

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2024

Santtu Jalonen

# Akustisen äänityskopin suunnittelu



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2024 | 47 sivua

Santtu Jalonen

## Akustisen äänityskopin suunnittelu

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja suunnitella, miten äänieristetty ja ääntä vaimentava akustinen äänityskoppi voidaan rakentaa kohteen tilarajoitukset huomioon ottaen. Työssä keskitytään erityisesti äänityskopin akustiseen toimivuuteen materiaaliteknisestä sekä rakenteellisesta näkökulmasta. Työ tehtiin opinnäytetyön tekijän tarpeesta ääntä eristävälle sekä ääntä vaimentavalle äänitystilalle.

Työssä käytetään kirja- ja verkkolähteitä akustiikkaan ja rakenteiden akustiikkasuunnitteluun liittyen sekä henkilöhaastattelua Turun ammattikorkeakoulun akustiikkalaboratorion henkilökunnan kanssa. Työssä hyödynnetään myös akustiikkalaboratorion kokemusta äänieristetyn kopin rakentamisesta. Myös kaupallisesti valmistettujen äänitystilojen materiaalivalinnat ja ominaisuudet otetaan huomioon.

Opinnäytetyön lopussa esitellään materiaali- ja rakennevalinnat sekä ratkaisut tärkeimpiin ongelma-kohtiin. Työllä saatiin kattava kuva toteutettavasta äänityskopin rakenteesta, mahdollisista ongelmakohdista sekä käytännön ratkaisuksista monipuolisiin akustisiin ongelmiin ja vaatimuksiin.

Asiasanat:

Akustiikka, ääneneristys, suunnittelu, materiaalitekniikka, äänentallennus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Degree Programme in Mechanical Engineering

2024 | 47 pages

Santtu Jalonen

## Designing an acoustic recording booth

The goal of this thesis was to research and plan how a sound insulated and sound absorbing recording booth could be built while taking into account the spatial limits of the target environment. The focus of the thesis was particularly on the acoustic performance of the recording booth from a material and structural aspect. The author's personal need for a sound insulating and sound absorbing recording environment was the reason for doing the study.

Literature sources related to acoustics and acoustical design of structures are used in this thesis as well as a personal interview with the staff of the Acoustics Laboratory of Turku University of Applied Sciences. The thesis also utilized the experience of the Acoustics Laboratory in building a sound insulated booth. Material choices and properties of commercially manufactured recording spaces are also taken into consideration.

Finally, as the result of the study the material and structural choices as well as solutions to the key problems are presented. The work provides a comprehensive view of the structure of the recording booth for implementing, possible problematic areas as well as practical solutions to a variety of acoustic problems and requirements.

Keywords:

Acoustics, sound insulation, design, materials technology, audio recording

# Sisältö

<b>1 Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2 Taustatieto</b>	<b>8</b>
2.1 Kuluttajakäyttöön valmistetut kaupalliset ratkaisut	8
2.2 Käytettävä äänityslaitteisto	9
<b>3 Äänen perusteoria</b>	<b>12</b>
3.1 Äänen taajuus	13
3.2 Desibeli, äänen painetaso ja äänen intensiteetti	14
3.3 Kuulon taajuusvaste	15
<b>4 Äänen eteneminen, heijastuminen ja vaimentuminen</b>	<b>17</b>
4.1 Äänen eteneminen	17
4.1.1 Äänen eteneminen ilmassa sekä äänen diffraktio	19
4.2 Äänen heijastuminen	20
4.3 Jälkikaiku	21
4.4 Äänen vaimentuminen ja absorptio	23
4.4.1 Absorboivat materiaalit	25
4.4.2 Paksuuden ja ilmapälin vaikutus esteen absorbointikykyyn	26
<b>5 Rakennesuunnitelma ja materiaalivalinta</b>	<b>28</b>
5.1 Fyysiset mitat	28
5.2 Äänityskopin rakenteen materiaalivalinta	29
5.3 Äänityskopin vaimennusmateriaali	33
5.4 Äänityskopin ovirakenne	34
5.5 Vaihtoehtoinen seinärakenne	35
5.6 Ilmanvaihto	35
5.7 Muut huomioitavat seikat	37
5.8 Tekniset laskelmat	37
5.9 Hinta-arvio	39
<b>6 Yhteenveto</b>	<b>40</b>

## Liitteet

Liite 1. Äänityskopin ominaisuuksien painoarvotaulukko

Liite 2. Akustisen äänityskopin malli

Liite 3. Äänityskopin ja meluansan läpileikkaukset

## Kuvat

Kuva 1. VicBooth Ultra-äänityskopit (VicBooth 2024).	9
Kuva 2. NT1-mikrofonin taajuusvaste (Rode 2024).	10
Kuva 3. NT1-mikrofonin suuntakuvio (Rode 2024).	11
Kuva 4. Äänen eteneminen ilmassa harventumina (rarefaction) sekä tihentyminä (compression) (Everest 2001, 8).	12
Kuva 5. Aallonpituus (engl. wavelength) sekä amplitudi (peak amplitude) (Everest 2001, 10).	13
Kuva 6. Ihmisen kuuloaistin taajuusvasteen vaihtelu (Laaksonen 2006, 29).	16
Kuva 7. Äänen eteneminen vapaassa tilassa (Everest 2001, 85).	18
Kuva 8. Esimerkki äänen diffraktiosta esteen ympäri (Everest 2001, 250).	20
Kuva 9. Äänen heijastuminen pinnasta (Everest 2001, 236).	21
Kuva 10. Eri aineiden ja rakenteiden keskimääräisiä absorptiokertoimia taajuusalueilla (Inkinen ym. 2002, 320).	23
Kuva 11. Havainnollistamiskuva äänen vaimenemisprosessista, kun ääntä heijastavia sekä absorboivia pintoja on kaksi (Everest 2001, 180).	24
Kuva 12. Vaimennusmateriaalin (lasikuitu) paksuuden vaikutus absorptiokykyyn, kun materiaali on kiinnitetty seinään. 1" (tuuma) = 2,54 cm. (Everest 2001, 192.)	26
Kuva 13. Ilmavälin vaikutus lasikuitulevyn absorptiokertoimeen (Everest 2001, 192).	27

Kuva 14. Hahmotelma tilavarauksesta äänityskopille (A = n. 159 cm, B = n. 126 cm, C = n. 250 cm). Mittaviivat eivät ole kuvassa todellisina mittoina.	28
Kuva 15. Aikaisempi äänitystila (puinen vaatekaappi)	29
Kuva 16. Mitattu ja ennustettu äänieristävyys 13 mm paksulla kipsilevyllä. $f_c = 2200$ Hz, jossa äänieristävyys laskee (RIL 2007, 72).	31
Kuva 17. Eri rakennuslevyjen tietoja. $R_w$ = ilmaääneneristysluku, $m'$ = pintamassa, $f_c$ = koinsidenssin rajataajuus, E = kimmomoduuli (RIL 2007, 91).	32
Kuva 18. Mignon-sarana (Tukkimies 2024).	34
Kuva 19. Meluloukun rakenne (SPA 2024).	36
Kuva 20. Äänityskopin malli (oikea seinä sekä vaimennuslevy piilotettuna, vaimennuslevyt maalattu vaalealla. Ovenkahva kuvassa vain hahmotelmana).	45
Kuva 21. Meluansan läpileikkaus.	46
Kuva 22. Akustisen äänityskopin läpileikkaus (kuvassa ovi osana rakennetta. Kiinnikkeitä, saranoita ja kumitiivisteitä ei merkittynä kuvassa).	47

# 1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on tehdä suunnitelma akustisen äänityskopin rakenteesta sekä tutkia äänityskopin vaatimuksia ja ominaisuuksia erityisesti materiaaliteknisestä ja ääniopillisesta näkökulmasta. Työssä pyritään myös löytämään ratkaisut akustisen äänityskopin tärkeimmille vaatimuksille. Nämä tärkeimmät vaatimukset on valittu painoarvotaulukkoa hyödyntäen sekä opinnäytetyön tekijän henkilökohtaista kokemusta äänitystyöstä hyväksi käyttäen.

Työn ajankohtaisuus perustuu opinnäytetyön tekijän tämänhetkisiin toimeentulolähteisiin, jotka ovat ääninäyttely sekä videotuotanto. Molemmat näistä vaativat äänilaadultaan tasokkaita puheäänityksiä, joissa esiintyy mahdollisimman vähän häiriöääniä kuten asunnon aiheuttamaa kaiuntaa, rakennuksen ulkopuolelta ja naapuriasunnoista syntyvää melua sekä haitallisia äänen taajuuskorostumia.

Työllä pyritään saamaan selkeä kuva akustisen äänityskopin rakentamisesta: mitä se vaatii rakennusmateriaaleiltaan, mitkä ovat lopullisen äänitystilan karkeat kustannukset, mitä suunnittelussa tulee ottaa huomioon akustisia ja rakenteellisia ominaisuuksia optimoidessa sekä miten samankaltaisia tiloja on aiemmin rakennettu niin yksilöiden kuin akustiikkaan erikoistuneiden yritysten toimesta.

## 2 Taustatieto

Kun puhutaan akustisesta äänityskopista tai akustisesta tilasta, tarkoitetaan sillä tässä opinnäytetyössä akustisesti vaimennettua ja äänieristettyä laatikkomaista rakennetta, jonka sisällä äänitys tapahtuu ja jonka sisällä itse puhuja ja mikrofoni sijaitsevat. Tässä tapauksessa äänityskopissa suoritetaan vain puheen äänitystä, joten rakenne suunnitellaan mitoiltaan ja akustisilta ominaisuuksiltaan puhtaasti vain kyseistä käyttötarkoitusta varten.

Äänityskopin pääasiallisena tarkoituksena on

- Minimoida kopin ulkopuolisen melun pääsy kopin sisälle, jotta häiritsevät äänet eivät vaikuta lopulliseen äänitystulokseen
- Minimoida kopin sisällä syntyvän puheäänen vuotaminen kopin ulkopuolelle, jotta ajoittainen kovaääninen puhe ei häiritse talon muita asukkaita
- Vaimentaa kopin sisällä seinistä heijastuva puheääni eli puheen jälkikaiunta, jonka poistaminen lopullisesta äänityksestä jälkikäteen olisi haastavaa

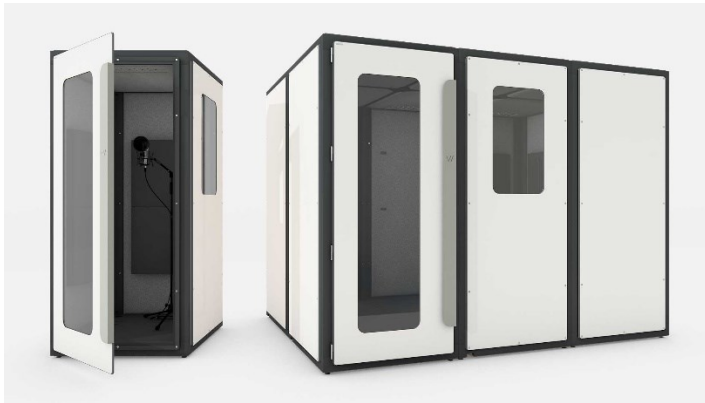
Äänityskopilta vaaditaan kuitenkin myös useita muita ominaisuuksia, jotka on laadittu tärkeysjärjestykseen painoarvotaulukkoa käyttäen. Painoarvotaulukko on opinnäytetyössä liitteessä 1. Jotta tarkasteltava aihe ei kasvaisi opinnäytetyön kannalta liian laajaksi, tärkeimpiä ominaisuuksia valittiin lopulta neljä: akustisen kopin äänieristävyys, jälkikaiun minimointikyky, käytön turvallisuus sekä materiaalikustannukset. Näihin neljään osa-alueeseen pyritään löytämään ratkaisut.

### 2.1 Kuluttajakäyttöön valmistetut kaupalliset ratkaisut

Vastaavia kompakteja akustisia äänitystiloja on tarjolla markkinoilla eri valmistajilta erilaisia käyttötarkoituksia varten. Yhteinen tekijä näillä on usein

äänieristetty rakenne esimerkiksi palaverien tai muiden keskusteluiden yksityisyyden turvaamiseksi sekä melun vähentämiseksi.

Esimerkiksi portugalilainen yhtiö Vicoustic valmistaa modulaarisia äänityskoppeja musiikin tai lauluosuuksien äänitystä, harjoittelua ja miksaamista varten. Tilat on rakennettu äänieristävillä- ja vaimentavilla seinillä, lattialla sekä katolla (Vicoustic 2024). Pienintä 1x1-mallia myydään noin 3400 euron hintaan saksalaisessa Thomann-verkkokaupassa (Thomann 2024a). T.akustik-yhtiö myy rakenteellisesti erilaista mutta vastaavaan käyttötarkoitukseen valmistettua omaa akustista äänitystilaansa noin 2800 euron hintaan (Thomann 2024b).



Kuva 1. VicBooth Ultra-äänityskopit (VicBooth 2024).

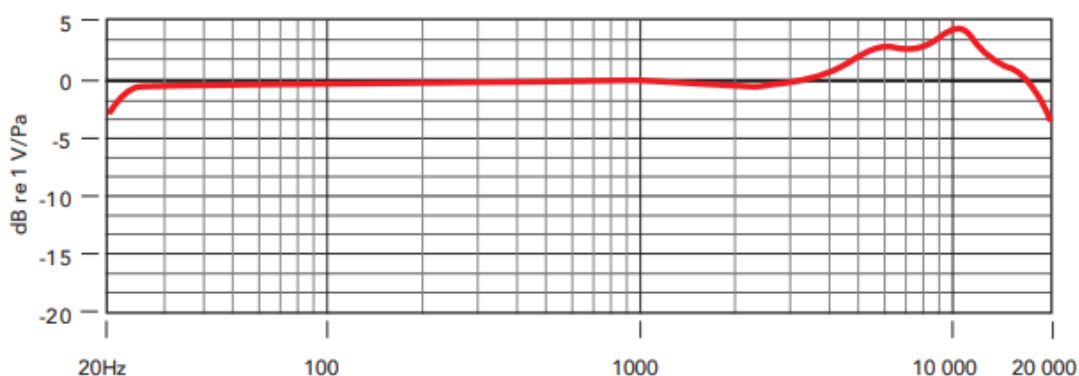
Valmiin akustisen kopin lopullinen hinta on yksi neljästä tärkeimmästä ongelmakohtasta. Korkean hintansa vuoksi valmiita kaupallisia äänitystiloja ei siten käytetä, vaan koppi suunnitellaan itse, jotta lopulliset valmistuskustannukset pysyvät mahdollisimman pieninä.

## 2.2 Käytettävä äänityslaitteisto

Äänityskopin sisällä tapahtuvan äänityksen laatuun vaikuttaa itse kopin rakenteen lisäksi myös käytettävä laitteisto. Äänitys tapahtuu australialaisen RØDE -yhtiön valmistamalla NT1-kondensaattorimikrofonilla. Sen taajuusvaste on välillä 20 Hz – 20 kHz sekä suuntakuvio superherttakuvio (Rode, 2024). Taajuusvasteella tarkoitetaan mikrofonin herkkyyttä äänen taltioimisessa eri

äänentaajuuksilla. Taajuusvasteella on merkitystä äänityksen laadun kannalta, sillä mikrofoni poimii hyötyäänen lisäksi haittaääniä, kuten taustakohinan ja kaiun. (Laaksonen 2006, 242.)

### FREQUENCY RESPONSE

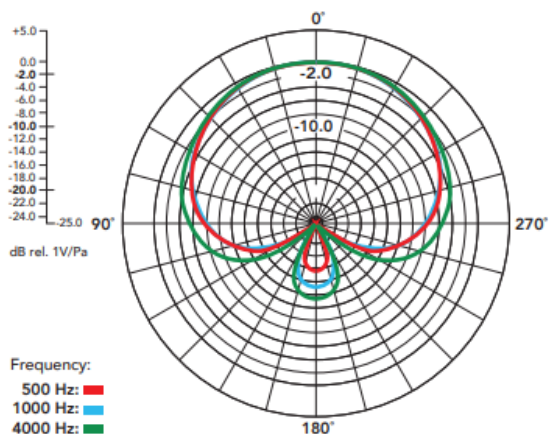


Kuva 2. NT1-mikrofonin taajuusvaste (Rode 2024).

NT1-mikrofonin taajuusvastekuvaajasta voidaan nähdä korkeiden taajuuksien (noin 4kHz – 14kHz) korostus. Tämä aiheuttaa korostuman korkeisiin taajuuksiin kuten puheesta syntyviin S-äänteisiin (jotka sisältävät usein yllättävän paljon diskanttienergiaa) tai taustasuhinaan (Laaksonen 2006, 353–354).

Myös mikrofoniin suuntakuviolla on äänityslaadun kannalta merkitystä. Suuntakuviot on visuaalinen esitys mikrofoniin kyvystä vastaanottaa eri suunnista saapuvaa ääntä, ja vaikka esitystapa on yleensä piirroksissa kaksikulotteinen, on äänen todellinen vastaanottotapa aina kolmiulotteinen. (Laaksonen 2006, 231–232.)

## POLAR PATTERN



Kuva 3. NT1-mikrofonin suuntakuviot (Rode 2024).

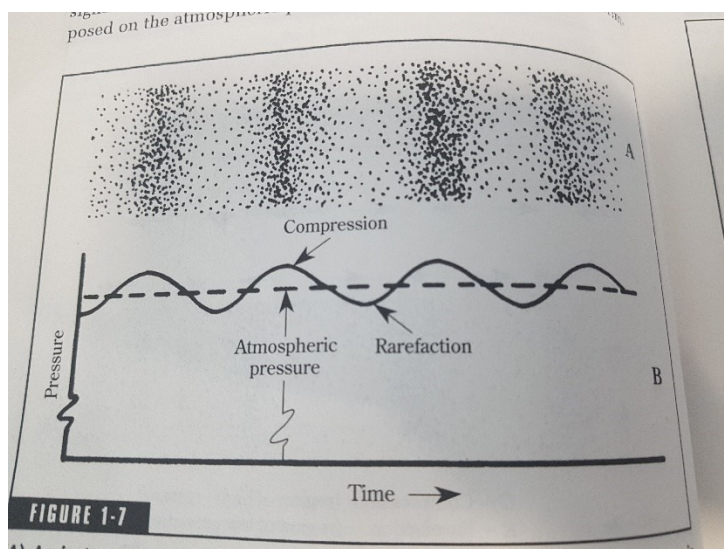
NT1-mikrofonin suuntakuviosta nähdään, että mikrofoni ottaa ääntä niin kutsutulla superherttakuviolla, jolloin mikrofoniin taakse jää pieni kuuluvuusalue, niin kutsuttu takakeila. Tämän vuoksi akustisessa äänityskopissa mikrofoniin takana sijaitsevan seinän tulee olla mahdollisimman hyvin ääntä vaimentava, jotta puheen tuottama ääniaalto ei heijastu viiveellä seinästä mikrofoniin. (Laaksonen 2006, 234.)

Äänitysten digitaaliseen käsittelyyn käytetään saksalaisen Ableton AG-yhtiön kehittämää Ableton Live -ohjelmistoa. Ohjelmisto sisältää kattavat työkalut äänen jälkikäsittelylle ja korjaamiselle. Erityisesti taajuuskorjaimilla voidaan käsiteltävän äänen taajuusjakaumaa muuttaa, jolloin erilaisia vääristymiä kuten matalien tai korkeiden taajuuksien liiallisia korostumia tai puutteita äänityksessä voidaan korjata. (Ableton n.d.)

### 3 Äänen perusteoria

Jotta äänityskopista saadaan rakenteellisesti äänitiivis sekä akustisilta ominaisuuksiltaan halutunlainen, tulee äänen teoreettinen perusta olla selvillä erityisesti niistä osa-alueista, jotka suoraan vaikuttavat äänityskopin toiminnallisuuteen.

Ääni on pitkittäistä aaltomaista liikettä joko ilmassa tai missä tahansa muussa kimmoisassa väliaineessa. Äänen aiheuttaa värähtelevä kappale (toisin sanoen äänilähde), joka saattaa väliaineen hiukkaset liikkeeseen, jolloin kimmoisaan väliaineeseen syntyy tihentymiä (tiheyden kasvu) ja harventumia (tiheyden pieneneminen). Ääni ei siis aiheuta väliaineen liikkumista paikasta toiseen, vaan hiukkasten tasapainoaseman vaihtelua. (Inkinen ym. 2002, 285–288; Everest 2001, 3–8.)



Kuva 4. Äänen eteneminen ilmassa harventumina (rarefaction) sekä tihentyminä (compression) (Everest 2001, 8).

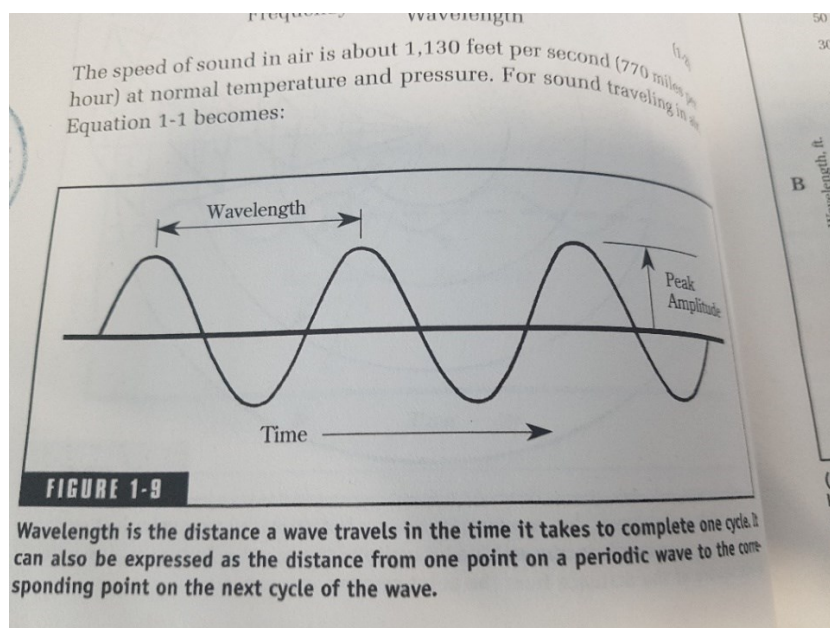
Päivittäin yleisin kokemamme äänen väliaine on ilma, jolla on staattinen ilmanpaine. Tämä ilmanpaine tosin vaihtelee esimerkiksi säätilan mukaan, mutta molekyyli-tason painevärähtelyjen osalta ilmanpaineen pitkäkestoisella vaihtelulla ei ole käytännössä suurta merkitystä. Ilmääni, toiselta nimeltään

akustinen ääni, havaitaan ja syntyy kun tämä staattinen ilmanpaine vaihtelee pienen pieninä liikkeinä. (Laaksonen 2006, 7–6.)

Koska ääni etenee niin kaasuissa, nesteissä kuin kiinteissä väliaineissa, etenee se siten myös esimerkiksi vedessä, lasissa, puussa, teräksessä sekä muissa kiinteissä materiaaleissa. Tämä tulee ottaa huomioon kopin rakenteen akustisia ominaisuuksia suunniteltaessa. (Everest 2001, 5.)

### 3.1 Äänen taajuus

Äänen taajuudella on vastaavuus kuultavaan äänen korkeuteen. Mitä nopeammin äänen jaksot toistuvat, sitä korkeampi on äänen taajuus. Matalia taajuuksia kutsutaan bassoksi ja korkeita diskantiksi. Mittayksikkönä taajuudelle käytetään hertsiä (Hz), jossa yksi hertsi vastaa yhtä värähdysjaksoa sekunnissa. (Laaksonen 2006, 7; Everest 2001, 10–11.)



Kuva 5. Aallonpituus (engl. wavelength) sekä amplitudi (peak amplitude) (Everest 2001, 10).

Nuoren henkilön korva sekä kuuloaisti kattavat normaalisti taajuusalueen arviolta välillä 20–20 000 Hz. Kuuloalueen väliä kutsutaan myös nimellä audiotajuusalue (Laaksonen 2006, 7). Kun aallonpituus on tunnettu, äänen taajuus voidaan laskea kaavalla

$$Taajuus = \frac{\text{Äänen nopeus}}{\text{Aallonpituus}}$$

jossa äänen nopeutena käytetään usein ilman äänen nopeutta, joka on kuivassa ilmassa ja noin +20 celsiusasteen lämpötilassa noin 344 metriä sekunnissa. Sadan hertsin taajuinen ääniaalto on pituudeltaan noin 3,4 metriä ja yhden kilohertsin taajuudella noin 34 senttimetriä. (Laaksonen 2006, 7–13.)

Vaihtoehtoisesti taajuus voidaan laskea Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (RIL 2007, 25) mukaan kaavalla

$$f = \frac{n}{T} \quad (1)$$

jossa

f (Hz) on äänen taajuus

n on värähtelyjen määrä

T (s) on aikajakso, jolloin värähtelyt havaitaan

### 3.2 Desibeli, äänen painetaso ja äänen intensiteetti

Usein väärin ymmärretty käsite on desibeli, sillä termiä käytetään erityisesti audioalalla varsin laajasti ja monissa yhteyksissä. Desibeli ei mittaa fyysistä itsenäistä suuretta, vaan se kuvaa suhdetta kahden (toisiinsa vertailtavissa olevan) saman yksikköisen arvon välillä. (Laaksonen 2006, 24–25.)

Tämän lisäksi se on sidoksissa kussakin tilanteessa valittuun vertailutasoon. Desibeliarvolla voidaan siten ilmaista sekä äänen teho- ja tasoeroja. Kaikille mittaustavoille yhteistä on desibelin logaritmisuus.

Äänen painetaso on yleisesti äänen teknillisessä työssä kaikkein mitattavin arvo käytännöllisestä näkökulmasta (Everest 2001, 28). Mittayksikkönä siinä käytetään pascalia (Pa) eli paineen mittayksikköä. Kuulokynnyksen raja on arviolta  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ . Äänen painetasoa käytetään äänen voimakkuuden ilmaisussa, kun voimakkuus halutaan ilmaista käyttämällä äänenpainetta. Ilmoitetut tulokset siis kertovat, kuinka monta desibeliä mitattava ääni on kuulokynnystä voimakkaampi. (Laaksonen 2006, 25–30.)

Äänen painetaso  $L_p$  voidaan laskea Inkisen ym. (2002, 295) mukaan johtamalla yhtälöstä

$$L_I = L_p = 10\text{dB} \times \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20\text{dB} \times \lg \frac{p}{p_0} \quad (2)$$

jossa

$p_0$  on 20 mikropascalia (kuulokynnyksen tehollinen äänenpaine)

$p^2 = I$  (äänenpaineen neliö on verrannollinen äänen intensiteettiin)

Äänen intensiteetti eli pinnan läpi kohtisuoraan siirtyvä energia voidaan laskea kaavalla

$$I = \frac{P}{A}$$

jossa

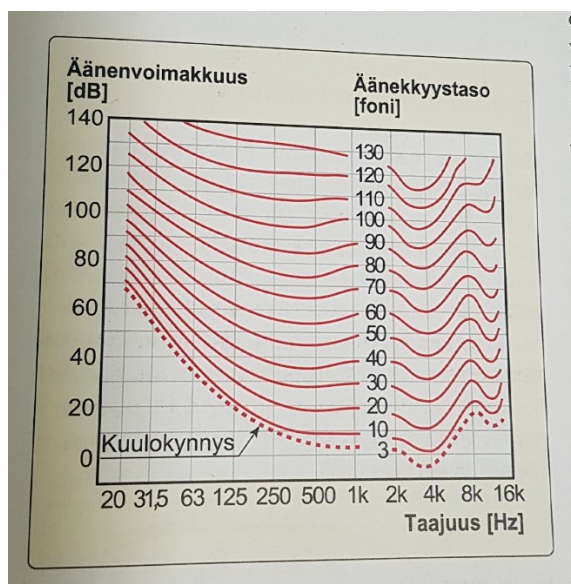
P on teho (W)

A on pinta-ala ( $m^2$ )

### 3.3 Kuulon taajuusvaste

Ihmisen kuulokynnys ei ole kaikilla taajuuksilla samalla tasolla, vaan se on riippuvainen äänen korkeudesta. Kuuloaisti on herkkä noin 500 Hz – 7 kHz

taajuusalueella, jonka ylä- ja alapuolella olevat taajuudet korvamme rekisteröivät heikommin. (Laaksonen 2006, 28–29.)



Kuva 6. Ihmisen kuuloaistin taajuusvasteen vaihtelu (Laaksonen 2006, 29).

Kuuloaistimme siis havaitsevat hyvin tarkasti taajuuksia, joita esiintyy luonnollisissa äänissä. Kuuloaistin herkin taajuusvaste on välillä 2,5 kHz – 3 kHz, joka johtuu korvakäytävän resonoinnista vastaavalla taajuusalueella. Korvan herkkyydellä on myös vastaavuus luonnolliseen akustiseen spektrijakaumaan: luonnossa sähköisesti vahvistamattomien äänien voimakkuus painottuu 1 kHz taajuudelle, joka on myös ihmiskorvan kuulovälin keskikohta. 1 kHz molemmin puolin äänten voimakkuus laskee. Luonnollisten äänien niin sanottu akustinen spektrijakauma mukailee siis Gaussin käyrää.

Omalta osaltaan tämä kuuloaistin ominaisuus aiheuttaa akustisesta rakenteesta mahdollisesti vuotavan äänen kuulemisen paremmin, mikäli ääni sijoittuu taajuusvasteeltaan tähän kriittiselle 2,5 kHz – 3 kHz alueelle. (Laaksonen 2006, 28–29; Everest 2001, 41–45.)

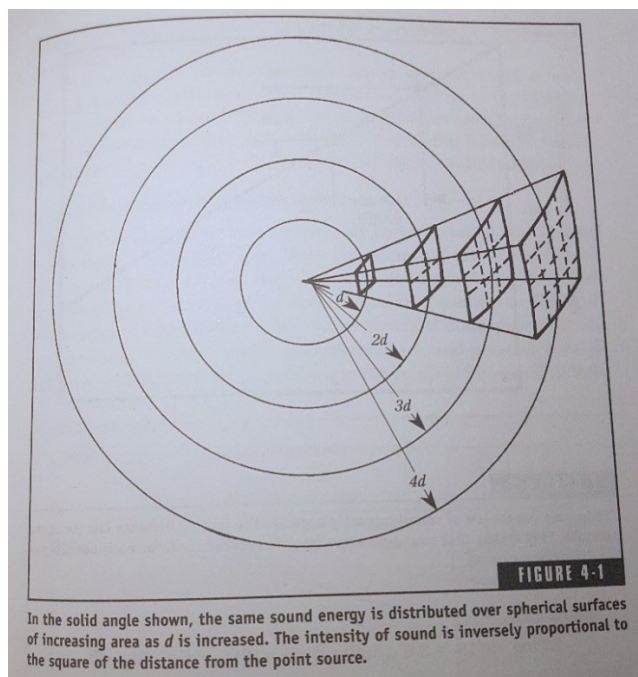
## 4 Äänen eteneminen, heijastuminen ja vaimentuminen

Äänen vaimentuminen ja heijastuminen sekä osaltaan myös eteneminen ovat ilmiöinä keskeisessä osassa akustisen äänityskopin rakenteellista- sekä materiaaliteknistä osa-aluetta suunniteltaessa. Kaikki kolme ovat löyhästi kytköksissä toisiinsa, ja jokaiseen näistä kolmesta tulee kiinnittää erityistä huomiota.

Nämä ilmiöt sekä niiden aiheuttamat ongelmatilanteet voivat olla erityisesti isoja tiloja suunniteltaessa monimutkaisia, sillä äänen luonteen vuoksi ongelmatilanteissa esimerkiksi heijastavia pintoja tai niiden yhdistelmiä voi olla satoja tai tuhansia. Monimutkaisuutta lisää ääniteorian osa-alue ”psykoakustiikka”, joka tarkastelee ääntä ei niinkään fysikaalisten ominaisuuksien pohjalta vaan äänen kuulemisena ja sen kokemisena ihmiskorvissa- ja aivoissa, erityisesti korvan rakenteen ja toimivuuden pohjalta. Esimerkiksi tasainen ääni aiheuttaa ajan mittaa siihen tottumisen eli adaptaation. Toisaalta mikäli ääni on lujaa tai äkkinäistä, se voi olla psyykkisesti hyvinkin rasittavaa ja haitallista. (Korpinen & Koivumäki 2006; Everest 2001, 41, 83.)

### 4.1 Äänen eteneminen

Vapaassa ja esteettömässä tilassa ääni etenee heijastumattomana ja suoraviivaisesti. Ääni etenee myös pallomaisesti kaikkiin suuntiin, mikäli äänen lähde ei aiheuta sille esteitä. Vapaasta tilasta puhuttaessa ei kuitenkaan tarkoiteta avaruuden kaltaista tyhjötä; äänihän tarvitsee poikkeuksetta väliaineen, jossa kulkea. Vapaa tila on ilmatila, jossa ääni ei teoreettisesti kohtaa matkallaan esteitä. Ääni kuitenkin vaimenee myös kulkiessaan ilmassa. Tästä ilmiöstä on kerrottu lisää myöhempanä. (Laaksonen 2006, 14; Everest 2001, 5.)



Kuva 7. Äänen eteneminen vapaassa tilassa (Everest 2001, 85).

Koska pistelähteinen ääni etenee pallomaisesti kaikkiin suuntiin, jakautuu ääniteho sitä suuremmalle pinta-alalla mitä kauempana tarkastelupiste sijaitsee äänen lähteestä. Kuvasta 7 voidaan havaita, että etäisyyden kasvaessa mitasta  $d$  mittaan  $2d$  ääniaallon pinta-ala kasvaa nelinkertaiseksi (ja vastaavasti intensiteetti neljäsosaan), mitasta  $2d$  mittaan  $3d$  yhdeksänkertaiseksi ja niin edelleen. Äänen intensiteetti on täten kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. (RIL 2007, 43; Everest 2001, 85.)

Jos sekä äänen painetaso  $L_1$  että etäisyys  $d_1$  on tunnettu, voidaan äänen painetaso  $L_2$  etäisyydellä  $d_2$  laskea Everestin (2001, 85) mukaan kaavalla

$$L_2 = L_1 - 20 \log \frac{d_2}{d_1} \quad (3)$$

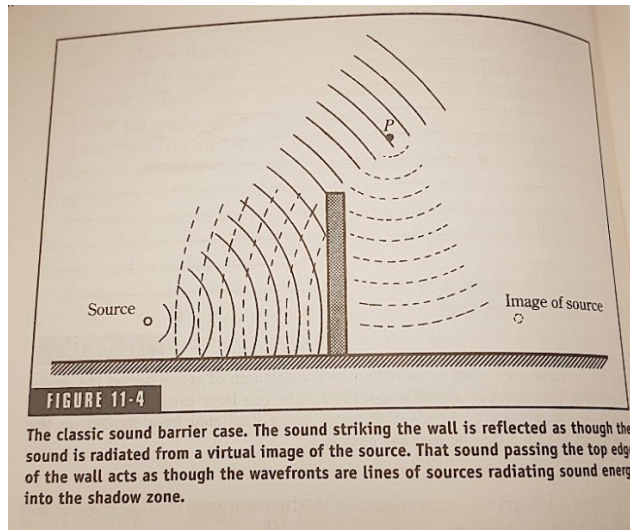
On huomioitavaa, että kaavan tulokset ovat äänen painetasoja teoreettisessa vapaassa tilassa pistemäisellä lähteellä. Kaavaa voidaan käyttää painetasojen arviointiin, mutta todelliset arvot ovat erilaisia tilan ominaisuuksien mukaan.

#### 4.1.1 Äänen eteneminen ilmassa sekä äänen diffraktio

Sekä korkeat että matalat taajuudet etenevät pallomaisesti avaruudessa (mikäli äänilähde ei aiheuta tälle esteitä). Kuitenkin esteitä kohdatessaan ääni etenee eri tavoin eri taajuuksilla. Korkeat taajuudet etenevät esteen kohdatessaan suoraviivaisesti ja pysähtyvät vähäisempiin esteisiin sitä paremmin, mitä korkeampi on äänen taajuus ja mitä massiivisempi este on rakenteeltaan. Tämän ilmiön aiheuttaa osaltaan äänen diffraktio, joka tarkoittaa äänen suunnan muutosta äänen ohittaessa esteen. (Laaksonen 2006,14; Everest 2001, 246.)

Siinä missä korkeat taajuudet etenevät suoraviivaisesti, matalat taajuudet eli bassoäänet sen sijaan jatkavat etenemistä pallomaisesti myös esteen kohdatessaan ja kiertävät esimerkiksi mutkien, kulmien ja nurkkien ympäri. Basson ympärisäteilevyyden vuoksi esimerkiksi kaukaa ja esteiden takaa kuultu musiikki on usein diskantiltaan puuttuvaa mutta hyvin tummaa ja bassovahvaa. (Laaksonen 2006,14; Everest 2001, 245.)

Esteen diffraktiokyky riippuu sen akustisesta koosta. Tällä tarkoitetaan esteen koon suhdetta esteeseen osuvan ääniaallon aallonpituuteen. Mitä suurempi este on akustisesti ääniaallon pituuteen verrattuna, sitä voimakkaampaa on äänen diffraktio esteen ympäri erityisesti matalilla äänentaajuuksilla. (Everest 2001, 245.)

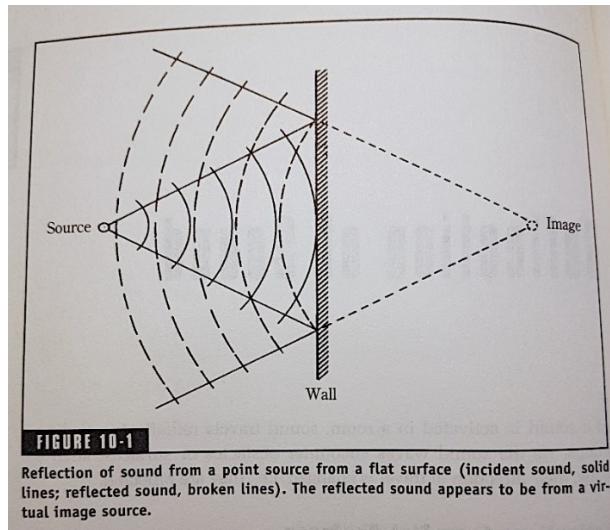


Kuva 8. Esimerkki äänen diffraktiosta esteen ympäri (Everest 2001, 250).

Normaalisti ääni etenee suoraviivaisesti ilmassa, mutta myös ilman ominaisuudet itsessään voivat vaikuttaa ääniaaltojen suuntaan. Ääni etenee kylmässä ilmassa hitaammin kuin lämpimässä. Jos ääniaallon ylä- ja alapuolella sijaitsevassa ilmassa on lämpötilaero, on ääniaallolla myös nopeusero sen ylä- ja alaosassa. Tämä aiheuttaa ääniaallon suunnan muutoksen, jolloin esimerkiksi ulkoääni voi kallistua kohti maanpintaa tai taivasta ja vaikuttaa merkittävästi äänen kuultavaan etäisyyteen. Ääni voi myös muuttaa suuntaansa, mikäli se siirtyy väliaineesta toiseen; tällöin puhutaan diffraktion sijaan refraktiosta. (Everest 2001, 246–250.)

#### 4.2 Äänen heijastuminen

Kun ääniaalto, joka osuu esteeseen tai pintaan (esimerkiksi seinään) ja vaihtaa sen vuoksi kulkusuuntaansa, puhutaan äänen heijastumisesta (Everest 2001, 235). Heijastuva ääni on kulmaltaan ja suunnaltaan ikään kuin esteen tai pinnan ”takaa” syntyvä ääniaalto, jossa kuvitteellinen äänilähde on samalla etäisyydellä todellisen äänilähteen kanssa.



Kuva 9. Äänen heijastuminen pinnasta (Everest 2001, 236).

Äänen heijastumiskyky kappaleesta tai pinnasta perustuu sen massaan sekä niin sanottuun akustiseen heijastavuuteen (pinnan kovuus). Äänen heijastumista tapahtuu kappaleista, jotka ovat heijastumisen aiheuttavan äänen aallonpituuteen verrattain tarpeeksi suuria. Esimerkiksi iso kirja voi heijastaa ääntä noin 10 kHz taajuudella (jonka aallonpituus on noin 2,5 cm), kun taas matalataajuinen ääni esimerkiksi 20 Hz taajuudella menee kirjasta ohi/läpi. (Everest 2001, 236.)

#### 4.3 Jälkikaiku

Äänen heijastuminen on suoraan kytköksissä toiseen ilmiöön, jälkikaikuun. Äänityskopin rakenteessa jälkikaiulla ja sen eliminoinnilla on keskeinen merkitys kopin toimivuuteen ja käytettävyyteen.

Jälkikaiulla tarkoitetaan sitä aikaa, joka äänellä kestää vaimentua 60 desibeliä alkuperäisen äänilähteen sammumisen jälkeen. 60 desibelin muutos tässä tapauksessa tarkoittaa äänen intensiteetin muutosta yhteen miljoonasosaan tai äänen painetason muutosta tuhannesosaan. (Everest 2001, 135.)

Esteistä tai seinistä kimpoava ääniaalto hajaantuu ja menettää tietyn määrän energiaa (riippuen heijastavista pinnoista) jokaisessa törmäyksessä. Myös ilman kyky absorboida ääntä vaikuttaa jälkikaiun kestoon. (Everest 2001, 134.)

Jälkikaiun kesto tilassa voidaan määritellä eri mittaustavoin tai laskea Inkisen ym. (2002, 310) mukaan Sabineen kaavalla

$$T = 0,16 \frac{V}{A} \quad (4)$$

jossa

T on jälkikaiun aika sekunteina

V on tilan tai huoneen tilavuus kuutiometreinä

A on tilan tai huoneen kokonaisabsorptioala

Kokonaisabsorptioala A lasketaan Inkisen ym. (2002, 310) mukaan seuraavalla kaavalla (tällöin tulee tuntea absorboivien pintojen pinta-alat  $A_i$  sekä jokaisen pinnan absorptiokerroin  $\alpha_i$ )

$$A = A_1\alpha_1 + A_2\alpha_2 + \dots + A_n\alpha_n \quad (5)$$

Keskimääräisiä absorptiokertoimia eri materiaaleille sekä eri taajuusalueille on lueteltu Inkisen ym. (2002, 320) toimesta taulukkona:

Taulukko 8.8 Keskimääräisiä absorptiokertoimia eri taajuuksilla

Aine, rakenne	taajuus (Hz)					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
akustiikkalevy, ilmaralla	0,76	0,93	0,83	0,99	0,99	0,94
akustiikkalevy, kiinni betonissa	0,14	0,20	0,76	0,79	0,58	0,37
betoniseinä, maalattu	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
betoniseinä, rappamaton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
ikkunalasi	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
ikkunaverhot, kevyet	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
ikkunaverhot, raskaat	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
kipsilevy	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
mineraalivilla, 40...70 kg/m <sup>3</sup> , paksuus 25 mm	0,03	0,15	0,50	0,80	0,85	0,80
kuten edellä, paksuus 50 mm	0,15	0,50	0,80	0,88	0,95	0,95
puulattia	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
vaneri, paksuus 6 mm, 50 mm rimoitus	0,18	0,28	0,12	0,07	0,04	0,04
kuten edellä, ilmaväli täytetty mineraalivillalla	0,57	0,37	0,13	0,07	0,06	0,03
tiiliseinä, rapattu	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05

Kuva 10. Eri aineiden ja rakenteiden keskimääräisiä absorptiokertoimia taajuusalueilla (Inkinen ym. 2002, 320).

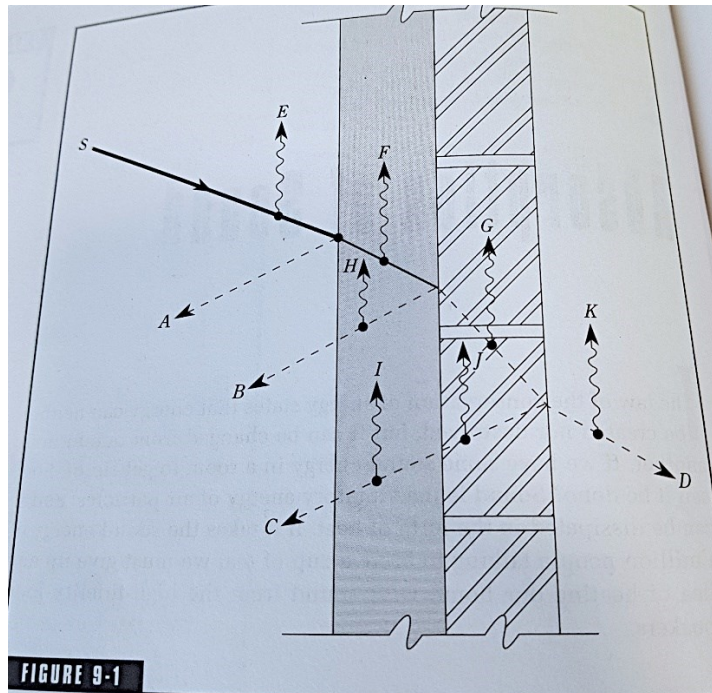
Jälkikaiun ominaisuudet vaikuttavat kuultavaan äänen laatuun merkittävästi.

Mikäli alkuperäisen äänen lisäksi syntyvä jälkikaiku kuullaan maksimissaan 35 millisekunnin viiveellä, kykenee kuuloaisti yhdistämään äänet yhdeksi koetuksi ääneksi. Tämä puolestaan lisää koetun äänen voimakkuutta. (Inkinen ym. 2002, 309.)

#### 4.4 Äänen vaimentuminen ja absorptio

Äänen vaimentuminen ilmiönä on jälkikaiun sekä äänen etenemisen ohella keskeinen käsite akustista tilaa suunniteltaessa. Tässä työssä sanat ”vaimentuminen” ja ”absorptio” tarkoittavat samaa ilmiötä. Energian säilymislaki määrää, että energiaa ei voi syntyä eikä kadota, vaan kokonaisenergia pysyy aina vakiona. Täten ajan myötä vaimenevan äänen tulee siirtyä johonkin toiseen energiamuotoon. Ääniaallon kohdatessa este tai pinta, osa ääniaallon energiasta muuttuu kitkan vuoksi lämmöksi riippuen esteen tai pinnan materiaalista.

Everest (2001, 180) sisällyttää kirjaansa havainnollistavan kuvan äänen liike-energian muuttumisesta lämmöksi sekä vaimenemisprosessin monimutkaisuudesta.



Kuva 11. Havainnollistamiskuva äänen vaimenemisprosessista, kun ääntä heijastavia sekä absorboivia pintoja on kaksi (Everest 2001, 180).

Yllä olevasta kuvasta nähdään vasemmalta saapuvan ääniaallon (s) käyttäytyminen kun ääniaalto osuu kahteen eri materiaaliin: harmaalla merkittyyn akustisesti hyvin absorboivaan materiaaliin sekä sen takana sijaitsevaan betoniseinään. Kohdissa A, B ja C ääni heijastuu rajapinnoista, kohdissa F, H, I, J, ja G osa äänen liike-energiasta siirtyy lämpöhäviönä pintojen materiaaliin. Ääni myös taittuu siirtyessään väliaineesta toiseen. (Everest 2001, 179–181.)

Kuvasta myös havaitaan (pisteet E ja K), että ilma itsessään aiheuttaa etenevälle äänelle lämpöhäviön kitkan muodossa. Tämä on merkittävä energiahäviön ja äänen vaimenemisen syy erityisesti suurissa tiloissa (kuten auditorioissa) ja 1 kilohertsiä korkeammilla taajuuksilla (Everest 2001, 203). Tässä työssä ilman äänen absorptiokyky ei ole merkittävä huomion kohde äänitystilän pienen tilavuuden vuoksi.

Pinnan tai materiaalin kykyä absorboida ääntä kuvataan absorptiokertoimella (yksikkö Sabin). Absorptiokerroin on välillä 0–1, ja se kuvaa kertoimena pintaan tai materiaaliin osuvasta äänestä absorboituvaa määrää (esimerkiksi materiaali tai pinta kertoimella 0,55 absorboi 55 % äänestä). Avoin ikkuna ei heijasta mitään siihen saapuvasta äänestä takaisin, jolloin sen absorptiokerroin olisi 1. Absorptiokerroin on riippuvainen sekä äänen tulokulmasta että äänen taajuudesta. (Everest 2001, 181.)

#### 4.4.1 Absorboivat materiaalit

Ääniaalto saa osuessaan ääntä absorboivaan esteeseen tai materiaaliin sen rakenteelliset osat (esimerkiksi kuidut) värähtelemään. Tämä värähtely puolestaan johtaa virtausvastusten vuoksi äänienergian muuttumisen lämmöksi (Inkinen ym. 2002, 300). Mitä syvemmmälle ääniaalto etenee esteessä ja mitä enemmän se saa materiaalin rakennetta värähtelemään, sitä enemmän se täten menettää energiaa.

Tämän vuoksi huokoisia ja kuituisia materiaaleja käytetään usein (esimerkiksi levyinä tai paneeleina), kun tavoitteena on absorboida mahdollisimman suuri määrä ääntä. Huokoisissa rakenteissa kuitujen tiheydellä on suuri merkitys absorbointikykyyn; ääniaalto ei pääse tunkeutumaan liian tiheästi pakattuihin kuituihin, kun taas rakenteessa, jossa kuidut ovat liian harvakseltaan kasassa ääniaallon energia ei kykene tuottamaan materiaalissa tarpeellista värähtelyä ja kitkaa.

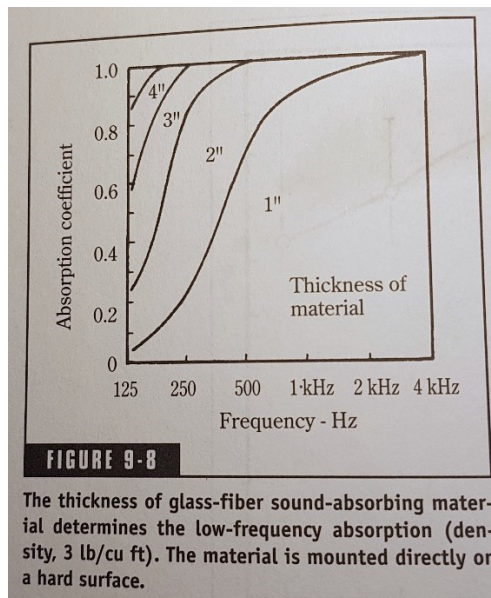
Kelvollisia ja hyvin ääntä absorboivia materiaaleja on siis useita, mutta yleisesti käytettyjä ovat esimerkiksi puuvillaan, selluloosaan tai mineraalivillaan perustuvat materiaalit/rakenteet. Myös avosoluisia muoveja kuten polyuretaania sekä melamiini-hartsivahtomuovia käytetään laajasti akustiikkaratkaisuisissa, etenkin kuluttajakäyttöön tarkoitetuissa akustiikkatuotteissa. (Thomann 2024c; Everest 2001, 192–193).

Esteen absorbointikyky perustuu siis materiaalin kykyyn vangita ääniaallon liike sisäänsä, jolloin pinnan rakenteen muuttaminen väärällä tavalla voi vaikuttaa

merkittävästi sen absorbointikykyyn. Esimerkiksi pieniä pinnallisia koloja sisältävä betoniseinä voi vaimentaa ääntä kelvollisesti, mutta jos seinä maalataan pinnan tekstuuria muuttavalla maalilla, ei ääni pääse tunkeutumaan seinään eikä täten myöskään absorboitumaan. (Everest 2001, 187–188.)

#### 4.4.2 Paksuuden ja ilmavälin vaikutus esteen absorbointikykyyn

Huokoiset vaimennusmateriaalit absorboivat ääntä vaihtelevalla menestyksellä riippuen vaimennusmateriaalin paksuudesta. Vaimennuskyvyn parannusta huokoisia materiaaleja käytettäessä esiintyy kuitenkin Everestin (2001, 190–191) mukaan pääasiassa matalilla taajuuksilla.

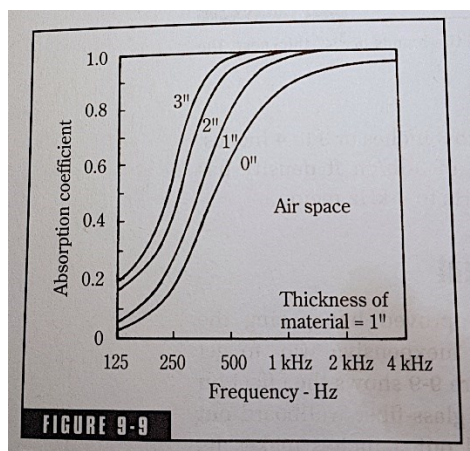


Kuva 12. Vaimennusmateriaalin (lasikuitu) paksuuden vaikutus absorptiokykyyn, kun materiaali on kiinnitetty seinään. 1" (tuuma) = 2,54 cm. (Everest 2001, 192.)

Kuvaajasta havaitaan, että absorptiokerroin kasvaa pääasiassa noin 500 hertsissä ja sitä matalammilla taajuuksilla, kun materiaalin paksuutta lisätään. Absorptiokerroin kasvaa myös suhteessa enemmän, kun materiaalin paksuutta kasvatetaan tuumasta kahteen tuumaan kuin sitä seuraavilla paksuuksilla. (Everest 2001, 190–193.)

Huokoisia materiaaleja käytettäessä absorbointi tapahtuu tehokkaimmin taajuuksilla, joiden aallonpituus on materiaalin paksuuteen nähden vähintään nelinkertainen. Esimerkiksi sadan hertsin taajuudella aallonneljännes on täten 85 senttimetriä, joka on useissa käytännön tilanteissa suhteettoman paksu kerros vaimennusmateriaalia. (RIL 2007, 14.)

Huokoisia vaimennustasoja käytettäessä seinän tai muun pinnan edessä, matalien bassotaajuuksien absorbointia voidaan kuitenkin parantaa lisäämällä esteen ja pinnan välille ilmapäli. (RIL 2007, 14; Everest 2001, 191.)



Kuva 13. Ilmapälin vaikutus lasikuitulevyn absorptiokertoimeen (Everest 2001, 192).

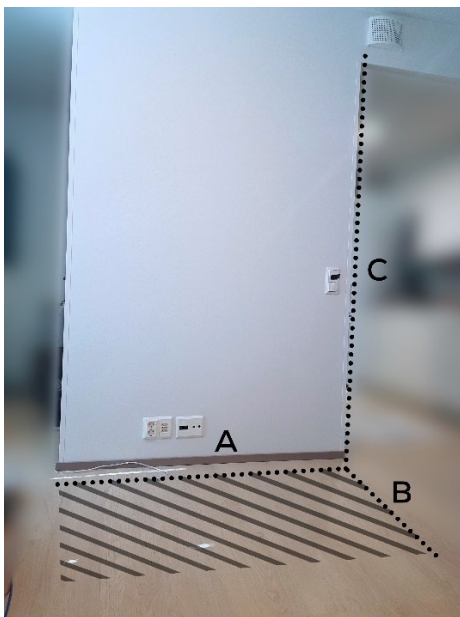
Mittavin etu ilmapäilillä saavutetaan siirryttäessä ilmapäilittömästä ratkaisusta kahden tuuman (n. 5 cm) ilmapäliin. Tässä tapauksessa viiden sentin ilmapäli lisäisi kuitenkin vaimentavalle materiaalille merkittävän tilantarpeen kopissa.

## 5 Rakennesuunnitelma ja materiaalivalinta

Akustisen äänityskopin rakennesuunnitelmassa tulee ottaa huomioon sekä kopilta vaaditut ja halutut ominaisuudet että sijainnin ja ympäristön asettamat rajoitukset. Rakenne tulee tehdä tarpeeksi isoksi mutta tilavaraukseen sopivaksi, jotta kopin sisällä tuotettavassa puheessa ei ilmene matalien taajuuksien liiallisia korostumia.

### 5.1 Fyysiset mitat

Äänitystila rajoittuu asunnon sisällä olevan alkoviseinän edustalle. Tilavaraus akustisella äänityskopilla on mitoiltaan noin 159 cm \* 126 cm \* 250 cm. Alkoviseinään on asennettuna pistorasiat, valokatkaisija sekä Ethernet-portit. Valokatkaisija on seinän oikeassa reunassa, jolloin sen käyttöä ei rajoita merkittävästi äänityskopin sijainti seinän edustalla. Pistorasiat sekä Ethernet-rasiat ovat pääasiassa koskemattomia, jolloin johdotuksille sekä pistokkeille voidaan antaa kuuden senttimetrin tilavara seinän ja kopin välille (vastaavat rasiat löytyvät myös muualta asunnosta).



Kuva 14. Hahmotelma tilavarauksesta äänityskopille (A = n. 159 cm, B = n. 126 cm, C = n. 250 cm). Mittaviivat eivät ole kuvassa todellisina mittoina.

Mittahahmotelmien, sisäisen tilantarpeen sekä seinärakenteen arvion perusteella kaapin lopullisiksi ulkomitoiksi riittävät (kuvan 14 mittamerkintöinä)  $A = 120 \text{ cm}$ ,  $B = 110 \text{ cm}$  sekä  $C = 200 \text{ cm}$ .

Tilavaruksen paikalla aikaisemmin ollut vaatekaappi, joka on muokattu väliaikaiseksi äänitystilaksi, on mitoiltaan  $90 \text{ cm} * 55 \text{ cm} * 184 \text{ cm}$ . Tämä on tilavuudeltaan liian pieni, ja aiheuttaa liikkumisvaikeuksien lisäksi puheäänien matalien taajuuksien selkeän korostuman lopullisessa äänityksessä liian ohuen vaimennusmateriaalin vuoksi.



Kuva 15. Aikaisempi äänitystila (puinen vaatekaappi)

Aikaisemman äänitystilan käyttökokemuksen perusteella haastavimmat ongelmakohdat ovat oven ilmatiiveyden varmistaminen sekä hiljaisen ilmanvaihdon järjestäminen kopin sisälle.

## 5.2 Äänityskopin rakenteen materiaalivalinta

Materiaalivalinta vaikuttaa ratkaisevasti äänitystilan toimivuuteen sekä haluttujen akustisten ominaisuuksien saavuttamiseen. Akustisen äänityskopin materiaalivalinta tehdään punnitsemalla useampaa ominaisuutta ja valitsemalla

kaikilta ominaisuuksiltaan yhtenäisesti järkevin ratkaisu. Huomioon otettavia ominaisuuksia materiaalilla ovat muun muassa

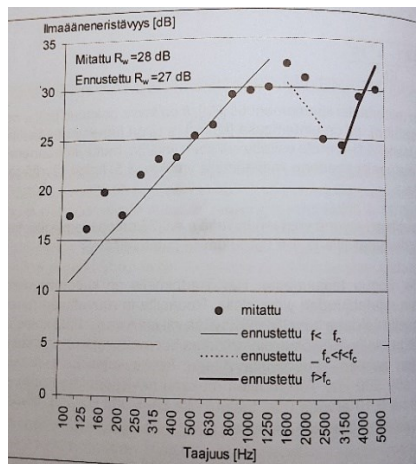
- Materiaalin/rakenneosan ilmaäänieristys  $R_w$  (dB)
- Pintamassa ( $kg/m^2$ )
- Kimmomoduuli eli jäykkyys  $E$  (GPa)
- Koinsidenssin rajataajuus  $f_c$  (Hz)
- Hinta
- Saatavuus
- Työstettävyys

Rakenteen materiaaliksi valitaan mahdollisuuksien mukaan sama materiaali niin seiniin, kattoon, oveen kuin lattiaan, jotta tekniset arvot pysyvät yhtenäisinä ja esimerkiksi ilmaäänieristyksen arviointi on helpompaa. Yksinkertaisin ratkaisu on valmistaa äänitystä rakennuslevyistä, jotka ovat jo ennalta mittatiedoiltaan lähellä lopullisia arvoja ja joista on lähdetietona saatavilla akustisia (esim. ilmaäänieristysluku) sekä fyysisiä (esim. pintamassa) tietoja.

Välttämällä rakenteen tarpeetonta työstämistä esimerkiksi leikkaamalla, minimoidaan myös huomaamattomien virheiden kuten ilmarakojen syntymistä. Äänitiiviissä tilassa pienetkin kolot ja raot esimerkiksi ovirakenteessa tai liitoskohdissa voivat pilata muuten toimivan eristyksen. Merkittävä vaikutus ilmatiiviydellä on suurilla sekä keskisuurilla taajuuksilla. (Everest 2001, 167; RIL 2007, 86.)

Ilmaäänieristyksen peruseriaate on, että mitä painavampi seinä on ja mitä pienemmän taivutusjäykkyyden se omaa, sen paremmin se eristää ilman välityksellä kulkevaa ääntä (Everest 2001, 168; RIL 2007, 72). Eristyskykyyn vaikuttaa siten suoraan materiaalin pintamassa ( $kg/m^2$ ). Ohut rakennuslevy (paksuus välillä 0,4 mm – 25 mm (RIL (2007, 70)) mukaan) ei kuitenkaan todellisuudessa seuraa lineaarista vastaavuutta pintamassan ja äänieristyksen välillä (eli massalakia), vaan kokee merkittävän äänieristyksen vähenemisen tietyllä taajuusalueella.

Kun levyssä ja ilmassa liikkuvien ääniaaltojen vaiheet ovat samat, levy ei estä lähes ollenkaan ääniaallon etenemistä. Tätä ilmiötä kutsutaan koinsidenssiksi ja äänen taajuutta, jossa ääniaalto läpäisee rakennuslevyn parhaiten koinsidenssin rajataajuudeksi ( $f_c$ ). Taajuutta kasvatettaessa koinsidenssi-ilmiö heikkenee ja äänieristävyys palautuu kohti massalain kuvaajaa. Koinssidenssiä ilmenee kuitenkin aina, kun taajuus on rajataajuutta korkeampi. (RIL 2007, 71–73.)



Kuva 16. Mitattu ja ennustettu äänieristävyys 13 mm paksulla kipsilevyllä.  $f_c = 2200$  Hz, jossa äänieristävyys laskee (RIL 2007, 72).

Koinsidenssin rajataajuus halutaan siis mahdollisimman korkeaksi.

Rajataajuuden tulisi kuitenkin sijaita vähintään 2,5 kHz taajuudella, jotta koinsidenssin kuoppa ei heikennä ilmaäänieristykseen arvoa (RIL 2007, 73).

Rakennusinsinöörien Liitto on kirjassaan (RIL 2007, 91) listannut useita erityyppisiä rakennuslevyjä sekä niiden akustisia tietoja:

	$m'$ kg/m <sup>2</sup>	$f_c$ Hz	E GPa	$R_w$ dB
<b>Kipsikartonki (Knauf)</b>				
Saneeraus 6 mm	5,9	5 000	5,4	28
Tuulensuoja 9 mm	7,6	3 150	4,8	28
Normaali 13 mm	8,8	2 500	3,0	28
Erikoiskova 13 mm	11,7	2 500	4,5	29
Lattia 15 mm	16,8	2 000	7,8	31
<b>Selluloosaselementti (Minerit)</b>				
Tuulensuoja 4 mm	7,7	5 000	15	30
Luja A 8 mm	9,8	3 150	9,6	30
Tuulensuoja 8 mm	13,2	3 150	15	31
Heavy duty 8 mm	14,7	3 150	16	33
Pastel 8 mm	14,8	3 150	15	32
Heavy duty 10 mm	18,4	2 500	15	32
<b>Puupohjaiset</b>				
Lastulevy 11 mm	7,0	4 000	2,9	29
MDF 12 mm	9,2	2 500	6,3	28
Vaneri 15 mm	10,4	1 600	11	26
MDF 19 mm	13,8	1 600	4,8	28
Lastulevy 22 mm	13,9	2 000	3,4	29
Vaneri 21 mm	15,0	1 250	11	28
<b>Puukuitu (Leijona)</b>				
Tuulensuojalevy 12 mm	3,1	8 000	0,3	23
Tuulensuojalevy 25 mm	8,0	4 000	0,2	30
<b>Sementti (Aquapanel)</b>				
Sisä ID 13 mm	14,0	2 000	7,9	30
Ulko OD 13 mm	15,6	2 500	3,9	33
<b>Teräs</b>				
2 mm	15,6	8 000	213	36
4 mm	31,2	3 150	213	40
<b>Muut monikomponenttilevyt</b>				
MultiCo 8 mm	8,4	4 000	7,6	30
Kalsiumsilikaatti 10 mm (Master)	10,1	3 150	7,4	29
UniCo 12,5 mm	10,5	3 150	2,3	32
Puukipsi lattia 18 mm (Sasmox)	22,4	2 000	7,6	33

Kuva 17. Eri rakennuslevyjen tietoja.  $R_w$  = ilmaääneneristysluku,  $m'$  = pintamassa,  $f_c$  = koinsidenssin rajataajuus, E = kimmomoduuli (RIL 2007, 91).

Kuvasta nähdään, että suurin osa listatuista rakennuslevyistä omaa varsin korkean rajataajuuden arvon. Rajataajuuden alarajaksi valitaan 2,5 kHz, jolloin valintaprosessia jatketaan tämän alarajan täyttävien materiaalien suhteen.

Yllä mainitun kuvan mukaan ilmaäänieristys yleisimmillä puu- sekä kipsipohjaisilla rakennuslevyillä liikkuu välillä 23–33 dB. Kriteereinä on kuitenkin äänieristyskyvyn lisäksi muun muassa saatavuus, hinta, paino sekä jäykkyys. Ominaisuuksien summaltaan 11 mm lastulevy sekä 12 mm MDF-levy omaavat hyvän ilmaäänieristysarvon, hyvän saatavuuden, alhaisen hinnan sekä suhteellisen kevyen painon. Materiaalin paino sekä kyky sietää räsitusta korostuu erityisesti ovirakenteessa.

Myös 6 mm saneerauslevy (kipsikartonki) omaa kevyen painon sekä hyvän äänieristyskyvyn, tosin heikomman kimmomoduulin. Opinnäytetyön tekijällä ei

ole kokemusta kipsilevyn työstämisestä, toisin kuin puun työstöstä, jolloin puurakenteiden hahmottelu ja suunnittelu on helpompaa. Kahden- ja neljän millin teräslevyt ovat painoltaan, paksuudeltaan sekä työstettävyydeltään käytännön ratkaisussa kelvottomia, joten rakennemateriaalin valinta rajataan puuhun ja kipsiin. Alustavana materiaalivalintana on siten 11 mm lastulevy seinille, katolle, lattialle ja ovelle. Äänityskopin tukirakenteena sekä kiinnityspintana seinille ja ovelle toimii 48 millimetriä leveä ja paksu puukehikko. Kehikon sisäosa täytetään vaimennusmateriaalilla, ja kiinnityssaumat tiivistetään silikonilla. Mallikuva sekä läpileikkaus kopista on työn liitteissä 2 ja 3.

### 5.3 Äänityskopin vaimennusmateriaali

Puiset tiiviit rakennuslevyt eivät itsessään juurikaan vaimenna eli absorboi erityisesti korkeita ääniaaltoja huokoisiin materiaaleihin verrattuna.

Poikkeuksena on matalat ääniaallot, joiden vaimentuminen erilaisissa rakennuslevyissä perustuu levyn resonointiin. Tietyllä taajuudella rakennuslevy resonoi ja absorboi ääniaallon energiaa esimerkiksi puun kuiduissa kitkan aiheuttamana lämpöhäviönä. (Puuinfo 2020; Everest 2001, 205–207.)

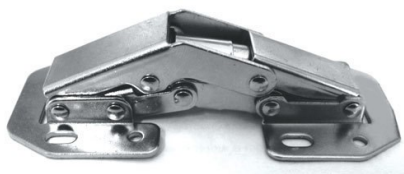
Yleisiä sekä laajasti käytettyjä absorptio- ja eristeratkaisuja ovat mineraalivillat kuten kivi- ja lasivillat (Ruukki 2022; Everest 2001, 188–190). Näiden kahden käsittelyssä tulee ottaa huomioon kuidun pölyävyys sekä mahdollinen ihon ja hengitysteiden ärsytys työstettäessä, asennettaessa ja käsitellessä. Äänitystila on myös kooltaan varsin pieni eikä absorptiokerrosta peitetä kiinteällä tai iskunkestävällä suojalla. Siksi absorptiomateriaaliksi valitaan turvallisempi puukuitu, joka on helposti työstettävää, miellyttävämpää käsitellä sekä omaa hyvät äänenvaimennuksen ominaisuudet kuitumaisen rakenteensa ja korkean tiheydensä vuoksi (Hunton 2022; Cardinal Acoustics n.d).

Puukuitu ei tarvitse suojakerrosta, mutta ulkonäön ja lisäsuojan vuoksi vaimennuslevyt voidaan päällystää venyvällä ja hengittävällä kankaalla. Väärä kangasmateriaali voi merkittävästi heikentää paneelin vaimennuskykyä. (Whisper Walls 2024.)

Teoriaosuudessa mainitun paksuuden ja absorptiokyvyn yhteyden vuoksi puukuitulevyn paksuudeksi valitaan 50 mm, jotta matalien taajuuksien absorptiokyky paranee. Tätä paksummat levyt aiheuttavat liian suuren tilavarauksen äänityskopin sisällä. Koko kopin sisäpinta-ala (lattiaa, ovea sekä tukikehikkoa lukuun ottamatta) peitetään puukuitupaneeleilla ilman ilmapäliä. Paneelit voidaan kiinnittää liimaamalla tai ruuvaamalla, jolloin kopin purkaminen ja muokkaus on helpompaa.

#### 5.4 Äänityskopin ovirakenne

Koska äänityskopin rakenne on varsin pieni ja kopista siirrytään sekä ulos että sisään useita kertoja, perinteinen laakaovi tuottaa hankaluuksia käytettävyydeltään, äänieristyskyvyltään sekä mitoitukseltaan. Akustisessa äänityskopissa toimii siten myös ovena 11 mm lastulevy, joka kiinnitetään rakenteen kehikkoon kolmella pinta-asennettavalla Mignon-saranalla. Mignon-sarana ei vaadi upotuksia tai erikoisporauksia ja kiinnittyy sekä rakenteen kehikkoon että oveen puuruuveilla. Oveen kiinnitetään molemminpuoliset kahvat. Oven sisäpintaan kiinnitetään seinien tapaan 50 mm paksu puukuituinen absorptiolevy (sisämittojen leveys sekä korkeus noin 105 cm ja 190 cm).



Kuva 18. Mignon-sarana (Tukkimies 2024).

Akustisesti toimiva ratkaisu oven ilmatiivistämiseksi on muovisten tai kumisten ovitiivisteiden käyttö oven ja karmin välisissä kontaktikohdissa (Everest 2001, 175–176). Koko karmi tiivistetään kumisilla ovitiivisteillä, ja lattiaan asennetaan kynnyksen kumitiivisteellä. Oven kiinni pysyminen varmistetaan usealla magneettisalvalla, tai vaihtoehtoisesti kumiset tiivisteet korvaavalla magneettisella ovitiivisteellä. Esimerkiksi portugalilainen Vicoustic käyttää

kaupallisessa äänityskopissaan magneettista ratkaisua oven sulkemiseen ja ilmatiivystykseen (Thomann 2021).

### 5.5 Vaihtoehtoinen seinärakenne

Äänityskopin tukikehikon vuoksi seinien paksuus ja materiaali on vaihdettavissa. Mikäli yksikerroksisessa seinärakenteessa ilmenee puitteita ilmaäänieristyksessä, voidaan seinärakenne korvata niin sanotulla kevyellä sandwich-rakenteella, jolla tarkoitetaan kahdesta levystä sekä niiden välissä olevasta joustavasta ydinaineesta koostuvaa kokonaisuutta. Huomioitavaa kuitenkin on, että kahdesta rakennuslevystä koostuva sandwich-rakenne on ilmaäänieristyskyvyltään huonompi kuin yhtä raskas yksilevyinen rakenne (RIL 2007, 81–82).

Toinen vastaava 11 mm lastulevykerros sijoitettaisiin tässä tapauksessa absorptiomateriaalina toimivan 50 mm paksun puukuidun päälle. Puukuitu toimisi täten lastulevyjä yhdistävänä ydinmateriaalina. Koska kaksikerroksisessa rakenteessa kopin sisälle jäävä pintamateriaali olisi kova lastulevy, tulisi toinen lastulevy päällystää kopin sisällä vielä vaimentavalla materiaalilla jälkikaiun ehkäisemiseksi. Paksuudeltaan vaimennuslevy tulee tässä tapauksessa olla ohuempi, jotta kopin sisätilavuudesta ei tule ahdas. Sandwich-rakenne ei ota huomioon oven äänieristyskykyä, joten myös oven äänieristystä tulisi kasvattaa kerrostamalla tai materiaalivaihdolla.

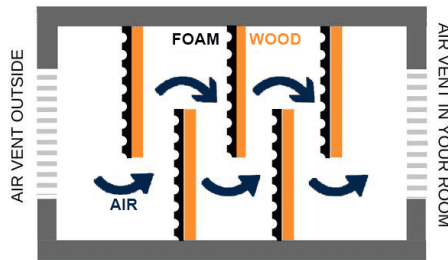
### 5.6 Ilmanvaihto

Ilmanvaihto akustisen kopin sisällä parantaa kopin käyttömukavuutta, mahdollistaa pidemmät äänitysajat sekä lisää kopin käyttöturvallisuutta merkittävästi. Haasteena ilmanvaihdolle on sen hiljaisuus, äänivuodon ehkäisy sekä tilarajoitus.

Kompaktina vaihtoehtona on ns. ”meluansan” (engl. ”sound maze”) rakentaminen ilmanvaihtokanavan eteen, jolloin ilmanvaihdon kautta kulkevaa

ääntä voidaan absorboida (SPA 2024). Tätä menetelmään käytetään myös Turun ammattikorkeakoulun akustiikkalaboratoriossa johtojen läpivientien äänieristyksessä (Hakala, J., keskustelu 5.3.2024).

## SOUND MAZE



Kuva 19. Meluloukun rakenne (SPA 2024).

Meluloukussa ilma kulkee laatikkorakenteen läpi, jonka sisällä on ääntä absorboivaa materiaalia sekä seinäesteitä (läpileikkauskuva liitteessä 3). Puhallus voidaan suorittaa esimerkiksi hiljaisella kanavapuhaltimella (tai muulla 100 mm halkaisijan putkeen sopivalla puhaltimella) sekä meluloukun sisäänottoaukkoon kiinnitettävällä joustavalla 100 mm halkaisijan ilmanvaihtoputkella, jotta mahdolliset tärinät eivät siirry kopin rakenteeseen. Ilmanvaihtoputken vuoksi puhaltimen sijainti voidaan valita melko vapaasti riippuen putken pituudesta. Meluloukku saa olla tilavarauksen vuoksi maksimissaan 30 cm korkea. Ilmanvaihdon sisäänottoaukko sijaitsee äänityskopin oikealla puolella, poistoaukko kopin päällä.

Sokkelon ulkokuori sekä sisäseinät voidaan valmistaa 11 mm paksusta lastulevystä, ja sisäpinta vaimentaa 30 mm paksulla (leikatulla) puukuidulla. Kaikki meluloukun sekä äänityskopin väliset kontaktipinnat tulee tehdä äänitiiviiksi silikonisaumalla. Vastaava meluloukkurakenne sijoitetaan myös kopin päälle poistoilman vaimennusta varten.

## 5.7 Muut huomioitavat seikat

Mikrofonin sekä kuulokkeiden johtojen läpivienti ilmatiiviisti voidaan toteuttaa lastulevyyn ruuveilla asennettavilla naaraspuolisilla XLR- sekä instrumenttiliittimillä (Hakala, J., keskustelu 5.3.2024), jotka ilmatiivistetään liitospinnoiltaan. Liittimien urospään liitännät kopin ulkopuolella juotetaan jatkokaapeliin. Vaihtoehtoisesti kaapelit voidaan viedä katossa sijaitsevan poistoilma-aukon ja meluloukun kautta ulos.

Valaistus kopin sisällä voidaan suorittaa paristokäyttöisellä LED-valolla tai kiinteästi asennettavalla valonauhalla. Mahdolliset valon virtajohdot tulee vastaavasti viedä sisään/ulos meluloukun läpi.

Kopin ulkopohjaan kiinnitetään 22 mm korkeat ja 125 mm leveät laudat kopin lattian taipumisen ehkäisemiseksi ja kantokyvyn parantamiseksi. Äänityskopin lattialle voidaan asettaa käyttömukavuuden parantamiseksi matto.

Paksuudesta, materiaalista ja lateksi/kumipohjasta riippuen matto absorboi erityisesti korkeita taajuuksia arviolta välillä 500 Hz – 40 kHz. Pohjustamaton matto vaimentaa paremmin matalia taajuuksia, kun taas lateksipohjainen matto vaimentaa paremmin korkeita taajuuksia. (Everest 2001, 201–202.)

Akustinen äänityskoppi voidaan pintakäsitellä esimerkiksi maalaamalla tai lakkaamalla. Koska tilavaraus sijaitsee valkoisten seinien edustalla, valkoinen pintamaali äänityskopilla sopii ulkonäöllisesti ympäröivään tilaan.

## 5.8 Tekniset laskelmat

Äänityskopin hyvin pienen tilavuuden ja suuren vaimennuskykynsä vuoksi akustiset laskelmat ovat vain suuntaa antavia arvioita. Laskelmissa on käytetty absorptiosuhteena  $\alpha$  0,22 paljaalle puulattialle (JCWA n.d) sekä puukuidulle kivivillan absorptiosuhdetta 0,7 joka on tiheydeltään keskimääräisesti kivivillan tasolla (Ekovilla 2020; Paroc 2022).

Tilan jälkikaiunta-aika saadaan opinnäytetyön kappaleessa 4.3 mainitusta Sabine kaavasta, jolloin akustisen äänityskopin jälkikaiunta-aika  $T$  taajuudella 250 Hz on

$$T = 0,16 \frac{V}{A = A_1\alpha_1 + A_2\alpha_2 + \dots + A_n\alpha_n} = 0,16 \frac{1,01m \times 1,1m \times 2m}{8,79 m^2 - Sab} = 0,04 s$$

Rakenteen yhteisäänieristys, jossa rakenne koostuu monesta komponentista kuten seinästä ja ovesta, voidaan laskea Suomen Rakennusinsinöörien Liiton (RIL 2007, 102–103) mukaan seuraavalla kaavalla. Kaavassa ei ole otettu huomioon ilmanvaihtokanavan meluansan vaikutusta, sillä vaimennin on rakenteeltaan monimutkainen ja käytännön ääneneristyskyvyltään vaikeasti arvioitava.

$$R_{yhteis} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_i S_i}{\sum_i S_i 10^{-R_i/10}} \right] \quad (6)$$

jossa

$S_i$  on pinta – ala rakenteella  $i$  neliömetreinä

$R_i$  on rakenteen  $i$  ennustettu tai mitattu ääneneristävyys desibeleinä

jolloin

$$R_{yhteis} = 10 \log_{10} \left[ \frac{2 \times (1,2m \times 2m) + 2 \times (1,1m \times 2m) + 2 \times (1,1m \times 1,2m)}{(1,2m \times 2m) \times 10^{-29dB/10} + \dots + (1,1m \times 1,2m) \times 10^{-29dB/10}} \right]$$

$$= 29,51 dB$$

Ilmanvaihtokanavan meluansa voi vähentää kokonaisääneneristystä merkittävästi riippuen sen äänenvaimennuskyvystä. Puukuituiset vaimennuslevyt eristävät hieman korkeita taajuuksia, tosin puukuitulevyt eivät peitä koko äänityskopin sisäpinta-alaa, joten vaikutus ei ole merkittävä. Everest (2001, 168–169) mainitsee kirjassaan kivivillan eristävän noin 1–4 dB, riippuen taajuudesta ja kivivillan tiheydestä.

Pienikokoisten ja suljettujen rakenteiden kykyä alentaa äänitasoa, joka syntyy kopin sisällä normaalivoimakkuudella puhutusta äänestä (A) kuvataan myös niin sanotulla puheäänivaimennuksella  $D_{S,A}$ . Se määrittämiseksi on luotu standardi ISO 23351-1, joka ohjeistaa äänitehotason mittauksen standardin ISO 3741 pohjalta. (Turku AMK n.d.)

### 5.9 Hinta-arvio

Akustisen äänityskopin lopullinen kustannushinta rakennusmateriaaleiltaan on arviolta noin 330–400 euroa riippuen valitusta ilmanvaihdon puhaltimesta sekä raakamateriaalien valitusta jälleenmyyjästä. Kustannukset on pyritty pitämään mahdollisimman matalina punnitsemalla jälleenmyyjien valikoimaa sekä tuotehintaa. Hinta-arviossa ei ole otettu huomioon käytettäviä työvälineitä.

Arvioitu lopullinen kustannushinta on täten merkittävästi pienempi kuin vastaavien kaupallisten äänitystilojen. Hinta-laatusuhdetta arvioidessa on kuitenkin huomioitava kaupallisten ratkaisujen viimeistelytaso sekä lisäominaisuudet kuten ikkunat sekä todellinen mitattu äänieristävyys.

## 6 Yhteenveto

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja suunnitella akustisen äänityskopin rakennetta ja materiaaliteknistä puolta sekä pohtia ratkaisuja kopin vaatimukseen. Tavoitteena oli myös hyödyntää aikaisempaa henkilökohtaista kokemusta äänityskopeista mahdollisten ongelmien ratkaisussa. Työssä käytettiin tavoitteiden saavuttamiseksi sekä kirjallisia lähteitä ääneen ja akustiseen suunnitteluun liittyen että henkilöhaastattelua Turun ammattikorkeakoulun akustiikkalaboratorion henkilökunnan kanssa.

Opinnäytetyö pohjustaa rakenne- ja materiaalisuunnitelmaa teoriaosuudella, jossa käydään läpi tarpeellinen tieto äänestä ja sen peruskäsitteistä. Teoriaosuudessa painotettiin erityisesti niitä aiheita ja ilmiöitä, jotka suoraan liittyvät pienessä tilassa suoritettavaan äänen tallennukseen. Teoriaosuus rajattiin suurempien kokonaisuuksien ja perustiedon käsittelyyn, jolloin työn painotuksena oli itse pohdinta ja suunnittelu.

Opinnäytetyö antoi paljon arvokasta tietoa akustisen äänitystilan suunnitteluun, erityisesti materiaalitekniseltä näkökulmaltaan äänieristystä ja äänen vaimennusta varten. Akustiikan periaatteiden soveltaminen käytännössä on ilman tarpeellista tietoa haastavaa, sillä ”maalaisjärjellä” tehdyt päätelmät eivät aina vastaa todellisia ilmiöitä. Työ onnistui luomaan kuvan äänityskopin vaatimuksista sekä niiden ratkaisusta käytännön rajoitukset huomioon ottaen.

Vaikka akustisen äänityskopin ominaisuuksia kuten ilmaäänieristystä voidaan arvioida, saadaan todelliset arvot ja toimivuus selville vasta koekäytössä käytännön mittauksien avulla. Erityisesti meluansan eristyskyky sekä oven tiiveyden varmistus ovat rakenteessa mahdollisena heikkona kohtana. Rakenteen keskeinen ominaisuus on ilmatiheys, joten rakennusvaiheessa mahdollisesti syntyviä huomaamattomia ilmarakoja sekä muita ongelmakohtia akustiikassa tai fyysisessä rakenteessa tulee aktiivisesti ratkaista ja korjata niiden ilmetessä.

## Lähteet

Ableton n.d. Ableton Live. Viitattu 10.4.2024. <https://www.ableton.com/en/live/>

Cardinal Acoustics. n.d. Why Wood Fiber Is The Best Choice For Acoustical Panels. Viitattu 11.05.2024. <https://www.cardinalacoustics.com/post/why-wood-fiber-is-the-best-choice-for-acoustical-panels#:~:text=It%20may%20seem%20counter%2Dintuitive,materials%20available%20to%20control%20acoustics.>

Ekovilla 2020. Tuoteseloste / Ekovillalevy. Viitattu 11.5.2024. [https://docs.keskofiles.com/f/btt/ASSET\\_PDF\\_24477361](https://docs.keskofiles.com/f/btt/ASSET_PDF_24477361)

Everest, F. 2001. Master Handbook of Acoustics. Fourth Edition. New York: McGraw-Hill

Hakala, J. 2024. Keskustelu. Turun ammattikorkeakoulun tutkimusinsinööri Hakala Jarkon kanssa keskusteli 5.3.2024 opinnäytetyön tekijä Santtu Jalonen.

Hunton 2022. Nativo Puukuitueriste: Levyeriste. Asennusohje. Viitattu 11.05.2024. [https://docs.keskofiles.com/f/btt/ASSET\\_PDF\\_30176294](https://docs.keskofiles.com/f/btt/ASSET_PDF_30176294)

Inkinen, P.; Manninen, R.; Tuohi, J. 2022. Momentti 2 Insinöörifysiikka. 2–4 painos. Keuruu: Otava.

JCWA n.d. Absorption coefficients of common building materials and finishes. Viitattu 12.05.2024. <https://www.acoustic-supplies.com/absorption-coefficient-chart/>

Korpinen, P.; Koivumäki, A. 2006. Psykoakustiikka. Viitattu 24.4.2024. [https://webpages.tuni.fi/aanipaa/psyko\\_1.htm](https://webpages.tuni.fi/aanipaa/psyko_1.htm)

Laaksonen, J. 2006. Äänityön kivijalka. Helsinki: Idemco Oy, Riffi-julkaisut.

Paroc 2022. Kivivillan käsittely- ja asennusohje. Viitattu 21.5.2024. [https://docs.keskofiles.com/f/btt/ASSET\\_PDF\\_31585323](https://docs.keskofiles.com/f/btt/ASSET_PDF_31585323)

Puuinfo 2020. Puutieto, ääniteknisiä ominaisuuksia. Viitattu 11.5.2024. <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/aaniteknisia-ominaisuuksia/>

RIL Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. 2007. RIL 243-1-2007 Rakennusten akustinen suunnittelu, akustiikan perusteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Rode 2024. NT1 Studio Condenser Microphone. Viitattu 9.4.2024

[https://edge.rode.com//pdf/products/71/NT1\\_DS\\_V05.pdf](https://edge.rode.com//pdf/products/71/NT1_DS_V05.pdf)

Ruukki 2022. Ruukin ääniympäristöratkaisu. Viitattu 11.05.2024:

<https://www.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/load-bearing-sheets/sound-environment/ruukki->

[\\_%C3%A4%C3%A4niymp%C3%A4rist%C3%B6ratkaisu\\_suunnitteluohjeet\\_11\\_2022.pdf?sfvrsn=7638078308683400000](https://www.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/load-bearing-sheets/sound-environment/ruukki-%C3%A4%C3%A4niymp%C3%A4rist%C3%B6ratkaisu_suunnitteluohjeet_11_2022.pdf?sfvrsn=7638078308683400000)

SPA Soundproofing Products Australia 2024. Soundproofing Air Vents. Viitattu

19.05.2024. <https://www.soundproofingproducts.com.au/soundproofing-air-vents/>

Thomann 2021. Vicoustic VicBooth Ultra 2x2 White Mate. Viitattu 15.5.2024.

[https://www.thomann.de/gb/vicoustic\\_vicbooth\\_ultra\\_2x2\\_white\\_mate.htm](https://www.thomann.de/gb/vicoustic_vicbooth_ultra_2x2_white_mate.htm)

Thomann 2024a. Vicoustic VicBooth Ultra 1x1 Black Matte. Viitattu 11.04.2024.

[https://www.thomann.de/fi/vicoustic\\_vicbooth\\_ultra\\_1x1\\_black\\_matte.htm?glp=1&gad\\_source=1](https://www.thomann.de/fi/vicoustic_vicbooth_ultra_1x1_black_matte.htm?glp=1&gad_source=1)

Thomann 2024b. t.akustik Isolation Booth. Viitattu 11.04.2024

[https://www.thomann.de/fi/t.akustik\\_isolation\\_booth.htm?glp=1&gad\\_source=1](https://www.thomann.de/fi/t.akustik_isolation_booth.htm?glp=1&gad_source=1)

Thomann 2024c. t.akustik WAS-7 Melamine GR. Viitattu 29.4.2024

[https://www.thomann.de/fi/the\\_t.akustik\\_was\\_7\\_basotect\\_gray.htm](https://www.thomann.de/fi/the_t.akustik_was_7_basotect_gray.htm)

Tukkimies 2024. Mignon-sarana. Viitattu 21.05.2024.

<https://www.tukkimies.fi/verkkokauppa/MIGNON-sarana-p68305731>

Turku AMK n.d. Akustiikkalaboratorio. Toimistokalusteiden ja puhelinkoppien puheäänenvaimennus. Viitattu 23.05.2024

<https://akustiikka.turkuamk.fi/puheaanenvaimennus/>

Vicbooth 2024. Vicbooth Ultra. Viitattu 11.04.2024.

<https://vicbooth.vicoustic.com/ultra>

Vicoustic 2024. VicBooth Ultra. Viitattu 09.04.2024.

<https://vicoustic.com/product/vicboothultra?vicboothultrapreconfigurations=Configuration%20B&vicboothultrasizes=2x2&vicboothcolors=Black%20Matte>

Vidaxl 2024. VidaXL 3-Door Wardrobe 118x50x171.5 cm Pine Panama Range.

Viitattu 4.5.2024. <https://www.vidaxl.co.uk/e/vidaxl-3-door-wardrobe-118x50x171.5-cm-pine-panama-range/8719883682303.html>

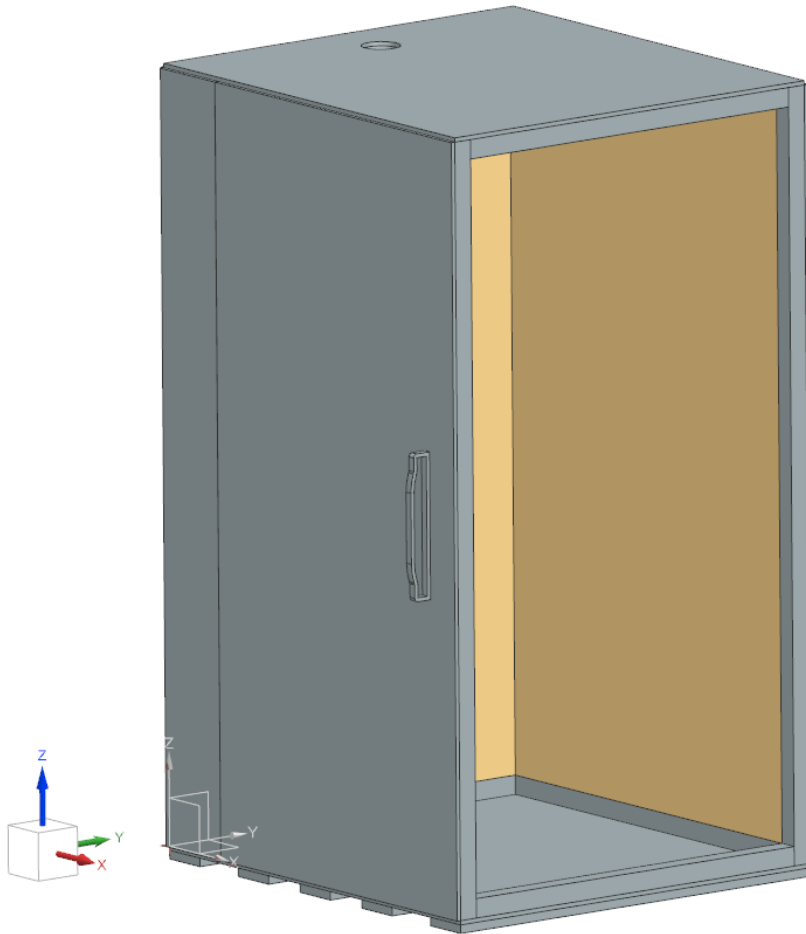
Whisper Walls 2024. Best Acoustic Wall Panels for 2024. Viitattu 13.5.2024.

<https://whisperwalls.com/fabrics/acoustic-wall-panels/>

## Äänityskopin ominaisuuksien painoarvotaulukko

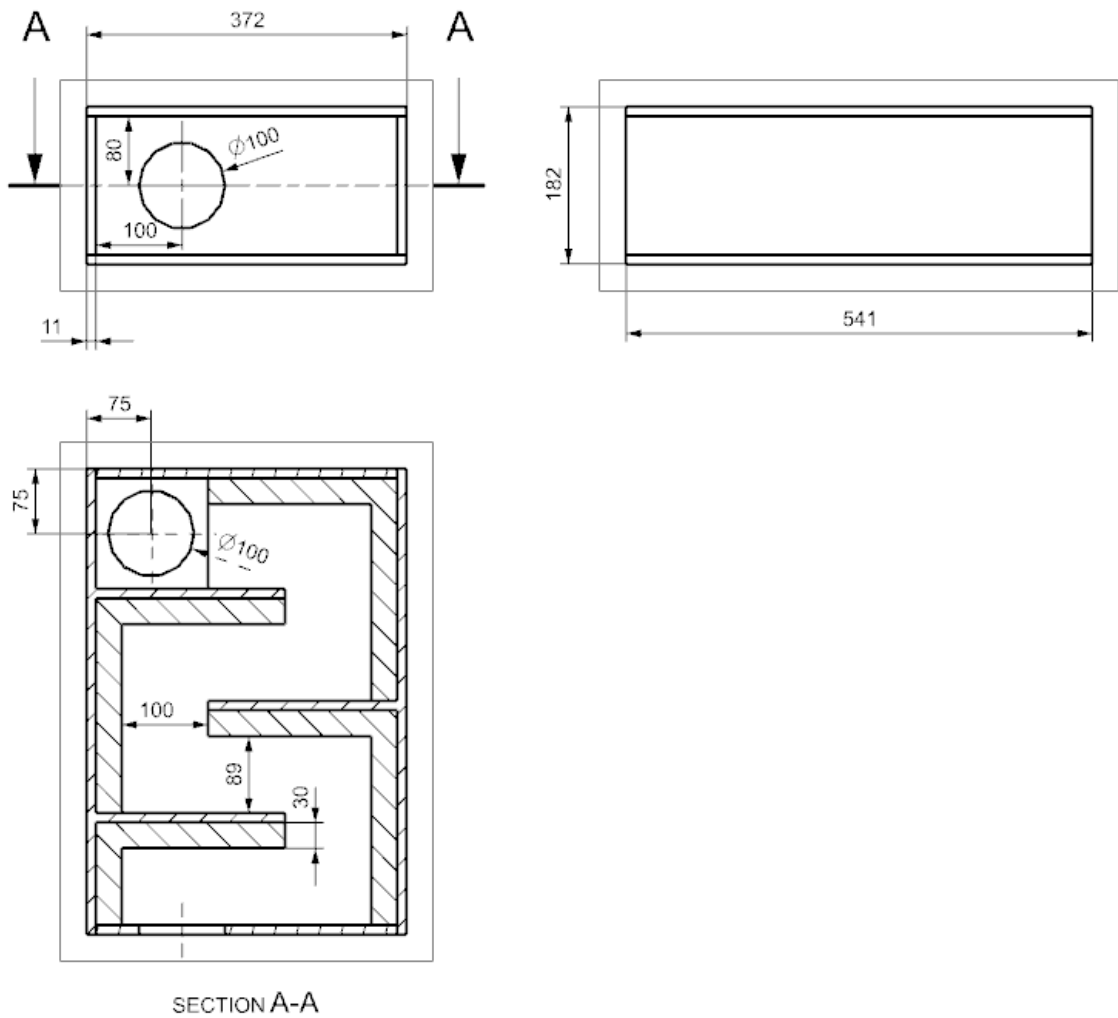
Ominaisuus	Painoarvo 1 - 5 (1= vähäinen, 5= tärkeä)	Lisätieto
Äänieristävyys	5	Äänityskopin tärkein ominaisuus kaiun minimoinnin sekä turvallisuuden lisäksi. Rakenne ei saa vuotaa ääntä sisältä ulos eikä ulkoääni päästä äänitystilan sisälle.
Turvallisuus	5	Äänityskopin käytön turvallisuus on tärkeä ominaisuus. Tilan tulee olla rakenteeltaan kestävä sekä sen sisältä poistuminen nopeaa ja helppoa (esimerkiksi ongelmien ilmetessä ilmanvaihdossa).
Kaiun minimointi	5	Äänityskopin sisätilan tulee absorboida mahdollisimman paljon kopin sisällä syntyvää haittaaääntä, jotta lopullinen äänityslaatu ei kärsi.
Hinta	4	Kaupallisia äänityskoppeja myydään kuluttajakäyttöön, tosin varsin suurella hinnalla. Siksi kopin kustannusten tulee olla kohtuulliset ja tarvittavien materiaalien yksityishenkilöiden ostettavissa.
Työstettävyys	3	Äänityskopin muokattavuuden sekä tilan hienosäädön ja viimeistelyn kannalta rakennus- ja absorptiomateriaalien helppo työstettävyys on hyödyllistä, muttei äänityskopin yksinkertaisen rakenteen vuoksi kuitenkaan tärkein ominaisuus.
Purettavuus	3	Koppi tulisi olla rakenteeltaan suhteellisen helposti purettavissa, mikäli ongelmia äänitiiveydessä tai muissa ominaisuuksissa ilmenee tai rakennetta tulee siirtää.
Käyttömukavuus	3	Äänitysajat akustisessa äänityskopissa ovat aikaisempien henkilökohtaisten kokemusten mukaan varsin lyhyitä, joten käyttömukavuus ei ole painoarvoltaan etusijalla.
Kokonaispaino	2	Koska äänityskoppi ei ole jatkuvassa siirrossa eikä sen asentoa usein muuteta, kopin painolla ei ole lähtötilanteessa suurta merkitystä. Mikäli kopiaa tulee siirtää, tulee se kuitenkin olla tehtävissä ilman apuvälineitä. (Huom. painoarvotaulukossa ei oteta huomioon korrelaatiota äänitiiveyden ja materiaalin massan välillä).
Ulkonäkö	1	Äänityskoppi on suunniteltu opinnäytetyön tekijän yksityiskäyttöön, eikä sen ulkonäöllä ole suunnitteluvaiheessa toiminnallisuuteen verrattuna suurta painoarvoa.

## Akustisen äänityskopin malli

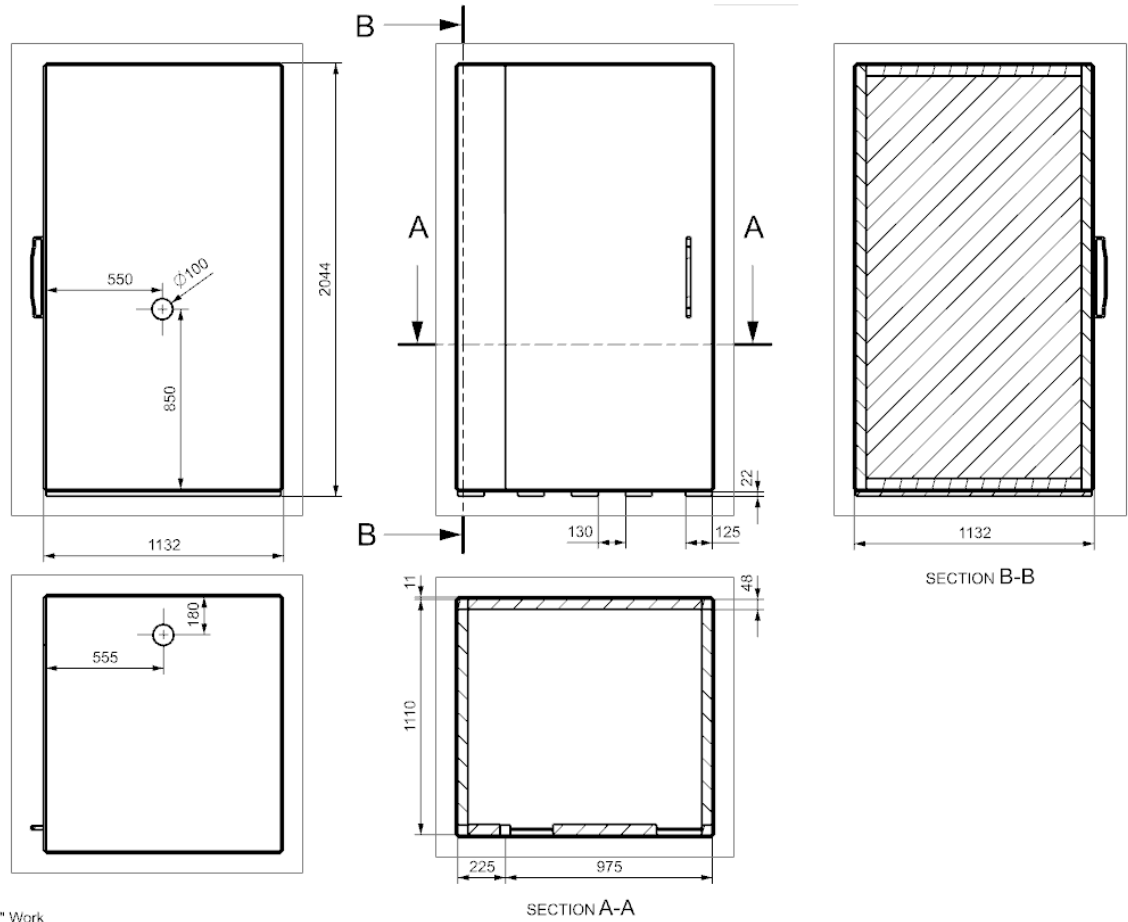


Kuva 20. Äänityskopin malli (oikea seinä sekä vaimennuslevy piilotettuna, vaimennuslevyt maalattu vaalealla. Ovenkahva kuvassa vain hahmotelmana).

## Äänityskopin ja meluansan läpileikkaukset



Kuva 21. Meluansan läpileikkaus.



Kuva 22. Akustisen äänityskopin läpileikkaus (kuvassa ovi osana rakennetta. Kiinnikkeitä, saranoita ja kumitiivisteitä ei merkittynä kuvassa).