

TUULETURATKAISUJEN MELUNTORJUNTA

Kerttu Torsti¹, Jarno Kokkonen¹, Jesse Lietzén¹

¹ A-Insinöörit Suunnittelu Oy
Puutarhakatu 10
33210 Tampere
etunimi.sukunimi@ains.fi

Tiivistelmä

Tiivistyvän kaupunkirakenteen maankäytön suunnittelua ei voida toteuttaa ainoastaan liikennemelun ehdoilla, minkä seurauksena asuinrakennuksia sijoitetaan yhä meluisimmille alueille. Kaupungeissa vilkkaiden katujen ja väylien varrella rakennusten julkisivuille voi kohdistua jopa yli 70 dB melutasoja. Meluisimmilla alueilla asunnon tuuletuksen aikainen sisämelutaso voidaan pitää tyydyttävänä, kun tehdään läpitalon huoneisto, joka avautuu myös hiljaisempaan piha-alueeseen. Ainoastaan melun suuntaan avautuvien huoneistojen toteuttaminen on mahdollista sellaisissa asunnoissa, joissa ratkaiseva tapa viilentää asuntoa on tuuletusluukku, jos tuuletusaikaista melua saadaan vaimennettua tarpeeksi. Tässä tutkimuksessa on selvitetty kirjallisuustutkimuksen keinoin, millaisia potentiaalisia tuuletusikkunoiden ja -luukkujen meluntorjuntaratkaisuja on olemassa. Lisäksi on tarkasteltu parvekekaiteiden ja muiden julkisivuelementtien meluntorjuntaa. Tarkastelun perusteella erityisesti tuloilmaikkunat, joissa on porrastetut tuuletusluukut, ovat osoittautuneet toteuttamiskelpoisiksi ratkaisuksi kaikista meluisimpiin julkisivuihin. Lisäksi on olemassa lisätutkimustarve tuuletusikkunoiden ulkopuolisien levyrakenteiden vaikutuksesta äänenvaimennukseen.

1 JOHDANTO

Helsingin kaupungin väestön lukumäärä kasvaa yli 8 000 hengellä vuosittain ja 700 000 asukkaan rajan ennustetaan ylittyvän jo vuonna 2027 [1]. Ilmiön seurauksena pitkän aikavälin tavoitteena onkin rakentaa vuosittain 16 500 uutta asuntoa Helsingin seudulle. Suuri osa näistä asunnoista sijoittuu vanhoille asuinalueille täydennysrakentamalla, jotta luonto-alueita säästyisi ja joukkoliikenneyhteydet olisivat lähellä. [2] Näillä alueilla melutilanne voi olla jo valmiiksi haastava. Helsingin kaupungin vuonna 2022 tehdyn meluselvityksen mukaan noin 18 % kaupungin pinta-alasta sijaitsee liikennemelualueella, jossa L_{den} on yli 64 dB [3]. Tällaisissa keskittymissä asuntosuunnittelun merkitys meluntorjuntakeinona korostuu ja tuuletusratkaisujen meluntorjuntaan tulisi kiinnittää huomiota silloin, kun asunto ei avaudu hiljaiseen suuntaan.

Uusiin rakennuksiin tullaan todennäköisesti vaatimaan koneellinen jäähdytys lähivuosina [4]. Vaikka uusien asuntojen jäähdytys ja ilmanvaihto hoidettaisiinkin teknisin keinoin, ne kannattaa varustaa tulevaisuudessakin tuuletusikkunoilla tai -luukuilla vähintään lyhytaikaisen tehostetun tuuletuksen vuoksi. Ulkoa tuuletusluukun kautta kantautuva melu on kuitenkin haitallisinta, kun luukku pidetään auki pitkällä aikavälillä esimerkiksi asunnon



© 2025 Kerttu Torsti, Jarno Kokkonen ja Jesse Lietzén. Tämä on avoimesti julkaistu teos, joka noudattaa Creative Commons NIMEÄ 4.0 Kansainvälinen –lisenssiä (CC BY 4.0). Teosta saa kopioida, levittää, näyttää ja esittää julkisesti ja siitä saa luoda johdannaisteoksia, kunhan tekijän nimi ja lähde mainitaan asianmukaisesti.

viilentämiseksi kesällä hellepäivän jälkeen. Näin ollen tuuletusratkaisujen meluntorjunta ei ole välttämättä tarpeellista sellaisissa asunnoissa, joissa on koneellinen jäähdytysjärjestelmä.

Helsingin kaupungin ilmansuojelu- ja meluntorjuntasuunnitelmassa on määritelty toimenpide 5.2, jonka tavoitteena on selvittää ulkovaipan ääneneristystä parantavia rakennusteknisistä ratkaisuja, jotta niitä voitaisiin hyödyntää melualueelle sijoittuvien uusien asuinrakennusten suunnittelussa. Selvitykseen kuuluu esimerkiksi tutkimus tuuletusikkunoiden ja -luukkujen ääntä eristävien ratkaisujen toteutettavuudesta sekä vaikutuksesta äänenvaimennukseen. [5] Selvityksen teemat ovat yhteneväisiä tutkimuksen tavoitteiden kanssa. Artikkelissa esitetään työn kirjallisuustutkimuksen tuloksia.

2 TUULETUSAIKAISEN MELUN HUOMIOINTI OHJEARVOISSA

Suomessa käytössä olevissa melutason ohjearvoissa [6] ei oteta huomioon tuuletusaikaista sisämelutasoa. Ainoastaan melutason ohjearvojen perustelumuistiossa [7] on maininta 55 dB:in melualueella olevien huoneistojen avautumisesta hiljaisemmalle puolelle tuuletuksen mahdollistamiseksi. Suomessa eri kaupungeilla on vaihtelevasti eri ohjeistuksia ja käytäntöjä asuntojen avautumisesta hiljaisemmalle puolelle.

Tanskan ympäristöministeriö esittää ohjearvot äänen keskiäänitasoille tiloissa, joissa ikkuna on osittain avoinna. Ohje koskee tieliikennemelualueita. Sen mukaan makuuhuoneissa ja oleskelutiloissa vuorokauden sisämelutason tunnusluku L_{den} (klo. 19–22 + 5 dB ja 22–7 + 10 dB). saa olla enintään 46 dB, kun ikkunat ovat auki. Oletuksena on, että kaikki avattavat ikkunat on avattu siten, että avautumispinta-ala on 0,35 m² jokaista avattavaa ikkunaa kohti. Toimistoissa meluraja L_{den} , joka ottaa huomioon avoimet ikkunat, on 51 dB. [8] Rakennusmääräyksissä vastaavat L_{den} arvot ovat 33 dB [9][10][11][12] ja 38 dB [13], joten tuuletustilanteessa sallitaan 13 dB suuremmat melutasot.

Norjan ilmasto- ja ympäristöministeriö on julkaissut vuonna 2021 ohjeen, jossa mainitaan, että voidaan käyttää niin ikään vaimennettuja julkisivuja hiljaiseen ulkomelutasoon suuntautuvan julkisivun korvikkeena esimerkiksi kulmahuoneistoissa. Tällaiset poikkeamat tulisi perustella kaavaselostuksessa. Tieliikennemelun osalta L_{den} ei saisi ylittää 55 dB ikkunoiden ulkopuolella tiloissa, joissa on melulle herkkä käyttötarkoitus, eikä hiljaisella puolella ulko-oleskelualueita. Yöllä (klo. 23–07) A-painotettu melutaso aikapainotuksella L_{5AF} , jossa 5 % melutapahtumista saa ylittyä, saisi olla enintään 70 dB. Rautatieliikenteen osalta vastaavat rajat ovat $L_{den} \leq 58$ dB ja $L_{5AF} \leq 75$ dB. Lisäksi ohjeessa mainitaan, että hiljaisen julkisivun puuttuminen ja korvaaminen vaimennetulla julkisivulla pitäisi kompensoida muilla viihtyvyyttä korostavilla tekijöillä, joita ovat esimerkiksi luonnonvalo, näköalat, laadukkaat ulko-oleskelualueet sekä yhteiset sisätilat. [14] Käytännössä ohjetta on noudatettu joko vaimennetuilla parvekkeilla tai levyllä tuuletusikkunan edessä [15].

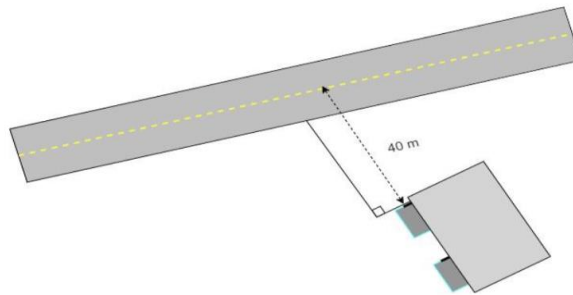
Ruotsissa on asetus 2015:216, jonka pykälä 3 § koskee raide- ja maanteiden melua asuinrakennusten julkisivuilla. Pykälän mukaan raideliikenteen ja maanteiden vuorokauden keskiäänitaso (L_{Aeq}) ei saisi ylittää 60 dB asuinrakennusten julkisivuilla, mutta pohjapinta-alaltaan enintään 35 m² kokoisille asunnoille vastaava raja on 65 dB. Jos nämä melutason ohjearvot ylittyvät, tulisi pykälän 4 § mukaan vähintään puolet asuinhuoneista suunnata julkisivun puolelle, jossa 55 dB:n vuorokauden ekvivalentti äänitaso ei ylity sekä vähintään puolet asuinhuoneista sijoittaa puolelle, jossa 70 dB:n enimmäisäänitaso ei ylity yöaikaan (klo. 22–06). [16] [17]

3. MELUA TORJUVAT TUULETUSRATKAISUT

3.1 Tuulettuvat parvekkeet

Tuulettutilanteessa parvekelasituksia pidetään tyypillisesti avoimena eikä lasitettujen parvekkeiden meluntorjuntavaikutusta voida ottaa huomioon sellaisenaan. Parvekekaiteilla ja muilla suojaavilla parvekereunuksilla on myös melua torjuva vaikutus. Kohteissa, joissa on hyvin suuret melutasot, oleskeluparvekkeiden ulkomelutasojen ohjearvojen täyttymistä edellytetään asemakaavamääräyksillä, jolloin niiden käyttö meluna torjuvana rakenteena ei kuitenkaan ole mahdollista. Esimerkiksi Helsingissä oleskeluparvekkeita ei tule esittää yli 70 dB:n päivämelun tai 65 dB:n yömelun julkisivuille [18].

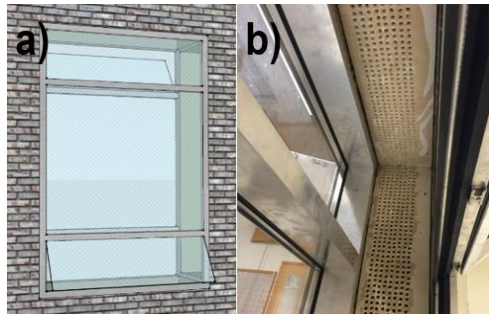
Standardin ISO 12354-3 mukaan lasittamattomalla parvekkeella voidaan saada parhaimmillaan 4 dB parannusvaikutus ΔL_{fs} , kun näköyhteyden korkeus on vähintään 1,5 m ja parvekkeen katossa on vaimennusmateriaalia, jonka absorptiokerroin on 0,9 [19]. Fjeld [15] on mitannut lasittamattomien parvekkeiden parannusvaikutuksia oikeaa liikennemelua vastaan. Mittauksissa korkein parannusvaikutus saatiin, kun parvekkeet sijaitsivat tien nähden kuvan 1 tapaan ja parvekkeiden tien suuntainen reunus oli osittain kiinteä. Tällöin kuvassa 1 esitetystä parvekkeesta parannusvaikutus oli 9 dB, kun näköyhteyden korkeus oli 1,8 m ja katossa oli absorptiosuhteeltaan 0,65 olevaa absorptiomateriaalia. [15] Todellisuudessa parannusvaikutukset voivat siis olla suuremmat kuin standardissa ISO 12354-3 esitetyt.



Kuva 1. INTER-NOISE 2024:ssä esitetty piirros eräästä Fjeld'in mittaamasta parvekkeesta [15]

3.2 Tuloilmaikkuna

Tuloilmaikkuna on kaksinkertainen ikkunarakenne, jossa sisä- ja ulkopuolen avattavat osat sijaitsevat eri kohdilla. Tätä tuuletusluukullista tuloilmaikkunaa ei pidä sekoittaa luukuttomaan tuloilmaikkunaan, jossa on tulo- ja poistoilmaventtiilit. Ikkunan luukut sijoitetaan tyypillisesti siten, että ulkoilmaan rajoittuvan osan puitteellinen ikkuna on saranoitu yläreunastaan ja sijaitsee ikkunan alaosassa, jolloin sisäosan puitteellinen osa on saranoitu alareunastaan ja sijaitsee ikkunan yläosassa kuvan 2a) mukaan. Tuloilmaikkunan suuri äänenvaimennuskyky johtuu sen pitkästä kanavasta, jonka kautta melun täytyy kulkeutua ennen kuin se saavuttaa sisemmän ikkunan ilma-aukon. Ikkunarakenteen ääneneristyskyky riippuu kanavan pituudesta, joka on usein verrannollinen ikkunan korkeuteen, sekä vaimennusmateriaalista, joka voidaan sijoittaa ikkunalasien välitilojen reunuksille esimerkiksi kuvan 2b) tapaan.



Kuva 2. Tuloilmaikkuna a) ja sen vaimennusratkaisu b) [20] Kuvat ovat julkaistu DELTA -a part of FORCE Technology:n luvalla

Søndergaard et al. [20] ovat mitanneet tuloilmaikkunoiden ääneneristävyyttä laboratoriossa sekä kentällä. Sellaiset tuloilmaikkunat, joissa ei ollut välitilan vaimennusmateriaalia, saivat luukut avattuna ilmaääneneristyslukuja R_w+C_{tr} väliltä 15... 18 dB. Kun lisättiin vä-litilan onkaloon levyvaimennin reikälevyn taakse, ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan R_w+C_{tr} nousi parhaimmillaan arvoon 23 dB. Vertailussa parhaiten pärjäsi kapea ja korkea ikkuna (900 mm x 2100 mm), jossa ääni vaimeni pisimmän matkan. Kenttämittauksissa saatiin laboratoriomittauksiin verrattuna korkeampia ilmaääneneristävyyden arvoja alle 250 Hz taajuuksilla sekä taajuusalueella 800–2000 Hz. Yksilukuarvot R'_w+C_{tr} kenttä-mittauksissa olivat noin 3–4 dB korkeampia. [20]

Tuloilmaikkunan ääneneristävyyttä voidaan parantaa, jos äänen kulkureittiä ikkunan sisällä pidennetään entisestään. Eilenburger Fenstertechnik markkinoi neliruutuista tuloilmaikkunaa, jonka sisällä ääni kulkee sekä pysty- että vaakasuunnassa. Ikkunan ilmaääneneristysluku tieliikennemelua vastaan R_w+C_{tr} on avattuna jopa 39 dB, mutta avatun osuuden pinta-alaa mittaustilanteessa ei ole mainittu tuote-esitteessä. [21]

3.3 Levyrakente tuuletusikkunan sisällä

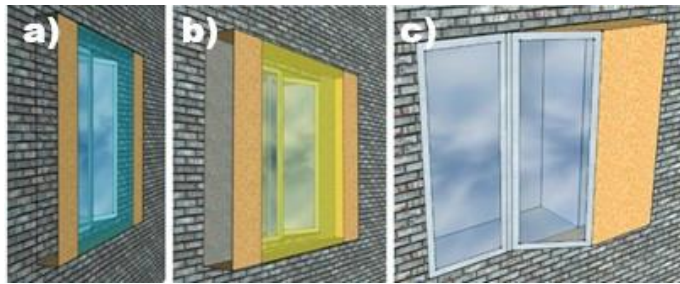
Søndergaard et al. [20] ovat mitanneet laboratoriossa kuvan 3 tuuletusikkunatyypin ilmaääneneristävyyttä. Ikkunan sisällä oli siirreltävä levyrakente, jolla saatiin parannettua ilmaääneneristävyyttä noin 5 dB. Ilmaääneneristysluvut olivat R_w 15 dB ja R_w+C_{tr} 12 dB, kun ikkunan välitilan reunuksissa oli lisäksi vaimennusmateriaalia. [20]



Kuva 3. Siirreltävä levyrakente tuuletusikkunan sisällä [20] Kuva on julkaistu DELTA -a part of FORCE Technology:n luvalla

3.4 Ikkunan ulkopuolinen kotelointi

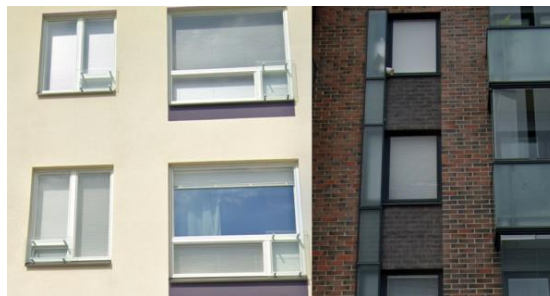
Tuuletusikkunoiden kautta kulkeutuvaa melua voidaan torjua myös lisäämällä kotelomainen levyrakenteinen ikkunan ulkopuolelle. Kotelossa seinän ja levyn väliin jäävä ilmatila on suljettu vähintään kahdelta sivulta. Søndergaard et al. [20] ovat mitanneet kuvan 4 tapaisia koerakenteita laboratorio-olosuhteissa. Kotelointi tehtiin koko ikkuna-alueelle (kuvat 4a) ja 4b)) tai pelkälle tuuletusikkunalle (kuva 4c)). Versiossa a) ilmatila on suljettu alhaalta ja ylhäältä, kun taas versiossa b) alhaalta, ylhäältä sekä toiselta sivulta. Rakenteiden ilmaääneneristyslukuiksi saatiin arvoja 10 dB:stä (versio C, kotelon leveys 590 mm) 26 dB:iin (versio B, kotelon leveys 2050 mm, absorboivaa materiaalia kotelon reunuksissa). Vastaa- vat ilmaääneneristysluvut tieliikennemelua R_w+C_{tr} vastaan olivat 9 dB ja 22 dB. [20]



Kuva 4. Ikkunan kotelointitapoja [20]. Kuvat on julkaistu DELTA -a part of FORCE Technology:n luvalla

3.5 Levyrakenteinen tuuletusikkunan ulkopuolella

Levyrakenteisia elementtejä tuuletusikkunoiden ulkopuolella on jo otettu käyttöön pääkaupunkiseudulla. Tällaisia kohteita ovat esimerkiksi kuvan 5 Asolanväylä 12, jossa asema-kaavaan on merkitty ulkovaipan ääneneristysvaatimukseksi 37 dB [22] sekä Radiokatu 9, jonka tapauksessa kaavassa ei edes ole esitetty äänitasoerovaatimusta [23]. Lukuisista toteutuksista huolimatta ei ole olemassa julkista tutkimustietoa siitä, kuinka nämä levyrakenteet toimivat meluntorjunnan suhteen.

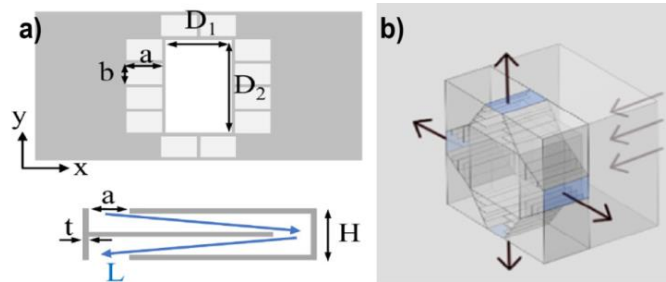


Kuva 5. Levyrakenteita tuuletusikkunoiden edessä: Vasemmalla Asolanväylä 12, oikealla Radiokatu 9. Kuvälähde: Google Maps.

3.6 Metamateriaalit

Metamateriaalit koostuvat tyypillisesti 3D-printatuista ontoista hilaelementeistä, joiden kokoa, muotoa ja vierekkäisten hila-alkioiden keskinäistä vuorovaikutusta muokkaamalla saadaan aikaan tarvittava ominaisuus [24]. Metamateriaalien käyttäminen tuuletusikkunoiden tai -luukkujen yhteydessä saattaa yleistyä tulevaisuudessa, koska ne onnistuvat usein

vaimentamaan ääntä laajakaistaisesti. Esimerkiksi Shi et al. [25] ovat tutkineet kuvan 6a) Fano-tyyppiseen resonaattoriin perustuvaa metaikkunaa, joka pystyy tutkimustulosten perusteella torjumaan 90 % rakenteeseen kohdistuvasta äänienergiasta taajuusalueella 605–1050 Hz. Fusaro et al. [26] ovat mitanneet kuvan 6b) tapaisen metaikkunan äänitasoeron ja ääneneristävyyden parannusvaikutuksia ΔD_{ne} ja ΔSI . Molemmissa saatiin arvoja 5...15 dB taajuusalueella 500–5000 Hz verrattuna luokkuun ilman metaikkunaa [26].



Kuva 6. Eräitä metaikkunoita a) Shi et al. [25] ja b) Fusaro et al. [26] esittäminä. Kuva a) on julkaistu AIP Publishing luvalla. Kuva b) on julkaistu CC BY -lisenssillä.

4. DISKUSSIO

Suomessa tuuletusaikaisen melun huomiointi ohjearvoissa on epäselkeämpää verrattuna muihin tarkasteltuihin Pohjoismaihin. Tuuletusaikaista sisämelutasoa tarkastellaan ohjetasolla ainoastaan Tanskassa, jossa tuuletusratkaisuilta odotetaan sellaista vaimennusta, että sisämelutaso on enintään 13 dB normaalia korkeampi. Tarkastelluista vaimennusratkaisuisista tuloilmaikkunat (kuva 2) ovat eniten kehittyneitä ja niitä on jo käytössä ulkomailla. On myös muita potentiaalisia tuuletusaikaisia vaimennusratkaisuja, joiden tapauksessa joko on tuloilmaikkunoihin verrattuna pienempi meluntorjuntavaikutus tai rakenteen käyttöönotto ei ole vielä ajankohtaista. Tuuletusikkunan ulkopuoliset levyt ovat helpoiten lähestyttäviä yksinkertaisuutensa vuoksi, mutta niiden meluntorjuntavaikutusta ei vielä tunneta. Näin ollen on olemassa lisätutkimustarve selvittää tuuletusikkunoiden ulkopuolisten levyrakenteiden vaikutusta äänenvaimennukseen.

VIITTEET

- [1] Sinkko, H. (2024). Helsingin ja Helsingin seudun väestöennuste 2023–2060 – Ennuste alueittain 2023–2038. Tilastoja 2024: 6. Helsingin kaupunki, kaupunginkanslia, kaupunkitietopalvelut. https://www.hel.fi/static/kanslia/Kaupunkitieto/24_10_24_Tilastoja_6.pdf
- [2] Helsingin kaupunkiympäristön toimiala. (2025). Suunnittelu- ja kaavoituskatsaus 2025. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2025:12. [Suunnittelu- ja kaavoituskatsaus 2024](#)
- [3] Promethor Oy. (2022). Helsingin kaupungin EU:n ympäristömeludirektiivin mukainen meluselvitys 2022. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2022:25. [3805D091-54EC-C4E1-95E9-83E2AA100000.pdf](#)
- [4] Helsingin Sanomat. (2025). Uusiin rakennuksiin vaaditaan todennäköisesti koneellinen jäähdytys lähivuosina. Saatavissa (viitattu 10.10.2025) [Uusiin rakennuksiin vaaditaan todennäköisesti koneellinen jäähdytys lähivuosina | HS.fi](#)

-
- [5] Helsingin kaupunkiympäristön toimiala. (2024). Ilmansuojelu- ja meluntorjuntasuunnitelma, ILME 2024–2029. Kaupunkiympäristön julkaisuja 2024:4. [Ilmansuojelu ja meluntorjunta \(ILME\) suunnitelma 2024-2029](#)
- [6] Valtioneuvoston päätös melutason ohjearvoista 993/1992. (1992). Suomen säädöskokoelma.
- [7] Sarkkinen, S. (1992). Ehdotus Valtioneuvoston päätökseksi melutason ohjearvoista. Ympäristöministeriö, muistio 26.10.1992.
- [8] Danish Ministry of the Environment. (2007). Støj fra veje. Vejledning 4/2007.
- [9] Bygningsreglementet. (2007). Vejledning til boliger og andre bygninger til overnatning – Lydforhold (§ 368–§ 376). [BR18](#)
- [10] Bygningsreglementet. (2007). Vejledning til daginstitutionsbygninger – Lydforhold (§ 368–§ 376). [BR18](#)
- [11] Bygningsreglementet. (2007). Vejledning til hospitaler, lægehuse og klinikker – Lydforhold (§ 368–§ 376). [BR18](#)
- [12] Bygningsreglementet. (2007). Vejledning til undervisningsbygninger – Lydforhold (§ 368–§ 376). [BR18](#)
- [13] Bygningsreglementet. (2007). Vejledning til kontorbyggeri – Lydforhold (§ 368–§ 376). [BR18](#)
- [14] Klima- og Miljødepartementet. (2021). Retningslinje for behandling av støy i arealplanlegging. Guideline T-1442/2021.
- [15] Fjeld Øyvind. (2024). On the sound attenuation of balconies. InterNoise 2024. Nantes France, August 25.–29.
- [16] Svensk författningssamling (SFS). (2015). Förordning (2015:216) om trafikbuller vid bostadsbyggnader.
- [17] Svensk författningssamling (SFS). (2017). Förordning om ändring i förordning (2015:2016) om trafikbuller vid bostadsbyggnader.
- [18] Helsingin kaupunki. (2019, päivitetty 2022). Maankäytön yleissuunnittelun ohje. [Kymp ohjepohja oranssi](#)
- [19] SFS-EN ISO 12354-3:2017. (2017). Building acoustics. Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 3: Airborne sound insulation against outdoor sound.
- [20] Søndergaard, L.S., Egedal, R., Hansen, M.B., Lindum, M. Kjær, I.L. & DELTA – a part of FORCE Technology. (2019). Open windows with good sound insulation. The Danish Environmental Protection Agency. [Rapport](#)
- [21] Eilenburger Fenstertechnik. (n.d.) Sound-absorbing HAFENCITY windows from Eilenburg. Saatavissa (viitattu 10.10.2025): [Broschüre Hafencity-Fenster A4 2018-02_EN.pdf](#)

-
- [22] Kartta Vantaa. (n.d.) Saatavissa (viitattu 10.10.2025): [Vantaan karttapalvelu](#)
- [23] Helsingin karttapalvelu. (n.d.) Saatavissa (viitattu 10.10.2025): [Helsingin karttapalvelu](#)
- [24] Aalto.fi. (2018). Ääniaallot saadaan täydellisesti kulkemaan haluttuun suuntaan. Saatavissa (viitattu 15.10.2025). [Ääniaallot saadaan täydellisesti kulkemaan haluttuun suuntaan | Aalto-yliopisto](#)
- [25] Shi, J., Liu, C., Liu, X. & Lai, Y. (2021). Ventilative meta-window with broadband low-frequency acoustic insulation. Journal of Applied Physics Vol.129(9), 094901. <https://doi.org/10.1063/5.0042384>
- [26] Fusaro, G., Barbaresi, L., Guidorzi, P. & Garai, M. (2024). Investigation of the sound insulation and natural ventilation performance of a metamaterial-based open window. Building and Environment Vol.266, 112140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112140>