

KOMPAKTI KORKEALUOKKAINEN KUUNTELUTILA

Mikko Kylliäinen¹, Heikki Helimäki², Nick Zacharov³ ja John Cozens

¹ Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy, Lindforsinkatu 10 B 20, 33720 Tampere, mikko.kylliainen@helimaki.fi

² Insinööritoimisto Heikki Helimäki Oy, Dagmarinkatu 8 B 18, 00101 Helsinki heikki.helimaki@helimaki.fi

³ Nokia Research Center, Speech and Audio System Laboratory, PL 600, 33721 Tampere nick.zacharov@nokia.com; john.cozens@nokia.com

1 JOHDANTO

Viimeisen kymmenen vuoden kuluessa perseptuaalinen audiojärjestelmien arviointi on yleistyntynyt, sillä monissa tapauksissa se on ainoa keino niiden käyttäytymisen selvittämiseksi. Esimerkiksi telekommunikaatio- ja äänentoistojärjestelmien laadun arvioimiseksi on olemassa lukuisia menetelmiä, joita on esitetty mm. lähteissä [1-3]. Menetelmät ovat erityisen tärkeitä audiokoodeksien (esim. MPEG AAC) ja puhekoodeksien (esim. WB-AMR) standardoinnissa. Tällainen testaus edellyttää vakaita olosuhteita, jotka ovat akustisesti hallittavissa. Standardoidut kuuntelutilat, joiden vaatimukset on esitetty standardeissa IEC 60268-13 [4] ja ITU-R BS.1116-1 [2], mahdollistavat testauksen akustisesti hallituissa olosuhteissa. Standardin mukaiset tilat on kuitenkin suunniteltu yksittäiselle kuuntelijalle tai ryhmälle, joka tekee samaa testiä samanaikaisesti. Standardoidut tilat eivät ole ihanteellisia, kun halutaan tehdä samanaikaisesti erilaisia testejä. Telekommunikaatioteollisuudessa on ollut selvä tarve tehdä testausta nopeasti ja tehokkaasti tulosten laadun kuitenkin heikentymättä. Tähän tarkoitukseen on kehitetty ohjelma, joka mahdollistaa toisistaan riippumattomien kuuntelukokeiden tekemisen samanaikaisesti [5].

Tämän projektin päätavoitteena oli kehittää periaate kuuntelutilalle, joka mahdollistaa korkealuokkaisten kuuntelukokeiden tekeminen nopeasti ja toisistaan riippumatta nopeasti joko kuulokkeilla tai kaiuttimilla. Akustisilta ominaisuuksiltaan kuuntelutilan tuli vastata lähteessä [2] esitettyä standardoitua kuuntelutilaa. Tavoitteena oli, että kuuntelukokeita voi tehdä viikossa vähintään 120 henkilöä. Kehitettävän kuuntelutilan tuli olla kompakti yksikkö, joka voidaan purkaa ja siirtää muualle ja asentaa erilaisiin tiloihin, joissa taustamelutaso vaihtelee. Kuuntelutilan ilmanvaihtojärjestelmä tuli suunnitella siten, että se voidaan sovittaa olemassa olevan tilan järjestelmiin. Lisäksi kuuntelutilan sisäilman ja ulkonäön tuli olla miellyttävä koehenkilölle. Kuuntelutilat oli myös suunniteltava niin, että niitä voidaan asentaa 1-N kpl tarpeesta riippuen.

Toinen tavoite oli toteuttaa kuusi suunniteltua kuuntelutilaa olemassa olevaan pommisuojaan, jossa taustamelun A-painotettu keskiäänitaso on 50 dB. Suomen rakentamismääräysten mukaan kuuntelutilojen sijoittaminen pommisuojaan edellyttää, että tilat on pystyttävä purkamaan ja poistamaan pommisuojusta 24 tunnin kuluessa, mikä oli otettava huomioon tilojen suunnittelussa.

2 KUUNTELUTILOJEN SUUNNITTELU

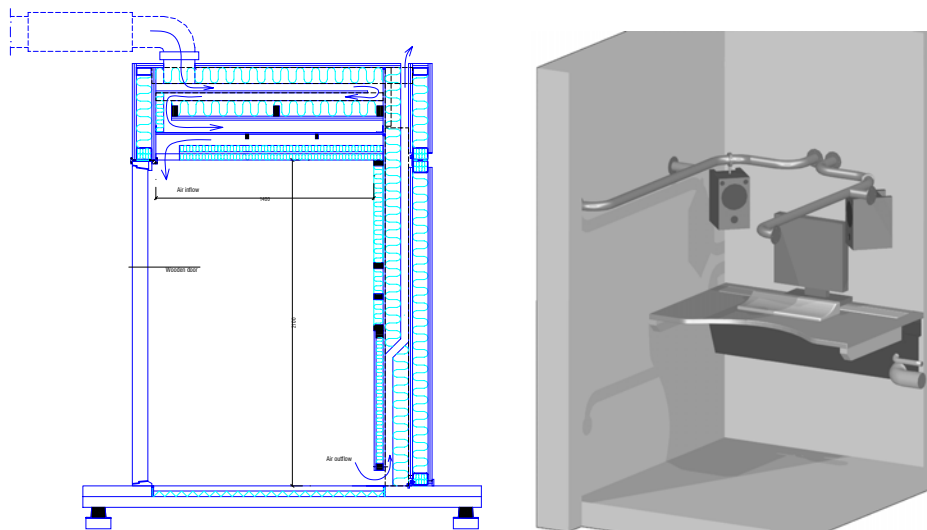
2.1 Rakennusakustiikka

Kuuntelutila **Listen²** suunniteltiin niin, että kuuntelukokeita on mahdollista tehdä sekä kuulokkeilla että kaiuttimilla tai erityistapauksissa molemmilla [5]. Kaiuttimet oli asennettava tilan sisään testisignaalin tai taustamelun tuottamiseksi. Kaiuttimilla tuotettavan keskiäänitason oletettiin olevan 75 dB puhetta tai musiikkia toistettaessa ja 88 dB kohinaa toistettaessa.

Samanaikaisen testauksen vierekkäisissä kuuntelutiloissa oletettiin edellyttävän tilojen seinärakenteelta ilmajäneneristyslukua R'_w 48 dB. Tämä arvo voidaan saavuttaa tavanomaisella rankarakenteisella seinällä, jonka 100 mm paksuun teräsrunkoon liittyy molemmin puolin levyrakenne (20 kg/m^2) ja seinän ilmatila on täytetty absorptiomateriaalilla. Myös parhaat markkinoilla olevat ovet tuottavat ilmajäneneristyslukuksi 48 dB. Kuuntelutilojen lattian kantavana rakenteena on 69 mm paksu kertopuu, jonka päälle on tehty kelluva lattia.

Kuuntelutilojen rakennusakustisessa suunnittelussa pääongelma oli vaatimus tilojen purku-mahdollisuudesta 24 tunnissa. Siksi kuuntelutilat oli suunniteltava koottavaksi elementeistä, mikä edellytti kaikilta liitoksilta ilmatiiveyttä. Liitosten kautta tapahtuvien ilmavuotojen estämiseksi elementtien rungon reunimmaisat teräsputkipalkit rei'itettiin ja täytettiin absorptiomateriaalilla. Kuuntelutilat koostuvat neljästä seinäelementistä, kattoelementistä ja lattiaelementistä (kuva 1). Ilmanvaihdon edellyttämät kanavat on sijoitettu elementtien sisään.

Kuuntelutilat toteutettiin värinäneneristettynä ovien, askelten ja muiden värinälähteiden aiheuttamien häiriöiden minimoimiseksi. Värinäneneristyksen alimman ominaistajuuden tuli olla korkeintaan 10 Hz ja värinäneneristyksen vähintään 20 dB taajuudella 100 Hz. Kuuntelutilojen pysty- ja vaakasuuntaiselle siirtymälle määriteltiin rajat, jotta tila ei tärähdä koehenkilön astuessa sisään. Kuuntelutilan massa muodostui niin suureksi, että vaatimuksen täyttävän kaupallisen värinäneneristimen löytäminen ei ollut ongelmallista.



Kuva 1. Kuuntelutilan pystysuuntainen leikkaus (vasemmalla) ja kolmiulotteinen suunnitelma kuuntelutilan sisätiloista (oikealla).

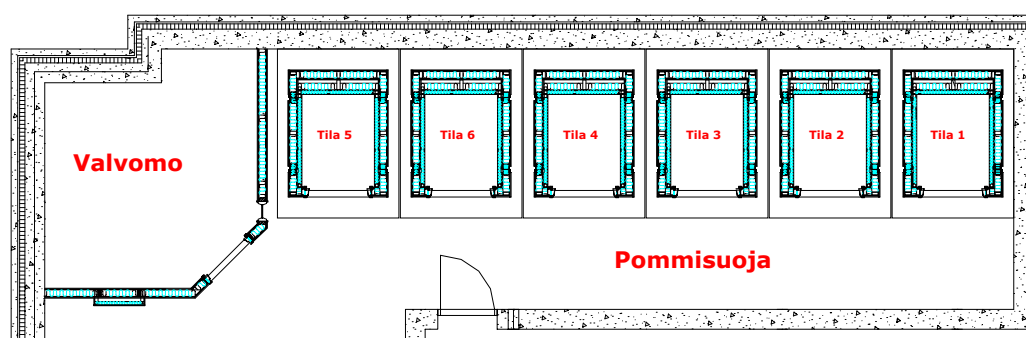
2.2 Ilmanvaihto

Kuuntelutila suunniteltiin yhtä koehenkilöä varten. Tilan sisämitat ovat $1,1 \text{ m} \times 1,4 \text{ m} \times 2,1 \text{ m}$ ja tilavuus noin $3,1 \text{ m}^3$, mikä on yhdelle kuuntelijalle riittävän kokoinen ja mukava tila. Lämmitystehon tilan sisällä, kun kaikki laitteet ovat päällä ja tila miehitetty, arvioitiin olevan noin 300 W . Tämä oli mahdollista saavuttaa vain poistamalla tilasta kaikki merkittävät lämmönlähteet, kuten tietokoneet, valot yms. Tilan valaistus toteutettiin kuituoptiikalla lämpötehon ja taustamelun välttämiseksi. Lämpötilan tilan sisällä tulee olla $23 \pm 2,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Kuuntelijan mukavuuden vuoksi myös tilan sisäilman kosteutta ja hiilidioksidipitoisuutta on myös säädettävä.

Lämmitysteho ja ilmanvaihdolle määritellyt vaatimukset johtivat siihen, että äärimmäisessä tilanteessa tuloilmamäärä on noin 80 l/s . Ilman virtausnopeuden ei kuitenkaan tule olla suurempi kuin $0,2 \text{ m/s}$. Verrattuna tyypilliseen asuinrakennuksen makuuhuoneeseen, jonka tilavuus on 30 m^3 , kuuntelutilan tuloilmamäärä on noin 20 kertaa suurempi [6].

Pommisuoja, johon kuuntelutilat sijoitettiin, on ilmastoitu. Kuuntelutilojen ilmanvaihtojärjestelmä suunniteltiin niin, että se kierrättää pommisuojan ilmaa. Kuuntelutiloja varten on olemassa ilmanvaihdon ohjausyksikkö, joka säätää erikseen kunkin tilan ilmamäärää. Koska pommisuojan läheisyydessä ei ollut riittävästi jäähdytysvettä, ilmanvaihdon ohjausyksikön lisäksi tarvittiin jäähdytyskone.

Kuuntelutilassa sallittavaksi äänitasoksi määriteltiin NR15, kun ilmanvaihto toimii täydellä teholla. Sallitun taustamelutason saavuttamiseksi kuuntelutilan ja ilmanvaihtokoneen väliin tarvittiin jokaista kuuntelutilaa kohti 6 m äänenvaimentimia. Koska tilaa oli rajallisesti käytettävissä (kuva 2), äänenvaimentimia ei voitu sijoittaa kokonaan kanaviin, vaan ilmanvaihtokanavat oli sijoitettava kuuntelutilojen rakenteisiin. Ilmanvaihdon periaate on se, että tuloilma virtaa tilan kattoelementissä olevan vaimennetun kanavan kautta tilan reunoille, josta se valuu sisäseiniä myöten alas. Poistoilma kulkee ylipaineella tilan takaseinäelementissä olevan vaimennetun kanavan kautta ulos. Ääneneristys elementeissä olevien kanavien kautta on suunniteltu niin, että kanavat eivät heikennä kuuntelutilojen välistä ääneneristystä.



Kuva 2. Kuuntelutilojen sijoitus pommisuojaan.

2.3 Huoneakustiikka

Kuuntelutilan jälkikaiunta-aika määriteltiin mahdollisimman lyhyeksi. Tärykaikua tuli välttää. Kuuntelutilan kaikki sisätilat on verhoiltu absorptiomateriaalilla lattiaa lukuun ottamatta. Katto ja seinien yläosat on verhoiltu läpäisevällä kankaalla peitetyllä 50 mm paksulla superlonilla; seinien alaosassa on rei'itetty levy, joka kestää kolhuja paremmin.

Viereiset kuuntelutilat ovat täysin identtisiä. Vierekkäisten tilojen akustisen kytkennän välttämiseksi kuuntelutilojen väliin jäävä rako vaimennettiin. Lisäksi pommisuojan jälkikaiunta-aikaa lyhennettiin vaimentamalla koko kattopinta-ala.

3 MITTAUKSET

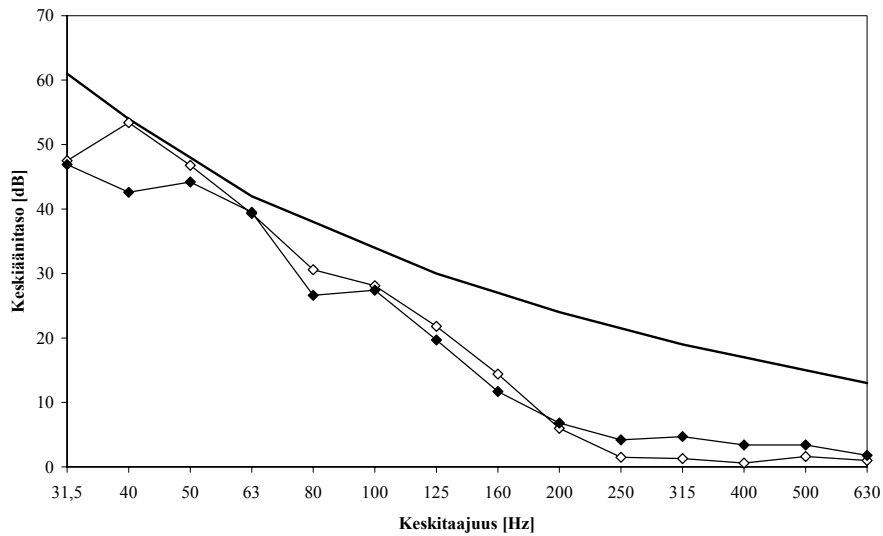
Pommisuojaan rakennettiin kuusi kuuntelutilaa (kuva 3), joiden akustiset ominaisuudet testattiin. Ilmaääneneristysluvut R'_w mitattiin vierekkäisten kuuntelutilojen välillä sekä pommisuojan muun tilan ja kuuntelutilojen välillä standardien ISO 140-4 ja 717-1 mukaisesti [7-8]. Mitatut ilmaääneneristysluvut on esitetty taulukossa 1. Keskiäänitasot mitattiin kaikissa tiloissa yhden minuutin kuluessa ilmanvaihdon toimiessa täydellä teholla. Kaikissa tiloissa ilmanvaihdon äänitaso täytti vaaditun arvon NR15. Kuvassa 4 on esitetty ilmanvaihdon äänitason mittaustulokset kahdesta kuuntelutilasta. Kuvassa 5 on esitetty kuuntelutilojen keskimääräiset jälkikaiunta-ajat. Keskitajuuksilla yli 500 Hz alueella jälkikaiunta-aika on vähemmän kuin 280 ms, joka vastaa standardeissa ITU-R BS.1116-1 [2] ja IEC 60268-13 [4] määriteltyjä kuuntelutilojen jälkikaiunta-aikoja.



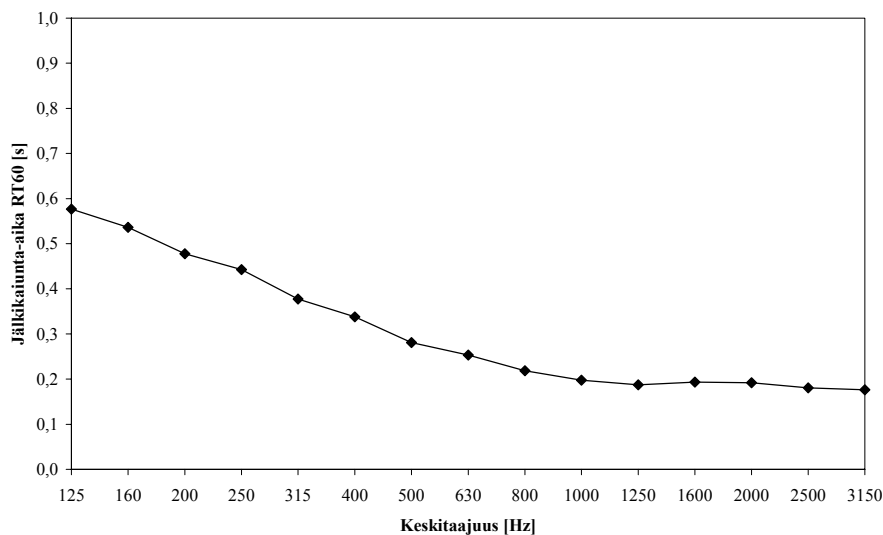
Kuva 3. Kuuntelutilat valmiina.

Taulukko 1. Mitatut ilmaääneneristysluvut R'_w .

Mitattu suunta	Ilmaääneneristysluku R'_w
Vierekkäisten kuuntelutilojen välillä	80-83 dB
Pommisuojan ja kuuntelutilan välillä	57-63 dB



Kuva 4. Äänitaso kuuntelutilassa ilmanvaihdon toimiessa täydellä teholla. Ylin viiva osoittaa NR15-käyrän sijainnin.



Kuva 5. Kuuntelutilojen keskimääräiset jälkikaiunta-ajat.

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Perinteisen standardoidun kuuntelutilan suunnittelu ja rakentaminen on hankalaa ja kallista ääneneristykselle ja ilmanvaihdolle asetettujen korkeiden vaatimusten vuoksi. Lisäksi standardoidut tilat vaativat suuren pinta-alan. Niiden toteuttaminen olemassa olevaan rakennukseen on vaikeaa. Tämän työn tarkoituksena oli saada aikaan kompakti kuuntelutila, joka mahdollisimman hyvin vastaa standardoidun tilan ominaisuuksia. Tällaiselle tilalle kehitettiin yleinen periaate ja kuusi kuuntelutilaa toteutettiin olemassa olevaan pommisuojaan. Toteutettujen tilojen akustiset ominaisuudet todettiin vaatimukset täyttäväksi mittauksin. Mittaustulokset osoittavat, että kehitetty kuuntelutila voidaan sijoittaa olemassa olevaan ilmastoituun tilaan, jossa taustamelun keskiäänitaso on olla 50 dB.

Kehitetty kuuntelutila **Listen²** mahtuu pieneen tilaan (pinta-ala 4,6 m²) ja tarjoaa standardeitua kuuntelutilaa vastaavat akustiset ominaisuudet:

- jälkikaiunta-aika < 280 ms yli 500 Hz taajuuksilla
- alhainen taustäänitaso < NR 15
- korkea ilmaääneneristys
- hyvä värinäneristys

Kuuntelutiloja käytetään tällä hetkellä lähes jatkuvasti. Kuudessa toteutetussa tilassa käy usein yli 100 koehenkilöä viikossa. Ensimmäisen vuoden kuluessa tilojen valmistumisesta tiloissa on käynyt yli 1200 henkeä suorittamassa kuuntelukokeita.

LÄHTEET

1. ITU-R. Recommendation BS.1283, Subjective assessment of sound quality – A Guide to existing Recommendations. International Telecommunications Union Radiocommunication Assembly, Geneva 1998.
2. ITU-R BS.1116-1, Methods for the subjective assessment of small impairments in audio systems including multichannel sound systems. International Telecommunication Union, Geneva 1997.
3. ITU-T. Recommendation P.800, Methods for subjective determination of transmission quality. International Telecommunications Union, Telecommunications Standardization Sector, Geneva 1996.
4. IEC 60268-13, Sound system equipment - Part 13: Listening tests on loudspeakers. International Electrotechnical Commission, Geneva 1998.
5. HYNNINEN J and Zacharov N, GuineaPig - A generic subjective test system for multichannel audio. *Proceedings of the Audio Engineering Society 106th International Convention*, 1999.
6. *Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D2, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto*. Ympäristöministeriö, Helsinki 1987.
7. ISO 140-4, Acoustics – Measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. International Organization for Standardization, Geneva 1998.
8. ISO 717-1, Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. International Organization for Standardization, Geneva 1996.