Not measured | k | 64,0 | 40,0 | 50,0 | 53,0 | 56,6 | 63,0 | 72,2 | 98,6 | 90,0 |
| | | | Lo | -123,8 | -55,4 | -85,6 | -98,4 | -109,5 | -126,0 | -151,3 | -227,1 | -213,8 |
| 40 | 0,0005 | Not measured | k | 66,4 | 60,0 | 68,4 | 66,0 | 54,9 | 57,1 | 72,3 | 94,6 | 40,2 |
| | | | Lo | -127,8 | -104,2 | -130,5 | -129,4 | -104,4 | -110,1 | -148,0 | -212,0 | -82,1 |
| 30 | 0,0008 | Not measured | k | 62,5 | 50,0 | 50,3 | 49,7 | 51,3 | 59,3 | 68,1 | 88,6 | 80,0 |
| | | | Lo | -113,7 | -76,9 | -81,1 | -84,9 | -92,7 | -112,3 | -132,1 | -189,5 | -178,6 |
| 25 | 0,0012 | Not measured | k | 56,6 | 50,0 | 56,9 | 44,8 | 48,4 | 56,2 | 65,0 | 86,8 | 80,0 |
| | | | Lo | -94,8 | -72,4 | -94,5 | -71,0 | -83,5 | -101,1 | -119,3 | -178,5 | -172,7 |
| 20 | 0,0019 | Not measured | k | 60,6 | 49,0 | 40,6 | 35,8 | 41,2 | 55,1 | 66,8 | 83,1 | 38,1 |
| | | | Lo | -101,1 | -68,0 | -54,3 | -47,7 | -63,4 | -94,6 | -120,1 | -164,7 | -68,0 |
| 15 | 0,0033 | Not measured | k | 74,9 | 40,0 | 41,0 | 40,1 | 50,7 | 59,8 | 69,4 | 107,5 | 100,0 |
| | | | Lo | -124,6 | -31,4 | -51,5 | -52,5 | -79,7 | -98,8 | -117,0 | -206,4 | -202,3 |
| k - 13 | 0,0044 | Not measured | k | 61,0 | 30,0 | 37,9 | 25,3 | 40,4 | 53,2 | 64,5 | 87,2 | 80,0 |
| | | | Lo | -90,4 | -9,3 | -42,3 | -18,0 | -53,7 | -80,5 | -102,0 | -158,0 | -153,9 |

Ääni- ja painehäviödiagrammit+vaimennukset

Sound Measurement Test Report (in accordance with ISO 3741)

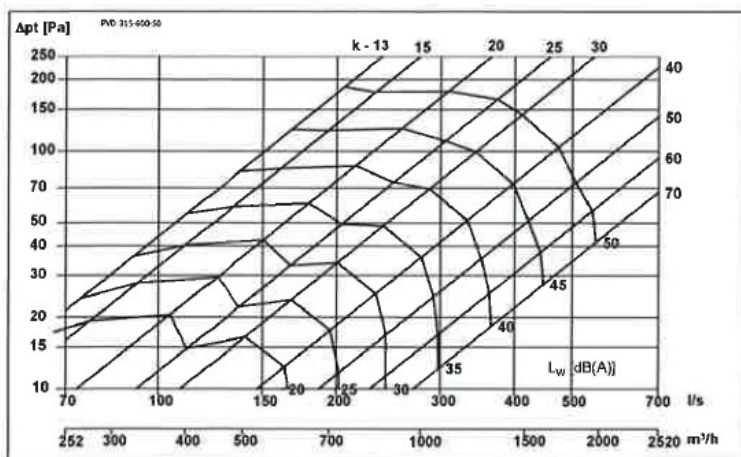
Date 12-11 2012

EXAD-315

Description:

With Grill

Diagram for pressure and flow noise:



$$L_{Woct} [dB] = L_{WA} + K_{oct}$$

| q [l/s] | Δp _t [Pa] | L _{WA} [dBA] | | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| - | - | 33 | K _{oct} | 11 | 2 | -2 | -5 | -4 | -7 | -16 | -25 |

Octave correction factors to the diagram are calculated at the listed value of either q, Δp_t or L_{WA}/L_{pA}

Calculation of pressure and sound effect according to flow:

Sound effect: $L_{W(oct \text{ or } A)} = k \cdot \log(q) + L_0$

L_W - sound effect [dB]

q - flow [l/s]

k - factor, sound effect [-]

K_{factor} - factor, balancing [l/(s·√Pa)]

Total pressuredrop: $\Delta p_t = c_{pt} \cdot q^2$

L₀ - addend, sound effect [-]

p_i - pressuredifference, balancing [Pa]

Δp_t - total pressuredrop [Pa]

Balancing: $q = K_{factor} \cdot \sqrt{p_i}$

c_{pt} - factor, total pressuredrop [Pa·s²/l²]

| | Total p c _{ptot} | Balancing K-factor | | L _{WA} | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|--------|------------------------------|-----------------------|----|-----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 70 | 0,0001 | Not measured | k | 56,6 | 40,0 | 50,8 | 50,8 | 47,9 | 50,2 | 76,9 | 94,9 | 90,0 |
| | | measured | Lo | -104,9 | -57,2 | -91,3 | -95,9 | -88,2 | -91,0 | -165,5 | -221,1 | -216,9 |
| 60 | 0,0002 | Not measured | k | 57,6 | 40,0 | 49,9 | 52,5 | 50,7 | 51,6 | 75,7 | 95,1 | 90,0 |
| | | measured | Lo | -107,5 | -54,8 | -87,5 | -98,9 | -95,3 | -94,8 | -162,0 | -221,1 | -216,9 |
| 50 | 0,0003 | Not measured | k | 62,5 | 40,0 | 46,6 | 55,5 | 56,7 | 57,5 | 78,5 | 103,7 | 90,0 |
| | | measured | Lo | -119,2 | -54,4 | -77,1 | -105,0 | -110,1 | -109,4 | -167,5 | -240,6 | -213,7 |
| 40 | 0,0005 | Not measured | k | 64,8 | 50,0 | 51,4 | 55,5 | 54,6 | 61,1 | 73,2 | 96,9 | 90,0 |
| | | measured | Lo | -123,4 | -79,1 | -87,2 | -103,0 | -103,7 | -118,5 | -150,9 | -218,7 | -211,8 |
| 30 | 0,0008 | Not measured | k | 64,2 | 50,0 | 47,3 | 41,5 | 45,0 | 70,7 | 69,7 | 86,3 | 80,0 |
| | | measured | Lo | -117,9 | -75,8 | -74,2 | -65,2 | -77,0 | -139,8 | -136,2 | -184,1 | -178,8 |
| 25 | 0,0012 | Not measured | k | 57,2 | 50,0 | 52,1 | 44,2 | 45,1 | 64,6 | 67,4 | 83,3 | 80,0 |
| | | measured | Lo | -97,1 | -72,9 | -84,0 | -70,2 | -75,8 | -121,8 | -126,5 | -170,5 | -174,1 |
| 20 | 0,0019 | Not measured | k | 63,9 | 20,3 | 39,3 | 35,4 | 47,1 | 59,4 | 71,7 | 83,9 | 39,2 |
| | | measured | Lo | -109,0 | 1,0 | -50,9 | -46,6 | -77,3 | -105,1 | -131,8 | -166,5 | -70,7 |
| 15 | 0,0033 | Not measured | k | 62,5 | 40,0 | 48,6 | 39,1 | 47,8 | 56,5 | 63,9 | 81,0 | 80,0 |
| | | measured | Lo | -97,8 | -38,9 | -68,3 | -50,9 | -73,7 | -91,8 | -105,1 | -148,9 | -158,9 |
| k - 13 | 0,0044 | Not measured | k | 56,3 | 30,0 | 39,0 | 34,9 | 36,7 | 50,2 | 59,2 | 80,6 | 80,0 |
| | | measured | Lo | -80,3 | -11,4 | -44,7 | -39,1 | -45,9 | -74,0 | -90,5 | -143,8 | -154,4 |

Sound Attenuation:

| Attenuation DL | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| k-13 | 9 | 14 | 11 | 13 | 15 | 16 | 12 | 13 |
| k-30 | 9 | 15 | 11 | 12 | 14 | 15 | 10 | 11 |
| k-70 | 9 | 14 | 11 | 13 | 14 | 13 | 9 | 9 |

Ääni- ja painehäviödiagrammit+vaimennukset

Sound Measurement Test Report (in accordance with ISO 3741)

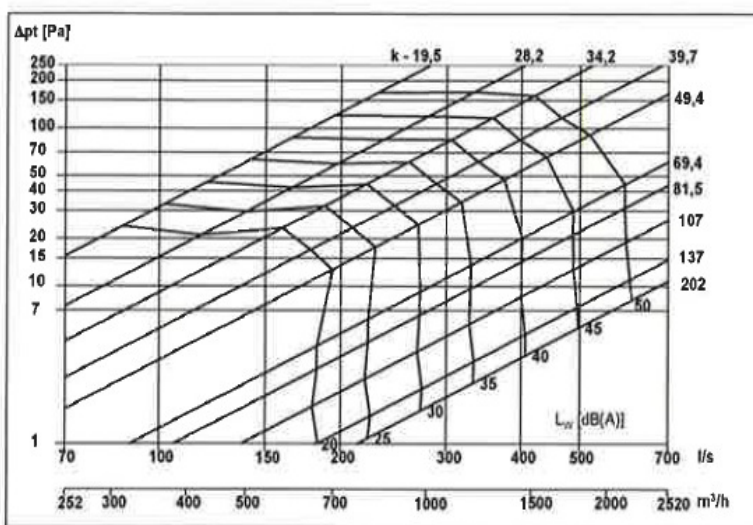
Date 12-11 2012

EXAD-400

Description:

Without Grill

Diagram for pressure and flow noise:



$$L_{Woct} [dB] = L_{WA} + K_{oct}$$

| q [l/s] | Dp [Pa] | L _{WA} [dBA] | | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|---------|---------|-----------------------|------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| - | - | 33 | K _{oct} | 11 | 0 | -6 | -4 | -4 | -7 | -17 | -18 |

Octave correction factors to the diagram are calculated at the listed value of either q, Δp_t or L_{WA}/L_{pA}

Calculation of pressure and sound effect according to flow:

Sound effect: $L_{W(oct \text{ or } A)} = k \cdot \log(q) + L_0$

L_W - sound effect [dB]

q - flow [l/s]

k - factor, sound effect [-]

K_{factor} - factor, balancing [l/(s·√Pa)]

Total pressuredrop: $\Delta p_t = c_{pt} \cdot q^2$

L₀ - addend, sound effect [-]

p_t - pressuredifference, balancing [Pa]

Δp_t - total pressuredrop [Pa]

Balancing: $q = K_{factor} \cdot \sqrt{p_t}$

c_{pt} - factor, total pressuredrop [Pa·s²/l²]

| | Total p c _{ptot} | Balancing K-factor | | L _{WA} | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|----------|------------------------------|-----------------------|----|-----------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 202 | 0,0000 | Not measured | k | 57,0 | 14,4 | 46,2 | 52,5 | 49,4 | 55,8 | 62,9 | 86,3 | 40,2 |
| | | | Lo | -108,7 | 9,7 | -86,0 | -103,4 | -93,1 | -109,1 | -131,4 | -200,0 | -83,9 |
| 137 | 0,0000 | Not measured | k | 58,0 | 11,1 | 41,8 | 50,7 | 48,1 | 58,3 | 63,2 | 88,0 | 39,2 |
| | | | Lo | -111,3 | 18,4 | -74,0 | -99,2 | -89,7 | -115,7 | -132,1 | -204,3 | -80,8 |
| 107 | 0,0001 | Not measured | k | 57,5 | 16,0 | 43,7 | 52,8 | 47,5 | 57,5 | 62,8 | 86,8 | 39,4 |
| | | | Lo | -109,5 | 5,6 | -78,0 | -104,4 | -87,8 | -113,1 | -130,8 | -200,7 | -81,4 |
| 81,5 | 0,0001 | Not measured | k | 58,7 | 40,0 | 47,4 | 54,0 | 47,2 | 59,1 | 64,6 | 90,0 | 80,0 |
| | | | Lo | -112,7 | -58,7 | -86,9 | -107,6 | -87,0 | -117,3 | -135,4 | -209,2 | -190,6 |
| 69,4 | 0,0001 | Not measured | k | 58,5 | 15,9 | 47,4 | 52,8 | 48,8 | 59,0 | 64,3 | 87,5 | 35,5 |
| | | | Lo | -112,4 | 6,2 | -85,5 | -103,8 | -91,3 | -117,2 | -134,7 | -202,7 | -71,4 |
| 49,4 | 0,0003 | Not measured | k | 70,1 | 48,4 | 48,3 | 54,4 | 56,4 | 72,3 | 79,0 | 106,1 | 25,3 |
| | | | Lo | -140,3 | -74,8 | -82,9 | -104,9 | -109,7 | -149,8 | -170,2 | -248,3 | -45,5 |
| 39,7 | 0,0005 | Not measured | k | 71,7 | 32,0 | 54,0 | 52,4 | 52,3 | 61,3 | 88,4 | 113,0 | 44,1 |
| | | | Lo | -141,5 | -32,3 | -96,0 | -98,6 | -97,9 | -119,0 | -189,8 | -259,1 | -91,4 |
| 34,2 | 0,0009 | Not measured | k | 71,4 | 41,8 | 57,7 | 47,9 | 59,0 | 66,5 | 78,8 | 95,2 | 54,0 |
| | | | Lo | -137,4 | -54,8 | -101,2 | -84,7 | -112,8 | -130,0 | -161,8 | -207,1 | -113,0 |
| 28,2 | 0,0015 | Not measured | k | 66,1 | 40,0 | 48,9 | 52,0 | 50,2 | 63,3 | 83,9 | 104,1 | 100,0 |
| | | | Lo | -116,8 | -48,9 | -77,5 | -92,3 | -87,7 | -116,2 | -164,8 | -217,2 | -217,9 |
| k - 19,5 | 0,0032 | Not measured | k | 70,8 | 51,4 | 49,0 | 41,8 | 44,2 | 55,0 | 75,6 | 98,9 | 68,0 |
| | | | Lo | -117,3 | -68,0 | -74,3 | -64,5 | -66,9 | -87,6 | -132,6 | -189,4 | -129,4 |

Ääni- ja painehäviödiagrammit+vaimennukset

Sound Measurement Test Report (in accordance with ISO 3741)

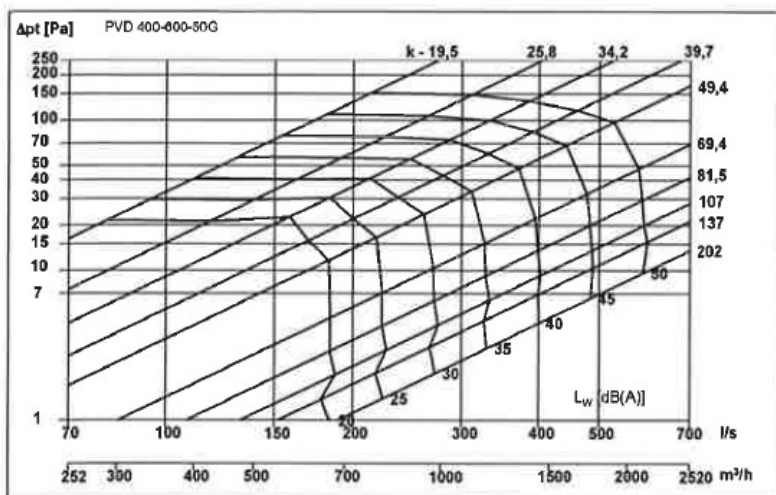
Date 12-11 2012

EXAD-400

Description:

With Grill

Diagram for pressure and flow noise:



$$L_{Woct} [dB] = L_{WA} + K_{oct}$$

| q [l/s] | Δp _t [Pa] | L _{WA} [dBA] | K _{oct} | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|---------|----------------------|-----------------------|------------------|-------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| - | - | 33 | | 11 | -1 | -5 | -3 | -4 | -8 | -17 | -19 |

Octave correction factors to the diagram are calculated at the listed value of either q, Δp_t or L_{WA}/L_{pA}

Calculation of pressure and sound effect according to flow:

Sound effect: $L_{W(oct \text{ or } A)} = k \cdot \log(q) + L_0$

L_W - sound effect [dB]

q - flow [l/s]

k - factor, sound effect [-]

K_{factor} - factor, balancing [l/(s·√Pa)]

Total pressuredrop: $\Delta p_t = c_{pt} \cdot q^2$

L₀ - addend, sound effect [-]

p_i - pressuredifference, balancing [Pa]

Δp_t - total pressuredrop [Pa]

Balancing: $q = K_{factor} \cdot \sqrt{p_i}$

c_{pt} - factor, total pressuredrop [Pa·s²/l²]

| | Total p c _{ptot} | Balancing K-factor | | L _{WA} | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz | 8000 Hz |
|----------|------------------------------|-----------------------|----|-----------------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| 202 | 0,0000 | Not measured | k | 59,6 | 17,6 | 39,8 | 54,3 | 45,6 | 61,8 | 63,9 | 87,9 | 41,9 |
| | | | Lo | -115,1 | 1,8 | -70,3 | -109,4 | -82,9 | -124,2 | -133,7 | -203,9 | -87,8 |
| 137 | 0,0000 | Not measured | k | 57,1 | 26,5 | 41,9 | 47,7 | 45,8 | 59,6 | 59,3 | 82,2 | 36,2 |
| | | | Lo | -108,4 | -22,4 | -74,6 | -91,7 | -83,2 | -118,5 | -121,4 | -188,6 | -73,3 |
| 107 | 0,0001 | Not measured | k | 60,2 | 9,9 | 45,1 | 55,3 | 46,8 | 62,7 | 64,3 | 91,0 | 40,3 |
| | | | Lo | -116,8 | 21,4 | -82,5 | -111,5 | -86,0 | -126,8 | -134,9 | -212,0 | -84,0 |
| 81,5 | 0,0001 | Not measured | k | 59,6 | 40,0 | 51,2 | 55,5 | 45,8 | 61,5 | 64,2 | 88,4 | 80,0 |
| | | | Lo | -115,0 | -59,2 | -97,2 | -111,8 | -83,2 | -123,2 | -134,3 | -205,1 | -190,7 |
| 69,4 | 0,0001 | Not measured | k | 60,4 | 17,2 | 49,4 | 49,5 | 47,9 | 62,2 | 66,9 | 87,0 | 35,7 |
| | | | Lo | -116,8 | 2,8 | -90,8 | -95,5 | -88,6 | -124,9 | -141,2 | -201,2 | -71,8 |
| 49,4 | 0,0003 | Not measured | k | 65,2 | 40,0 | 48,6 | 54,7 | 54,1 | 64,7 | 75,7 | 102,8 | 100,0 |
| | | | Lo | -127,6 | -54,2 | -84,1 | -106,2 | -103,6 | -130,0 | -161,4 | -239,4 | -240,8 |
| 39,7 | 0,0005 | Not measured | k | 69,0 | -8,6 | 41,2 | 46,8 | 52,0 | 62,4 | 89,4 | 104,2 | 39,9 |
| | | | Lo | -133,9 | 70,1 | -64,5 | -84,7 | -96,2 | -121,2 | -191,5 | -235,6 | -79,9 |
| 34,2 | 0,0009 | Not measured | k | 77,5 | 12,9 | 56,5 | 31,1 | 62,3 | 67,9 | 90,2 | 105,4 | 65,9 |
| | | | Lo | -150,5 | 16,8 | -99,5 | -43,7 | -119,5 | -131,9 | -187,3 | -229,9 | -140,2 |
| 25,8 | 0,0015 | Not measured | k | 71,0 | 40,0 | 49,3 | 25,4 | 59,5 | 61,4 | 83,9 | 98,4 | 100,0 |
| | | | Lo | -127,0 | -47,4 | -78,4 | -28,0 | -106,5 | -109,4 | -163,0 | -202,0 | -214,7 |
| k - 19,5 | 0,0033 | Not measured | k | 70,6 | 93,6 | 44,7 | 10,5 | 48,1 | 53,3 | 87,2 | 93,5 | 60,1 |
| | | | Lo | -114,5 | -155,9 | -64,2 | 7,0 | -71,7 | -81,5 | -156,3 | -176,1 | -109,2 |

Sound Attenuation:

LIITE 2(7).

Ääni- ja painehäviödiagrammit+vaimennukset