



Eetu Rytö

Kaksilasisen järjestelmäseinän sisäpuolinen likaantuminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

1.5.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Eetu Rytö
Otsikko: Kaksilasisen järjestelmäseinän sisäpuolinen likaantuminen
Sivumäärä: 64 sivua
Aika: 1.5.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Rakennustekniikka
Ammatillinen pääaine: Rakennetekniikka
Ohjaajat: Tuotekehityspäällikkö Harri Havukainen
Lehtori Anssi Knuutila, DI

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin kaksilasisen järjestelmäseinäjärjestelmän sisäpintojen likaantumisongelmaa. Inlook Oy:n kehittämä tuote täyttää akustiset vaatimukset hyvin, mutta lasielementtien sisäpuolelle kertyvä lika ja samentuminen ovat haitanneet tuotteen käyttöä ja markkinointia.

Työssä selvitettiin, mistä ilmiö johtuu ja kuinka sisäilman olosuhteet, kuten kosteus ja pöly vaikuttavat lasien väliin muodostuvaan epäpuhtauteen.

Tutkimusosuudessa käytettiin testihuonetta, jossa mitattiin kosteuden käyttäytymistä ja pinoismallilla kartoitettiin rakenteen vuotokohtia.

Työn tavoitteena oli ymmärtää likaantumisen taustalla olevat fysikaaliset mekanismit ja luoda pohja tuotteen kehittämiseksi.

Tutkimuksen päätuloksena todettiin, että suhteellinen kosteus vaikuttaa merkittävästi pölyn havaittavuuteen lasipinnoilla.

Avainsanat: Järjestelmäseinä, kosteus, pölyhiukkaset

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Eetu Rytö
Title: Internal Contamination of Double-Glazed Partition Wall System
Number of Pages: 64 pages
Date: 1 May 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Civil Engineering
Professional Major: Structural Engineering
Supervisors: Harri Havukainen, Head of Product Development
Anssi Knuutila, Senior Lecturer, M.Sc.

This engineering thesis explored the issue of inner surface contamination in a double-glazed partition wall system. The product, developed by Inlook Oy, performs well in terms of acoustics, but dirt accumulation and fogging between the glass panes have negatively impacted both its usability and market appeal.

The study focuses on identifying the underlying causes of this phenomenon, particularly how indoor environmental conditions such as humidity and airborne dust contribute to the formation of impurities between the glass surfaces.

The experimental study was carried out in a test room, where moisture behavior was monitored and potential leakage points in the structure were identified using a scaled-down model.

The aim of this thesis was to gain a deeper understanding of the physical mechanisms behind the contamination and to provide a solid foundation for future product development.

The main finding of the study demonstrated that relative humidity has a significant impact on the visibility of dust on the glass surfaces.

Keywords: partition wall system, humidity, dust particles

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoitteet	1
1.3	Opinnäytetyön rajaus ja tekoälyn käyttö	2
2	Ääntä eristävät lasiset järjestelmäseinät	3
2.1	Järjestelmäseinien käyttökohteet ja ominaisuudet	3
2.1.1	Teknistä tietoa ääntä eristävästä järjestelmäseinistä	4
2.2	Inlookin kaksilasinen järjestelmäseinä	10
2.3	Vaatimukset uudenrakennuksen äänen eristävyydelle	12
2.4	Lasi materiaalina	14
2.4.1	Kirkas floatlasi	14
2.4.2	Laminoitulasi	15
2.4.3	Äänieristyskalvo	16
3	Akustiikan perusteet ja äänen eristys	18
3.1	Äänen korkeus ja voimakkuus	19
3.2	Rakennusakustiikan sovellukset	21
3.3	Jälkikaiunta-ajan perusteet ja merkitys akustiikassa	25
3.4	Yksilasisten ja kaksilasisten järjestelmäratkaisuiden akustiikka	27
4	Sisäilman olosuhteet ja pöly	30
4.1	Ilmassa oleva pöly	30
4.1.1	Ilmanvaihdon merkitys pölyn leviämisessä	32
4.1.2	Ilmankosteuden vaikutus pölyn käyttäytymiseen	33
4.2	Sisäilman kosteuden nousu toimistohuoneessa	34
5	Kosteuden hallinta ja likaantumisen taustatekijät	37
5.1	Hygroskooppinen pöly ja kosteus lasipinnoilla	37
5.2	Eristyslaselementtien kosteusongelmien taustatekijät	38
6	Teknisen vian kuvaus ja alustavat havainnot	41
6.1	Asennusvaiheen kriittiset ongelmakohdat	41
6.2	Likaantumisen ilmeneminen ja olosuhdevaikutukset	42

6.3	Ongelman tutkiminen ja aiemmat ratkaisuyritykset	42
7	Pölyyntymiseen liittyvien ilmiöiden kokeellinen tutkimus	45
7.1	Koe 1 kosteuden vaikutus -testi välitilassa	48
7.2	Koe 2 sovellettu vesikoe	52
8	Pohdinta	58
9	Yhteenveto	61
	Lähteet	63

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Tämä opinnäytetyö on tehty Inlook Oy:n järjestelmäseinäosaston toimeksiantosta. Inlook Oy on suomalainen keskisuuri rakennusalan yritys, joka on erikoistunut vaativaan sisärakentamiseen. Yrityksellä on pitkä kokemus muun muassa alakattojen, väliseinien, sisäverhosten ja erityisesti järjestelmäseinien toimituksista ja asennuksista. Järjestelmäseinäosasto keskittyy erityisesti lasiseiniin, lasioviin ja erilaisiin seinäverhousratkaisuihin toimisto- ja julkisissa tiloissa. Osaston tuotteiden keskeisiä vaatimuksia ovat hyvä ääneneristys, visuaalisuus ja käytännöllisyys, joiden toteutuminen vaikuttaa suoraan asiakkaiden tyytyväisyyteen ja tuotteen markkinakelpoisuuteen.

Opinnäytetyön aiheena on tuplalasinen järjestelmäseinäjärjestelmä, jonka ääneneristävyys on rakenteeltaan erinomainen. Tuotteen akustiset ominaisuudet täyttävät korkeat vaatimukset, mutta tuotetta ei ole voitu myydä täydessä laajuudessaan lasien väliin kertyvän lian tai huurtumisen aiheuttamien ongelmien vuoksi. Tämä ongelma heikentää tuotteen visuaalista laatua ja heikentää tuotteen käyttöikä.

1.2 Työn tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on selvittää kokeellisesti, mistä kyseinen likaantumisen ja samentumisilmiö johtuu. Tutkimuksessa keskitytään erityisesti sisäilman kosteuden käyttäytymiseen, rakenteen tiiveyteen sekä pölyhiukkasten rooliin lasipintojen samentumisessa.

Tarkoituksena on mallintaa testihuoneessa olosuhteet, joissa kyseinen ongelma ilmenee, ja tämän perusteella paikantaa mahdolliset kriittiset vuotokohdat tai kosteusrasitukseen liittyvät rakenteelliset heikkoudet.

Työssä käytetään apuna teoreettista taustatietoa kosteuden hallinnasta, pölyn hygroskooppisuudesta sekä eristyslaselementtien toiminnasta. Kokeellisessa osassa suoritetaan mittauksia ja olosuhdesäätöjä kontrolloidussa testiympäristössä, minkä lisäksi arvioidaan tiiveyteen ja kosteuden kertymiseen vaikuttavia tekijöitä.

Menetelmänä hyödynnetään myös asiantuntijahaastatteluja, joiden avulla täydennetään kokeellisista havainnoista ja kirjallisuudesta saatavaa tietoa erityisesti käytännön asennusratkaisuihin ja käyttäjäkokemuksiin liittyen.

Työn lopputuloksena pyritään tuottamaan Inlook Oy:lle käytännöllinen ja toteuttamiskelpoinen ehdotus rakenteen parantamiseksi siten, että tuotteen akustinen suorituskyky säilyy, mutta likaantumis- ja samentumisongelmat voidaan minimoida.

1.3 Opinnäytetyön rajaus ja tekoälynkäyttö

Tässä opinnäytetyössä keskitytään kaksilasisen järjestelmäseinän likaantumisen ja samentumisilmiön selvittämiseen, eikä järjestelmän ääneneristävyyden parantaminen kuulu työn varsinaiseen tutkimusalueeseen. Koska ääneneristys on kuitenkin olennainen osa kyseistä tuotetta ja sen käyttötarkoitusta, työssä käsitellään akustiikkaan ja melun torjuntaan liittyviä tekijöitä ainoastaan yleisellä tasolla työn taustaa tukevana tietona. Varsinainen tutkimus painottuu sisäilman kosteuden käyttäytymiseen, rakenteen tiiveyteen sekä näiden tekijöiden vaikutuksiin lasien väliin muodostuvaan likaantumiseen.

Tutkimusasetelman ideoinnissa, työn jäsentelyssä ja otsikoinnissa on käytetty OpenAI:n ChatGPT:n versiota GPT-4-malli. Samaa ohjelmaa on käytetty myös tekstin kieliasun muotoilussa ja tarkistamisessa. Opinnäytetyön tekijä on vastuussa kaikesta opinnäytetyön sisällöstä ja muotoilusta.

2 Ääntä eristävät lasiset järjestelmäseinät

Tässä luvussa käsitellään järjestelmäseiniin liittyviä teknisiä ratkaisuja, käytettyjä lasimateriaaleja ja äänen käyttäytymistä rakenteissa. Tarkoituksena on luoda perusta opinnäytetyössä tutkittavalle tuotteelle ja sen toiminnallisille vaatimuksille.

Aluksi käydään läpi järjestelmäseinien käyttökohteita, profiilityyppejä ja lasiratkaisuja, joita hyödynnetään esimerkiksi toimistoissa ja julkisissa tiloissa. Tämän jälkeen tarkastellaan lasin rakennetta, valmistusmenetelmiä sekä laminoitujen lasien erityisominaisuuksia.

2.1 Järjestelmäseinien käyttökohteet ja ominaisuudet

Ääntä eristävät järjestelmäseinät ovat keskeinen osa nykyaikaisia tilaratkaisuja, joissa halutaan yhdistää avoimuus, tilan muunneltavuus ja akustinen eristys. Erityisesti toimistoissa, oppilaitoksissa ja muissa julkisissa tiloissa lasiseinät tarjoavat visuaalista keveyttä ja valoisuutta, samalla kun ne mahdollistavat tehokkaan ääneneristävyyden. Suunnittelun lähtökohtana on tilaajan tarve yhdistää esteettisyys ja toiminnallisuus ilman, että tilojen joustavuus kärsii.

Järjestelmäseinien suurimpia etuja on niiden muunneltavuus. Koska ne ovat helposti purettavia ja uudelleen asennettavia, tiloja voidaan mukauttaa vastaamaan muuttuvia tarpeita ilman suuria rakennusteknisiä muutoksia. Tämä ominaisuus on erityisen arvokas ympäristöissä, joissa tilankäytön tarpeet muuttuvat ajan myötä, kuten toimistoympäristöissä ja monikäyttöisissä oppimisympäristöissä.

Tilaaajille tärkeä ominaisuus on myös tuotteiden helppo ja nopea asennus. Järjestelmäseinät vaativat vain vähäisiä suojaustoimenpiteitä ja lyhyen asennusaajan, mikä tekee niistä kustannustehokkaita vaihtoehtoja perinteisiin kiinteisiin rakenteisiin verrattuna. Lisäksi ne mahdollistavat laajan valikoiman

pintamateriaaleja ja muotoiluvaihtoehtoja, joiden avulla voidaan toteuttaa tilaajan visuaalista ilmettä tukevia ratkaisuja.

Ääneneristävyyttä voidaan optimoida erilaisilla lasi- ja ovivalinnoilla, jotka vaikuttavat merkittävästi tilan akustisiin ominaisuuksiin. Tämä on olennaista erityisesti tiloissa, joissa tarvitaan yksityisyyttä ja työrauhaa, kuten neuvotteluhuoneissa ja avokonttoritiloissa. Oikeilla valinnoilla voidaan luoda tila, joka yhdistää avoimuuden ja yksityisyyden tasapainoisella tavalla, vastaten tilaajan tarpeisiin tehokkaasti. (1.)

2.1.1 Teknistä tietoa ääntä eristävästä järjestelmäseinistä

Ääntä eristäviä järjestelmäseiniä on saatavilla useita erilaisia vaihtoehtoja, jotka eroavat rakenteen, materiaalin ja ääneneristysominaisuuksien perusteella.

Järjestelmäseinien rakenne ja materiaalit

Järjestelmä seinät voivat joko olla umpinaisia tai kulkemisen tilojen välillä mahdollistavia. Profiilimateriaalit ovat yleisesti alumiinia ja puuta, joista alumiini tarjoaa keveyttä ja modernia ulkonäköä, kun taas puu tuo luonnollista ilmettä ja lämpöä tilaan. Järjestelmien ovi tyypit ovat yleensä käyntiovia tai liukuovia. Käyntiovet tarjoavat parempaa äänen eristävyyttä, kuin liukuovet, joiden ääneneristävyys ominaisuudet ovat yleensä heikommat.

Lasien ominaisuuksien valinta

- Huomioraidat, jotka parantavat lasiseinän havaittavuutta.
- Digiprintatut kuviot, joilla voidaan lisätä visuaalista ilmettä.
- Värilliset laminointikalvot, jotka tuovat yksityisyyttä ja tyyliä.
- Kaarevat lasit, jotka mahdollistavat erikoismuotoiset seinäratkaisut.
- Sähköisesti himmenevät lasit, jotka tarjoavat säädettävää yksityisyyttä.
- Pintakiinnitetyt listat, joiden avulla voidaan luoda erikokoisia ruudukkoja.

- Lasivalinnassa otetaan huomioon oven R_w -arvo, joka yleensä määrittää lasin ääneneristävyyden.

Ääntä eristävien käyntiovien ominaisuuksia

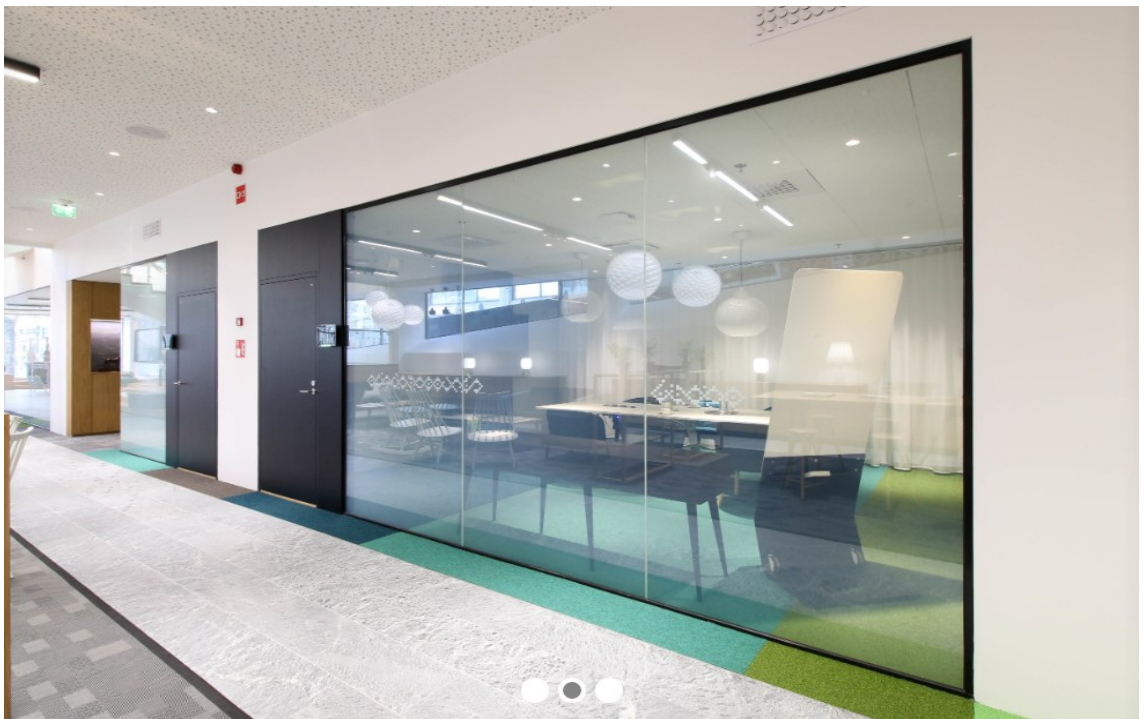
- Sähköpieli, joka helpottaa tekniikan vientiä huoneeseen.
- Umpiyläosa tai lasillinen rakenne vaikuttaa valoisuuden.
- Piilokiinnitetyt saranat tarjoavat esteettisen ilmeen.
- Portaaliövet ja L-karmilliset ovet ovat erityisiä rakenteellisia vaihtoehtoja, jotka antavat oville erilaisia ulkonäkövaihtoehtoja.
- Viilu- ja laminaattipinnat antavat oville erilaisia ulkonäkövaihtoehtoja.
- Lasillinen tai peilillinen ovilehti tuo mahdollisuuden valon läpäisyyn tai estetistiseen ilmeeseen.
- Sähkölukituksen työstöt mahdollistavat ovien integroinnin kulunvalvontajärjestelmiin.
- Yleisimmät käyntiovien R_w -arvot ovat 30–42 dB, mikä riittää tehokkaaseen ääneneristykseen useimmissa toimisto- ja neuvottelutiloissa.

Alumiiniset liukuovelliset järjestelmäseinät tarjoavat heikomman äänieristyksen verrattuna käyntiovellisiin ratkaisuihin. Liukuovien ääneneristävyys jää usein 30–36 dB tasolle, mikä on huomattavasti heikompi kuin käyntiovellisten järjestelmien R_w -arvot. Liukuövet ovat kuitenkin hyvä ratkaisu tiloihin, joissa tilankäyttö ja avattavuus ovat tärkeämpiä kuin äänieristys. (1.)

Kuvassa 1 ja 2 on Inlook Oy:n sähköisestihimmenevä järjestelmäseinä, jossa profiilit ovat alumiinia, lasit ovat ääntä eristäviä älylaseja ja ovi on äänieristävä käyntiovi sähköpielellä ja umpinaisella yläosalla.



Kuva 1. Himmennys päällä.



Kuva 2. Sähköisesti himmennettävä lasiseinä – yksi tila, monta tunnelmaa.

Kuvassa 3 on Inlookin alumiiniprofiilinen ääntä eristävä lasiseinä, johon on asennettu koko korkeuden kattava käyntiovi. Seinään on lisätty alumiinisia latta-
listoja visuaalisen ilmeen muuttamiseksi.



Kuva 3. Inlook Glazy

Kuvassa 4 on Inlook Oy:n järjestelmäseinä Slidy 30, jossa profiilit ovat alumiinia, lasit ovat ääntä eristäviä, joissa on huomio teippaus ja ovet ovat liukuovia. Tämän järjestelmän R_w -arvo on 30 dB.



Kuva 4. Slidy 30

Kuvassa 5 Inlook Woody, jossa profiilit ovat puuta, lasit ovat ääntä eristäviä ja ovena on ääntä eristävä käyntiovi lasillisella yläosalla. Ovilehdessä on lasi sekä kynnyksenä on laskeutuva kynnyks.



Kuva 5. Inlook Woody

Kuvassa 6 on Inlook Planet, jossa profiilit ovat puuta, lasit ovat ääntä eristäviä, ja jotka on liimattu profiilin pintaan. Ovena toimii ääntä eristävä käyntiovi, jonka ovilehdessä on lasi.



Kuva 6. Inlook Planet

Kuvassa 7 on Inlook Glazy Curved, jonka profiilit ovat alumiinia, lasit ovat ääntä eristäviä kaarevia laminoituja laseja ja ovena toimii ääntä eristävä käyntiovi.

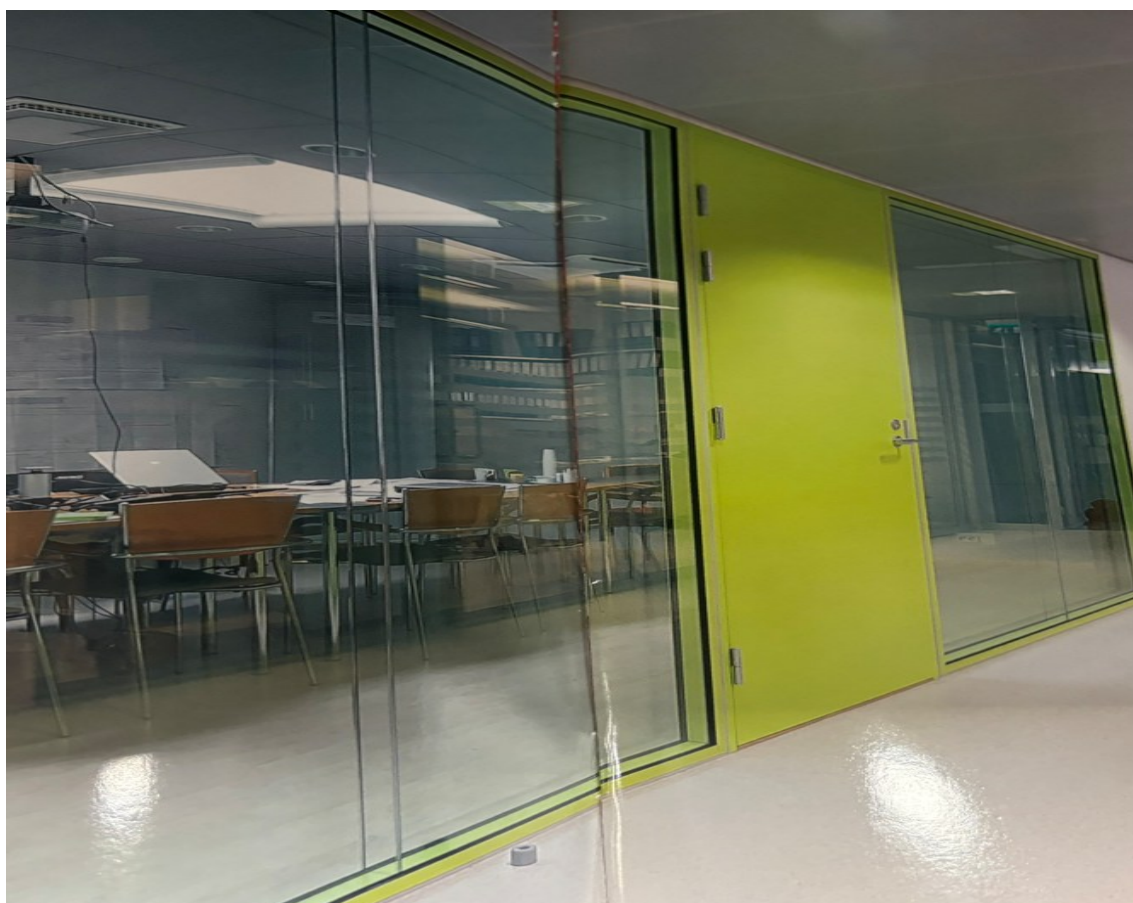


Kuva 7. Inlook Glazy Curved

Edellisten kuvien tarkoituksena on havainnollistaa ääntä eristävien lasiseinäjärjestelmien monimuotoisuutta.

2.2 Inlookin kaksilasinen järjestelmäseinä

Tässä opinnäytetyössä tarkastelun ja kehitystyön kohteena on Inlook Oy:n kaksinkertainen lasiseinäjärjestelmä, INLOOK GLAZY DOUBLE yhdistää tehokkaan äänieristyksen ja valonläpäisyn kahden eri paksuisen lasin sekä niiden väliin jäävän ilmatilan avulla. Laselementit voidaan saumata silikonilla tai saumalistalla, ja ovena on puinen ääntä eristävä erikoissaranaovi. Lasit voidaan valita teippauksilla, silkkipainatuksilla, hiekkapuhalluksilla, himmenevillä lasilla tai digipainatuksella erilaisia kuvioita. Kuvassa 8 on esitetty GLAZY DOUBLE -järjestelmä.



Kuva 8. INLOOK GLAZY DOUBLE

Teknistätietoa järjestelmästä

- Seinän paksuus: 100 mm
- Lasin leveys: 100–1500 mm
- Enimmäiskorkeus: 3000 mm
- 66.2 + 55.2 tai 55.2 + 44.2 laminoitu lasi Sound Control -kalvolla
- 8 mm + 10 mm karkaistu lasi
- Ääneneristävyys: R_w 43 dB, 66.2 + 55.2 + erikoissaranaovi. (2.)

Tuplalaisella järjestelmäseinällä on useita teknisiä ja työergonomisia etuja, jotka tukevat sen jatkokehittämistä ja laajempaa käyttöönottoa.

Yksi keskeisistä eduista on se, että järjestelmässä voidaan hyödyntää kahta kevyempää lasielementtiä esimerkiksi 5+5 mm, jolloin saavutetaan ilmaääneneristävyydeltään vastaava tai jopa parempi taso verrattuna yksittäiseen, raskaampaan laminoituun lasiin esimerkiksi 10+10 mm. Näin voidaan toteuttaa akustisesti tehokas rakenne merkittävästi kevyemmällä kokonaispainolla, mikä on erityisen tärkeää asennustyön ergonomian ja työturvallisuuden kannalta.

Raskaiden lasielementtien käsittely kuormittaa asentajia ja lisää rasitusvammojen riskiä. Esimerkiksi 10+10 mm lasielementti painaa kaksinkertaisesti verrattuna 5+5 mm lasielementtiin. Tuplalaisella ratkaisulla voidaan siis vähentää työkuormaa ja parantaa turvallisuutta työmaalla.

Ääneneristykseen kannalta saavutetaan lisähyötyjä silloin, kun tuplalaisessa järjestelmässä käytetään eri paksuisia laseja esimerkiksi 5 mm ja 6 mm. Eri paksuudet vaimentavat ääntä eri taajuusalueilla, mikä parantaa rakenteen kokonaistoimivuutta ja tasapainottaa äänenvaimennusta erityisesti puheäänialueella. Tämä parantaa järjestelmän ilmaääneneristävyttä ja tukee määräysten mukaisen äänitasoerojen $D_{nT,w}$ saavuttamista kohteessa. kaksilaisesta järjestelmästä äänitekniset ominaisuudet käsitellään tarkemmin luvussa kolme.

Yhteenvedona voidaan todeta, että tuplalaisella järjestelmäseinällä saavutetaan yhdistelmä, jossa akustinen suorituskyky, keveys ja asentamisen ergonomia tukevat toisiaan. Tämä tekee siitä suositeltavan ratkaisun erityisesti niissä rakennuskohteissa, joissa akustinen laatu ja työmaan käytännön toteutettavuus ovat keskeisiä tavoitteita. (3; 4.)

2.3 Vaatimukset uudenrakennuksen äänen eristävyydelle

Taulukossa 1 on esitetty ympäristöministeriön asetuksen vaatimukset uuden rakennuksen ääniympäristöstä. Asetuksessa määritellään myös määräykset opetustilojen, kokoustilojen, ruokailutilojen, hoitotilojen, harrastustilojen, liikuntatilojen ja toimistotilojen ääneneristykselle. Suoria ääneneristysarvoja ei kuitenkaan anneta, vaan asetuksessa todetaan, että tilat on suunniteltava ja toteutettava siten, että saavutetaan toimintaan nähden riittävän hyvä ääneneristys. (5.)

Taulukko 1. Vaatimukset uuden rakennuksen ääneneristykselle (Ympäristöministeriö, 2022)

6.2 Vaatimukset uuden rakennuksen ääneneristykselle (4 §)

4 § Vaatimukset uuden rakennuksen ääneneristykselle

Asuntojen sekä majoitus- ja potilashuoneiden ilma- ja askelääneneristyksen suunnittelussa ja toteutuksessa on noudatettava seuraavia lukuarvoja:

Huonetila	Pienin sallittu äänitaso-eroluku $D_{nT,w}$ (dB)	Suurin sallittu askelääni-tasoluku $L'_{nT,w} + C_{l, 50-2500}$ (dB)
Asuntojen, majoitus- tai potilashuoneiden välillä	55	53
Uloskäytävästä asuin-, majoitus- tai potilashuoneeseen	39	63

Jos asunto, majoitus- tai potilashuone kytkeytyy rakenteellisesti tiloihin, joissa syntyy voimakasta, erityisen häiritsevää tai pienitaajuista ääntä, riittävän ääneneristyksen toteutumiseen on kiinnitettävä suunnittelussa ja toteutuksessa erityistä huomiota. Impulssimaisen, kapeakaistaisen tai pienitaajuisen melun yhden tunnin keskiäänitaso ei saa ylittää nukkumiseen tai lepoon käytettävissä huoneissa 25 desibeliä.

Opetus-, kokous-, ruokailu-, hoito-, harrastus-, liikunta- ja toimistotilojen ääneneristys on suunniteltava ja toteutettava tilan käyttötarkoituksen huomioon ottaen siten, että niissä saavutetaan toimintaa vastaava riittävän hyvä ääniympäristö. Sisäänvedettyjen parvekkeiden, viherhuoneiden ja kattoterassien ääneneristys on suunniteltava ja toteutettava siten, että ääniympäristöstä ei aiheudu asukkaille haittaa.

Ympäristöministeriön vaatimuksiin perustuen on laadittu ohjeistava standardi SFS 5907:2022, jossa esitetään kolme akustista laatuluokkaa.

A1-luokka mahdollistaa akustiikaltaan tavanomaista paremman ääniympäristön. A2-luokka vastaa asetuksen ja ohjeistuksen vähimmäistasoa.

A3-luokkaa voidaan käyttää vanhojen rakennusten luokitteluun, kun niiden ominaisuudet halutaan todentaa mittauksin. Luokkaan A3 kuuluvat myös poikkeustilanteet, kuten suojelukohteet ja haastavat peruskorjauskohteet, joissa ääniympäristön parantaminen ei ole mahdollista, mutta sillä ehdolla, että ääniympäristö ei heikkene alkuperäisestä.

Taulukosta 2 voidaan tarkastella edellä mainittujen järjestelmäseinien soveltuvuutta laatuluokittain. Luokissa A1 ja A2 rakennuslupaa haettaessa on nimettävä akustinen suunnittelija, joka täyttää FISE:n pätevyysvaatimukset. Näissä luokissa lopullisen rakenteiden R_w -arvojen soveltuvuuden arvioi akustinen suunnittelija. (6.)

$D_{nT,w}$ -luvun määrittämisestä kerrotaan tarkemmin luvussa neljä.

Taulukko 2. Toimistotilojen pienimmät sallitut äänitasoerot $D_{nT,w}$ eri luokissa

5.4 Toimistot

5.4.1 Ilmaääneneristys - toimistot

Pienimmät sallitut äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ arvot eri luokissa (dB).

Tila	Luokka A1	Luokka A2	Luokka A3
	$D_{nT,w}$	$D_{nT,w}$	$D_{nT,w}$
Toimistohuoneesta ympäröiviin tiloihin yleensä	44	40	35
Toimistohuoneesta toiseen toimistohuoneeseen, kun välissä on ovi	42	40	30
Toimistohuoneesta käytävään tai aulaan, kun välissä on ovi	34	30	25
Kahden toisistaan seinillä erotetun avoimen toimistotilan välillä	44	40	35
Kahden toisistaan seinillä erotetun avoimen toimistotilan välillä, kun välissä on ovi	42	40	30
Toimistorakennuksessa kahden eri toimijan toimisto-, neuvottelu- ja vastaavien huoneiden välillä	55	52	48
Toimistorakennuksessa kahden eri toimijan käytävien välillä	40	34	30
Toimistohuoneesta toiseen toimistohuoneeseen toimistohotellissa	52	48	44
Toimistohuoneesta toiseen toimistohuoneeseen toimistohotellissa, kun välissä on ovi	44	42	40
Toimistohuoneesta käytävälle toimistohotellissa, kun välissä on ovi	40	34	30
Neuvottelutilasta, vetäytymistilasta tai taukotilasta toiseen vastaavaan tilaan tai toimistohuoneeseen	52	48	44
Neuvottelutilasta, vetäytymistilasta tai taukotilasta toiseen vastaavaan tilaan, toimistohuoneeseen tai avoimeen toimistotilaan, kun välissä on ovi	44	42	40
Neuvottelutilasta, vetäytymistilasta tai taukotilasta käytävälle, kun välissä on ovi	40	34	30
Eryistä luottamuksellisuutta ja puheyksityisyyttä edellyttävistä tiloista ympäröivään tilaan yleensä	55	52	48
Eryistä luottamuksellisuutta ja puheyksityisyyttä edellyttävistä tiloista käytävälle, kun välissä on ovi	48	44	40
Kerrosten välillä yleensä ¹	55	52	52

¹ Ei koske tilanteita, joissa toimistorakennuksessa on useita kerroksia oleva aula. Tällöin noudatetaan taulukon muilla riveillä annettuja ohjeita.

2.4 Lasi materiaalina

Lasi on kestävä ja ekologinen rakennusmateriaali, joka säilyttää ominaisuuksensa pitkään ja vaatii vain vähän ylläpitoa. Se on monipuolinen ja visuaalisesti näyttävä materiaali, jota voidaan kierrättää laajasti, mukaan lukien pinnoitettu ja laminoidut lasit (7).

2.4.1 Kirkas floatlasi

Floatlasi valmistetaan pääasiassa hiekasta, soodasta ja kalkkikivistä, mutta siihen lisätään pieniä määriä myös dolomiittia ja maasälpää. Tuotantoprosessi on jatkuva. Sula lasi virtaa sulatusuunista sulan tinan päälle, missä se muodostaa

tasomaisen ja pitkän lasilevyn. Tämän jälkeen lasilevy jäädytetään ja leikataan haluttuihin mittoihin. Floatlasi on kirkasta, läpinäkyvää ja tasapaksuista, ja sillä on kiiltävät ja kestävä pinnat. Sen ominaisuuksiin kuuluu vääristymättömyys, joten se sopii erinomaisesti tilanteisiin, joissa tarvitaan selkeää läpinäkyvyyttä.

Floatlasin yleisin tehdastoimituskoko on 3210 x 6000 mm, mutta saatavilla on myös pienempiä ja suurempia kokoja. Lasin paksuus vaihtelee tyypillisesti välillä 0,9–19 mm. Floatlasi soveltuu monenlaisiin käyttökohteisiin, kuten ikkunoihin, huonekaluihin, ajoneuvoihin ja elektronisiin laitteisiin. Rakennuksissa sitä käytetään yleisimmin ikkunoissa, ovissa, julkisivuissa ja katoissa, joissa paksuus on yleensä 3–12 mm.

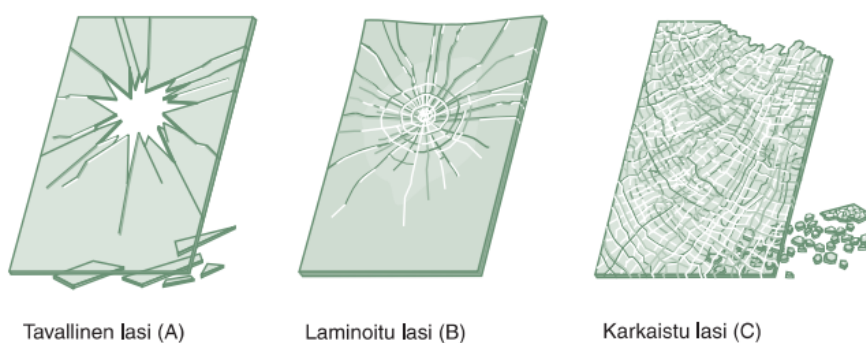
Floatlasi toimii myös jatkojalostettujen lasituotteiden perustana. Näiden tuotteiden ominaisuuksia voivat olla esimerkiksi lämmöneristys, auringonsuojaus, pälonsuojaus, melunvaimennus, turvaominaisuudet, itsepuhdistuvuus tai koristeellisuus. Floatlasia voidaan myös pinnoittaa, karkaista, laminoida, taivuttaa, silkkipainaa, koristemaalata tai hopeoida peileiksi. (3.)

Tasolasi valmistetaan pääasiassa float-menetelmällä. Float-menetelmä tarjoaa muihin menetelmiin verrattuna merkittäviä etuja, kuten lasin pinnan ja laadun tasaisuuden. Vaikka joitakin erikoislaseja, kuten kuvio- ja lankalaseja, valmistetaan edelleen valssaamalla, koneellinen vetomenetelmä on lähes kokonaan syrjäytetty float-menetelmän yleistyessä. (8.)

2.4.2 Laminoitulasi

Laminoitu lasi on turvalasi, joka koostuu kahdesta tai useammasta lasilevystä. Lasien välissä on elastinen kalvo, joka voi olla esimerkiksi PVB- tai EVA-kalvo. Tämän rakenteen ansiosta laminoituneen lasin rikkoutuessa kalvo sitoo sirpaleet itseensä, jolloin lasi pysyy yhtenäisenä eikä sirpaleita pääse putoamaan. Tämä ominaisuus lisää turvallisuutta sekä suojaa tuulelta ja sateelta rikkoutumistilanteissa.

Yleensä rikkoutuessa vain yksi lasikerros vaurioituu, mikä helpottaa vaurioituneen osan vaihtamista. Laminoidulla lasilla on myös muita hyötyjä, kuten parantunut UV-suojaus, parempi äänen eristävyys (riippuen kalvovalinnasta) ja kyky kestää suuria lämpötilaeroja. Jos rakenteessa tarvitaan erityistä mekaanista lujuutta tai taivutusmurtolujuutta, voidaan käyttää karkaistua lasia laminoidun rakenteen osana. (5.)



Kuva 9. Lasien rikkoontumistavat esitettynä (8).

2.4.3 Äänieristyskalvo

Laminoitu lasi voi parantaa äänen eristävyttä erityisesti korkeiden äänen taajuuksien osalta. Tämä johtuu siitä, että laminoitujen lasien taivutusjäykkyys on pienempi verrattuna saman paksuisiin normaaleihin lasilevyihin. Laminoiduissa laseissa on kuitenkin merkittäviä eroja ääneneristävyyden suhteen, ja erityisesti äänen eristämiseen suunnitelluilla laminoitikalvoilla voidaan saavuttaa huomattavia parannuksia rakenteen ääneneristävyyteen (9).

Taulukossa 3 käy ilmi eripaksuisten äänen eristyskalvolla varustettujen laminoitujen lasien ääneneristysarvot. Esimerkiksi

4+4 laminoitu lasi (8,8Lp)

- Ääneneristys 37 dB

- Paino: 20,8 kg/m²

8+8 laminoitu lasi (16,8Lp)

- Ääneneristys 41 dB
- Paino: 40,8 kg/m²

Näistä esimerkeistä voidaan todeta, että lasin paksuuden ja painon kasvattaminen parantaa ääneneristyskykyä. Lasinpainon kaksinkertaistuksessa R_w -arvo on kasvanut neljällä desibelillä 37:stä 41:hen. Tämä osoittaa, että raskaammat ja paksummat laminoidut lasit tarjoavat paremman äänen eristävyden.

Äänen eristämisen kannalta on siis olennaista valita lasityyppi siten, että painon lisäys vastaa saavutettavaa ääneneristyksen paranemista. Tämä huomio on tärkeä erityisesti rakennuskohteissa, joissa sekä ääneneristys että rakenteellinen keveys ovat tärkeitä vaatimuksia. (3).

Taulukko 3. Optiphon-kalvolla laminoitujen lasien teknistä tietoa (3).



Ääneneristyslasit

Tuotenimi Tuotekoodi katso sivu 5+9	Rak.	Ääneneristys ¹⁾		Turvalasi- luokka	Murronsuo- jaluokka	Mittatiedot		Mittaus- laitos ¹⁾
		R_w dB	R_w+C_w dB			Paks. mm	Paino kg/m ²	
Pilkington Optiphon [®] (Lp)	1K							
8,8Lp (44.2)	1	37	35	1(B)1	P2A	9	20,8	ift Rosenheim
10,5Lp (55.1)	1	39	36	1(B)1	P1A	11	25,0	ift Rosenheim
10,8Lp (55.2)	1	38	35	1(B)1	P2A	11	25,8	ift Rosenheim
12,8Lp (66.2)	1	40	37	1(B)1	P2A	13	30,8	SWA Aachen
16,8Lp (88.2)	1	41	38	1(B)1	P2A	17	40,8	ift Rosenheim

3 Akustiikan perusteet ja äänen eristys

Kirjallisissa lähteissä ääntä kuvataan kimmoisassa väliaineessa vallitsevaksi painevaihteluksi, jonka ihminen vastaan ottaa kuuloaistin välityksellä, jos kimmoisassa väliaineessa painevaihtelu taajuus on kuuloalueella (10).

Ilmassa etenevää ääntä kutsutaan ilmaääneksi, se kulkee aaltoliikkeenä ilmassa, eli ilman paineen vaihtelua. ilma äänen tuottamiseen tarvitaan vähemmän energiaa, kuin muiden äänien tuottamiseen. Värähdys liike, kun kappale suorittaa edestakaisin liikettä, sen sanotaan olevan värähdysliikkeessä. Liiketila siirtyy kappaleesta ympäröivään kimmoisaan väliaineeseen, esim. ilmaan ja etenee siinä aaltoliikkeenä eli ääni tarvitsee väliaineen. Tyhjiössä ääni ei voi edetä. Aaltoliike sisältää energiaa. Aaltoliikkeessä siirtyvä energia esiintyy sekä massan liittyvänä liike-energiana että kimmoisuuteen liittyvänä potentiaalienergiana. Ääni ja lämpö ovat kokemusperäisesti aivan erillisiä asioita, mutta kuitenkin fysikaalisesti molemmissa tapauksissa on kyse molekyylien liikkeistä, joskin erityyppisistä ja molemmat ilmiöt sisältävät energiaa. Ääni on energian muoto, joka absorptio esim. ääntä imevä villa levyn vaikutuksesta saattaa muuttua lämmöksi. (11, s. 136.)

Äänen nopeus ilmassa on riippumaton taajuudesta, mutta ilman lämpötila vaikuttaa äänen nopeuteen. Huoneen lämpötilassa äänen nopeus ilmassa on noin 340–345 m/s (9).

$$c = 331 + 0,6t$$

- c on äänen nopeus yksikössä m/s.
- t on lämpötila asteina.

Ääniaallot ovat niin sanotusti kimmoisia eli elastisia aaltoja, joissa värähdysliike etenee joko pitkittäisaaltoina ”tiheysaallot” tai poikittaisaalloina ”taivutusaallot”.

Pitkittäisaallossa hiukkaset värähtelevät aallon etenemissuuntaan nähden joko täysin tai lähes kohtisuorassa suunnassa. Tämä aiheuttaa väliainetta vuorotellen tihentäviä ja harventavia alueita, jotka etenevät aallon mukana. Pitkittäisaallot voivat edetä kaasuissa esim. ilmassa, nesteissä ja kiinteissä aineissa.

Poikittaisaaltojen tunnusomainen piirre on, että värähtely tapahtuu etenemissuuntaa vastaan kohtisuorassa tasossa. Poikittaisaalto voi edetä vain kiinteässä aineessa, koska se vaatii rakenteellisen jäykkyyden. Poikittaisaalto syntyy esimerkiksi materiaalin taipumisen seurauksena. Sitä esiintyy etenkin ohuissa levyissä, seinärakenteissa ja pinnoissa, joissa syntyy taipumaa, kuten laatoissa tai putkissa. (11, s. 137.)

Aaltoliikkeen etenemisnopeus riippuu sekä väliaineen ominaisuuksista että aallon taajuudesta (12). Aaltojen etenemisnopeus ja taajuus liittyvät toisiinsa seuraavalla yhtälöllä

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- Äänen nopeudella c
- Taajuudella f
- Ilmäänen pitkittäisaallolla λ

3.1 Äänen korkeus ja voimakkuus

Ääni on värähtelyä, jolla on kaksi keskeistä ominaisuutta.

- Äänen voimakkuus, jonka yksikkö on dB.
- Äänenkorkeus, jonka yksikkö on Hz.

Äänenvärähtelytaajuuden mittayksikkö aaltoliikkeessä on hertsi Hz. Taajuus on 1 Hz, kun tapahtuu yksi värähdys sekunnissa. Kuuloaistimus syntyy, kun ilmanpaineen värähtely saa korvan rumpukalvon värähtelemään. Jos värähtely on tiheää, koetaan ääni korkeaksi ja pienitaajuinen värähtely koetaan matalina

ääninä (11). Ihminen havaitsee äänet, joiden taajuus on 20...20000 Hz. Miehen puhetaajuus on yleensä noin 100 Hz ja naisen kaksinkertainen (13). Taulukossa 4 on esitetty eri äänen taajuuksia ja niiden aallonpituuksia.

$$f = \frac{n}{T}$$

- n on värähtelyiden määrä
- T on ajanjakso lähde (9).

Taulukko 4. Äänen taajuuksia ja aallonpituuksia

Äänen taajuus, hertsi, Hz	Äänilähde	Aallonpituus
20	Kuuloalueen alaraja	17 m
100	Miehen puheäänen perustaajuus	3,4 m
200	Naisen puheäänen perustaajuus	1,7 m
500	Keskitaajuus	68 cm
4000	Puheäänen konsonantit	17 cm
8000	Musiikin diskanttialue	4 cm
20 000	Heinäsiirakan siritys	1,7 mm

Desibeli-asteikolla kuvataan äänen voimakkuutta. ihmiskorva ei pysty kuulemaan 0-desibelin ääniä, kun taas yli 85 desibelin äänet saattavat aiheuttaa vaurioita ihmisen kuullolle. Kaikki pinnat absorboivat ääniä, jolloin ne vaimenevat. suora ääni vaimenee matkan kasinkertaistuessa noin 6 dB. Äänen voimistumisen kuuloaisti arvioi noin kaksinkertaiseksi, kun äänenpaineentaso nousee noin 10 dB. Taulukossa 5 on esitetty erilaisia ääniä ja niiden voimakkuuksia desibeli-asteikolla. (13.)

Taulukko 5. Taulukossa on lueteltu ääniä ja niiden voimakkuuksia.

Äänitaso dB	Äänilähde	Oleskeluaika enintään
0	Kuulokynnys	
20...25	Makuuhuoneiden taustamelu yöaikaan	
30...40	Ilmastoinnin taustamelu	
60...70	Puheääni huoneessa	
70...80	Voimakas puheääni, liikenne	8 tuntia
85...90	Moottoripyörä	2...4 tuntia
90...110	Disco tai rock-konsertti	2 tuntia...1 minuutti
110...130	Kipukynnys	Oleskelua ei suositella

3.2 Rakennusakustiikan sovellukset

Rakennuksissa ilmaääntä voivat tuottaa esimerkiksi puhe, musiikki, äänentoistolaitteet sekä erilaiset tekniset järjestelmät. Ilmaäännet saavat tilan rakenteet, kuten seinät, ylä- ja alapohjan, värähtelemään, mikä puolestaan synnyttää ilman värähtelyä myös rakenteiden toisella puolella. Tämä ilmiö mahdollistaa äänen siirtymisen tilasta toiseen rakenteiden välityksellä. Ilmaääneneristyksen tarkoituksena on vähentää tätä äänen siirtymistä. Mitä parempi tilojen välinen ilmaääneneristys on, sitä vähemmän ääni kantautuu viereisiin tiloihin. (5.)

Melu tarkoittaa ääntä, joka koetaan häiritseväksi, tarpeettomana tai jopa haitalliseksi. Sen erityispiirteet liittyvät äänen ajalliseen vaihteluun ja taajuusominaisuuksiin, jotka voivat lisätä sen häiritsevyyttä. Näitä piirteitä ovat muun muassa kapeakaistaisuus ja impulssimaisuus.

Kapeakaistainen melu tarkoittaa ääntä, joka keskittyy suppealle taajuusalueelle, jolloin se voi kuulostaa yksittäiseltä, korostuneelta säveleltä. Tällainen melu voi olla erityisen ärsyttävää, koska se erottuu muusta äänimaailmasta.

Impulssimainen melu puolestaan koostuu lyhyistä, äkillisistä äänistä, kuten kolahduksista tai iskulyönneistä. Sen nopea ja voimakas vaihtelu tekee siitä helposti havaittavan ja usein muita ääniä häiritsevemmän. (5.)

Ilmaääneneristys tarkoittaa rakennusosan kykyä estää äänen siirtymistä ilman välityksellä tilasta toiseen. Se on erityisen tärkeä tekijä tiloissa, joissa vaaditaan hyvää akustiikkaa ja yksityisyyttä, kuten toimistoissa, asunnoissa ja oppilaitoksissa. Ilmaääneneristystä arvioidaan mittaamalla äänenpainetasojen erotusta lähetys- ja vastaanottotiloissa, ja sen tehokkuus riippuu sekä rakenteen massasta, tiiviyydestä että käytetyistä materiaaleista.

Ilmaääneneristys (R) kuvaa rakennusosan, kuten väliseinän, ikkunan tai oven, kykyä estää äänen siirtymistä tilojen välillä. Se määritetään vertaamalla rakenteeseen osuvan ja sen läpi kulkevan äänitehon suhdetta

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \text{ssä}$$

- W_i = Rakenteeseen osuva ääniteho.
- W_t = Rakenteen toiselle puolelle kulkeutuva ääniteho.

Mitä pienempi on suhde W_t / W_i sitä suurempi on ilmaääneneristys R. Tämä tarkoittaa, että mitä vähemmän ääntä pääsee rakenteen läpi, sitä parempi on sen ääneneristys.

Esimerkiksi

- Jos $W_t/W_i=0.1$, niin $R = 10$ dB
- Jos $W_t/W_i=0.001$, niin $R = 30$ dB
- Jos $W_t/W_i=0.000001$, niin $R = 60$ dB

Tämä havainnollistaa, kuinka pienikin muutos äänen siirtymässä voi vaikuttaa merkittävästi ilmaääneneristykseen.

Ilmaääneneristys on tärkeä osa rakennusten akustiikkasuunnittelua, ja sen tehokas toteutus edellyttää ymmärrystä sekä absorptiosta että ääneneristyksestä. Massiiviset rakenteet tarjoavat parhaan ilmaääneneristyksen matalilla taajuuksilla, kun taas monikerrosrakenteet ja ilmapälit estävät tehokkaasti korkeiden taajuuksien siirtymistä.

On tärkeää erottaa äänen absorptio ja ilmaääneneristys toisistaan, sillä vaikka ne molemmat vaikuttavat tilan akustiikkaan, niiden toiminta ja tarkoitus ovat erilaisia.

Absorptio vaimentaa ääntä huonetilassa estäen äänen heijastumista ja jälkikaiuntaa. Se on lähinnä pintamateriaalien ominaisuus, kuten akustiset paneelit ja matot.

Ilmaääneneristys estää äänen siirtymistä tilasta toiseen ja on tiiviiden rakenteiden ominaisuus, kuten seinien, ikkunoiden ja ovien kyky estää äänen kulku.

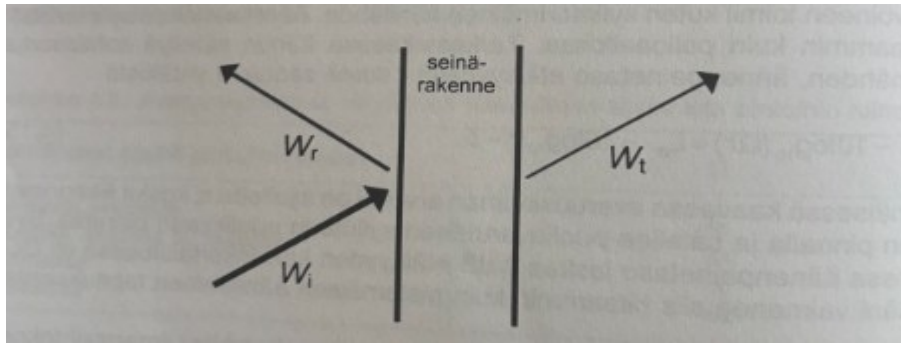
Äänen absorptio määritellään seuraavasti

$$\alpha = \frac{W_i - W_r}{W_i}$$

Missä

- α = Absorptiokerroin
- W_i = Rakenteeseen osuva ääniteho
- W_r = Rakenteesta heijastuva ääniteho.

Kuvassa 10 esitetään, kuinka osa äänitehosta heijastuu rakenteesta takaisin lähetysalueelle (W_r), ja osa siirtyy rakenteen läpi toiselle puolelle (W_t). Tämä selvittää, kuinka absorptio ja ääneneristys toimivat yhdessä mutta erikseen. (12.)



Kuva 10. Äänienergian jakautuminen (12).

Äänitasoeroluku D_{nT} – Määritelmä ja käyttö

Äänitasoeroluku D_{nT} on yksi kansainvälisessä standardissa ISO 717-1 (2017) esitellyistä mittaluvuista, joita käytetään rakennusten huoneilojen välisen ilma-ääneneristävyyden arviointiin. Se perustuu äänenpainetasojen erotukseen lähety- ja vastaanottohuoneen välillä, ja se on normalisoitu mittaluku, jossa mitaustulos oikaistaan standardoidun jälkikaiunta-ajan avulla.

D_{nT} ilmaisee siten äänen siirtymisen tehokkuuden huoneesta toiseen ottaen huomioon äänen vaimenemisen vastaanottohuoneessa.

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

missä

- L_1 = äänenpainetaso lähetyshuoneessa (dB)
- L_2 = äänenpainetaso vastaanottohuoneessa (dB)
- T_0 = vertailujälkikaiunta-aika (0,5 s)
- T = mitattu jälkikaiunta-aika vastaanottohuoneessa (s)

Tämä mittaluku kuvaa siis äänenpainetasojen erotusta huoneiden välillä oikaistuna vastaanottohuoneen äänenvaimennusominaisuuksien mukaan.

Ääneneristävyyden yksilukuarvon eli standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ laskennassa käytetään vertailukäyrämenettelyä samalla tavalla kuin rakennusosan ilmaääneneristysluvun R_w laskennassa. Vertailukäyrän arvot on esitetty taulukossa 6.

Standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ määrittämisessä hyödynnetään äänitasoeroja D_{nT} , jotka on laskettu mitatuista äänenpainetasoista ja vastaanottohuoneen jälkikaiunta-ajasta. Vertailukäyrä sovitetaan D_{nT} -arvoihin yksilukuarvon määrittämiseksi. (4.)

Taulukko 6 Vertailukäyrän arvot standardoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ määrittämiseksi.

Taulukko 3.2. Ilmaääneneristävyyden vertailukäyrän arvot ilmaääneneristysluvun R_w ollessa 55 dB.

Keskitaajuus [Hz]	Vertailukäyrän arvo [dB]	Keskitaajuus [Hz]	Vertailukäyrän arvo [dB]
100	36	630	56
125	39	800	57
160	42	1000	58
200	45	1250	59
250	48	1600	59
315	51	2000	59
400	54	2500	59
500	55	3150	59

3.3 Jälkikaiunta-ajan perusteet ja merkitys akustiikassa

Jälkikaiunta-aika (T) kuvaa, kuinka nopeasti äänenvoimakkuus vähenee tilassa sen jälkeen, kun äänilähde on sammutettu. Se määritellään ajanjaksona, jonka aikana äänenpainetaso laskee 60 dB lähtötasostaan. Jälkikaiunta-ajan hallinta on erityisen tärkeää sisätiloissa, joissa akustiikan laatu vaikuttaa suoraan puheen erotettavuuteen, musiikin kuuntelukokemukseen ja yleiseen käyttömukavuuteen.

Jälkikaiunta-ajan määrittely ja laskeminen

Jälkikaiunta-aika voidaan laskea Sabinen kaavalla, joka pätee erityisesti diffuusiin huoneisiin eli tiloihin, joissa ääni heijastuu tasaisesti kaikista pinnoista.

$$T = 0.16 \frac{V}{A}$$

- T= Jälkikaiunta-aika (s)
- V= Huoneen tilavuus (m³)
- A = Absorptioala (m²·Sab)

Absorptioala lasketaan seuraavasti

$$A = \sum S_i \alpha_i$$

- S_i = Pinnan pinta-ala (m²)
- α_i = Pinnan absorptiokerroin

Tämä kaava osoittaa, että mitä suurempi on huoneen tilavuus (V) tai mitä pienempi on absorptioala (A), sitä pidempi on jälkikaiunta-aika. Toisin sanoen, kaiunta-aika pitenee suurissa ja kovapintaisissa tiloissa ja lyhenee pienissä ja hyvin vaimennetuissa huoneissa.

Lyhyt jälkikaiunta-aika parantaa puheen selkeyttä ja ymmärrettävyyttä, mutta voi tehdä tilasta "kuivan" ja musikaalisesti epätydyttävän. Soveltuu erityisesti puhetiloihin kuten luokkahuoneisiin ja kokoustiloihin (0,5–1,0 s).

Pitkä jälkikaiunta-aika tekee äänestä täyteläisen ja soinnukkaan, mutta heikentää puheen erotettavuutta. Sopii musiikkitiloihin kuten konserttisaleihin ja kirkkoihin (1,5–2,5 s).

Optimaaliset jälkikaiunta-ajat erilaisille tiloille

- Luokkahuoneet ja toimistot: 0,4–0,8 s
- Teatterit ja auditoriot: 0,8–1,2 s

- Konserttitalit: 1,8–2,2 s

Absorptiomateriaalit käytetään äänen imeyttämiseen ja jälkikaiunnan vähentämiseen. Esim. akustiset paneelit, matot, verhot ja huokoiset kattolevyt.

Absorptiomateriaalien vaikutus perustuu niiden kykyyn muuntaa äänen energia lämmöksi.

Diffuusioelementit epätasaiset pinnat hajottavat ääntä eri suuntiin, jolloin jälkikaiunta ei kohdistu yhdelle alueelle. Parantaa kuuntelumukavuutta ja äänikentän tasaisuutta ilman merkittävää äänen vaimentamista.

Huonegeometria epäsymmetriset muodot ja kaltevat pinnat estävät äänen kerrääntymistä yhteen kohtaan. Tasainen äänikenttä vähentää jälkikaiunnan häiritsevyyttä. (12.)

3.4 Yksilasisten ja kaksilasisten järjestelmäratkaisuiden akustiikka

Ääneneristyksen näkökulmasta yksilasiset ja kaksilasiset lasirakenteet eroavat toisistaan merkittävästi sekä rakenteensa että toiminnallisuutensa osalta.

Yksilasisessa järjestelmässä ääneneristävyyteen vaikuttaa ensisijaisesti lasin massa eli paksuus. Fysikaalisesti tunnettu sääntö on, että lasin massan kaksinkertaistuessa ääneneristävyys paranee keskimäärin noin 6 desibeliä, erityisesti matalilla taajuuksilla. Tämä ilmiö perustuu massalain vaikutukseen ja pätee niin kauan kuin ei ylitetä niin sanottua koinstenssitaajuutta, jonka jälkeen lasin jäykkyys alkaa vaikuttaa äänen läpäisevyyteen negatiivisesti. Paksumpi lasi on rakenteellisesti jäykempi, mikä siirtää koinstenssitaajuuden alemmalle taajuusalueelle ja saattaa siten heikentää vaimennusta tietyillä taajuuksilla.

Kun lasia laminoidaan, esimerkiksi yhdistämällä kaksi 4 mm lasilevyä kalvon avulla, saadaan aikaan rakenne, jonka taivutusjäykkyys on pienempi kuin yhdellä 8 mm monoliittisellä lasilla. Tämä alentunut jäykkyys siirtää

koinstensitaajuuden ylemmäs, jolloin korkeataajuisten ääniaaltojen vaimennus paranee. Näin ollen laminoitu lasi voi tietyillä taajuusalueilla eristää ääntä tehokkaammin kuin samanpainoinen, paksumpi lasi.

Kaksilasisessa järjestelmässä äänen eristävyttä voidaan parantaa huomattavasti optimoimalla sekä lasien paksuudet että niiden välinen etäisyys. Käytännöllä eripaksuisia laseja esim. 5 mm ja 6 mm, vähennetään järjestelmän taipumusta resonanssiin, sillä lasit värähtelevät eri taajuuksilla eivätkä pääse vahvistamaan toistensa resonanssitaajuuksia. Tällainen rakenne toimii tehokkaammin erityisesti laajalla taajuusalueella, kuten puhe- ja toimistoympäristön äänissä.

Lisäksi lasien välinen etäisyys vaikuttaa ratkaisevasti äänen eristävyteen. Mitä suurempi etäisyys lasielementtien välillä on, sitä alemmalle siirtyy rakenteen resonanssitaajuus. Esimerkiksi 20 mm lisäys lasien välissä saattaa parantaa ääneneristävyttä vain hieman, mutta useiden kymmenien millimetrien etäisyyden kasvattaminen voi tuottaa merkittävän parannuksen. Näillä periaatteilla saavutetaan huomattavia hyötyjä erityisesti kaksilasisissa järjestelmäseinissä, kuten Inlook Oy:n kehittämässä tuplalasillisessa järjestelmässä, jossa keveys, eripaksuisten lasien käyttö ja optimoitu rakenne yhdistyvät tehokkaaseen äänen vaimennukseen. (3.)

Kaksi lasisten järjestelmäseinien akustinen vahvuus perustuu kaksinkertaiseen rakenteeseen, jossa hyödynnetään massa–jousi–massaperiaatetta. Lasikerrokset toimivat massoina ja niiden välinen ilmatila toimii jousena. Tällaisella rakenteella on ominaistaajuus, jonka yläpuolella ääneneristys paranee nopeasti. Ominaistaajuuden suuruuteen vaikuttavat lasikerrosten pintamassat ja ilmavälin leveys: suurempi massa ja leveämpi ilmarako siirtävät ominaistaajuuden alemmaksi ja parantavat ääneneristystä laajemmalla taajuusalueella.

Ääneneristys ei kuitenkaan parane rajattomasti. Kun äänen aallonpituus on pieni verrattuna lasien väliseen ilmatilaan, ilmaväli lakkaa toimimasta tehokkaana jousena. Tällöin lasikerrosten eristävyttä voidaan arvioida laskemalla niiden yksittäiset ääneneristävydet yhteen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että

lasiseinän ilmavälin leveyden tulee olla sopivassa suhteessa niihin taajuuksiin, joita pyritään eristämään.

Kaksinkertaisen lasiseinän kokonaisten ääneneristysominaisuuksien arvioimiseksi lasketaan ensin molempien lasikerrosten eristävydet erikseen. Laskennassa huomioidaan myös tarvittavat korjaukset, jotta saadaan mahdollisimman tarkka kuva rakenteen käyttäytymisestä erityisesti matalilla ja korkeilla taajuuksilla. (4.)

Yhteenvetona voidaan todeta, että yksilasiset rakenteet voivat olla akustisesti tehokkaita oikean massan ja laminoinnin avulla, mutta kaksilasiset järjestelmät tarjoavat laajempia säätömahdollisuuksia ja paremman suorituskyvyn.

4 Sisäilman olosuhteet ja pöly

Tässä luvussa käsitellään sisäilman pölyä, kosteutta ja lämpötilavaihteluita, joilla on merkittävä vaikutus lasirakenteiden toimivuuteen ja likaantumiseen. Luvussa avataan ensin, mistä ilmassa leijuva pöly koostuu, mistä sitä syntyy ja miten se käyttäytyy sisätiloissa. Erityistä huomiota kiinnitetään rakennuskohteiden olosuhteisiin, joissa pölyä voi esiintyä runsaasti ja hallitsemattomasti.

Ilmanvaihdon toiminta, paine-erot sekä ilmankosteus vaikuttavat siihen, miten pöly pääsee siirtymään rakenteisiin. Luvussa tarkastellaan näitä ilmiöitä rakenteellisesta näkökulmasta, ja selvitetään miten olosuhteet voivat edistää pölyn ja kosteuden kertymistä lasielementtien väliin.

4.1 Ilmassa oleva pöly

Pöly koostuu pienistä, kiinteistä hiukkasista, jotka voivat leijua ilmassa keveysensä vuoksi. Hieno pöly on usein ihmissilmälle näkymätöntä ja havaittavissa vain suurina pitoisuuksina. Pienen kokonsa ansiosta pöly voi pysyä ilmassa jopa 12 päivää. Vaikka pölyä ei aina näe, sen voi tunnistaa hajusta, kuten betonipölyn aiheuttamasta ”betonin hajusta” (14).

Sisäilmassa saattaa esiintyä pölyjä ja kuituja. Rakennus materiaaleista irtoaa ilmaan pölyä. Pölyäviä rakennus materiaaleja ovat esimerkiksi betoni, sementti, kipsi. Ilman kuitu lähteitä ovat rakentamisessa käytetyt mineraalivillat sekä ulkoilmasta kulkeutunut katupöly. Pölyä saattaa levitä tiloihin korjaus- ja rakennustöistä, tai pinnoittamattomilta, rasitetuilta betonipinnoilta.

Mineraalivillakuidut voivat olla peräisin erilaisista lasi- ja kivivillamateriaaleista, kuten lasivillasta, vuorivillasta tai kierrätetystä jätelasivillasta. Näitä kuituja vapautuu esimerkiksi ilmanvaihtojärjestelmien äänenvaimentimista, kuten koneista, kanavista sekä ilmansuodattimista. Lisäksi pinnoittamattomat tai vaurioituneet akustointilevyt ja mineraalivillaa sisältävät rakenteet, joissa materiaalia käytetään äänen-, palo- ja lämmöneristeenä, voivat olla kuitulähteitä.

Kuitujen irtoaminen voimistuu erityisesti materiaalin vanhetessa ja haurastuessa sekä mekaanisen rasituksen, ilmavirtauksen tai värinän vaikutuksesta. Nämä hiukkaset kuuluvat pääasiassa karkeisiin ja hengitettäviin hiukkasiin, joiden halkaisija on enintään 10 mikrometriä. Lisäksi hengitysilmassa esiintyy pienhiukkasia, joiden koko on enintään 2,5 mikrometriä. Näiden pienempien hiukkasten merkittävimmät lähteet liittyvät ulkoilman saasteisiin, kuten liikenteen päästöihin, energiantuotantoon ja paikallisesti puun pienpolttoon.

Muita pölyn lähteitä ovat mm. puupölyt ja muut orgaaniset materiaalit kuten puukuituvilla. (15.)

Katupöly koostuu pääosin autojen renkaiden kuluttamasta asfalttimateriaalista ja liikenteessä murskautuneesta hiekoitushiekasta. Lisäksi siihen sekoittuu pienempiä määriä autojen jarruista, renkaista ja muista osista irtoavaa hienojakoista materiaalia sekä ympäristöstä peräisin olevia kasvijäänteitä, siitepölyä, bakteereita ja homeita.

Katupöly ei rajoitu vain hiekoitetuille alueille, vaan hiekan ja pölyn liikkuminen kulkuvälineiden sekä kevyen liikenteen mukana voi siirtyä myös hiekoittamattomille alueille. Tämä lisää pölyn kertymistä ja leviämistä erityisesti keväällä, kun talvikauden hiekoitusmateriaali alkaa kuivua ja irrota.

Hiukkaskooltaan katupöly on pääasiassa karkeaa pölyä, eli sen tyypillinen hiukkaskoko ylittää 2,5 mikrometriä μm . Vain pieni osa koostuu hienojakoisista, halkaisijaltaan alle 2,5 μm kokoisista hiukkasista. (16.)

Vilkasliikenteisillä alueilla katupöly pääsee sisätiloihin monin eri tavoin. Se kulkeutuu sisälle esimerkiksi ikkunatuuletuksen aikana, epätiivien ikkunoiden raoista sekä ilmanvaihtojärjestelmän vuotokohtien kautta. Lisäksi pölyä kantautuu sisälle kengissä ja vaatteissa. Myös rakennuksen läheisyydessä sijaitsevat rakennus- ja maansiirtotyömaat voivat aiheuttaa tilapäisesti merkittäviä pölypäästöjä, jotka leviävät sisätiloihin. (15.)

Pölyhiukkaset ilmassa ovat noin 1 mm ja 0.01 μm kokoisia. Raja-arvon alle meneviä ilmassa leijuvia hiukkasia ei luetella pölyksi vaan kaasumaiseksi aineeksi. Suuret pölyhiukkaset laskeutuvat lähelle (14). Kuidut ovat halkaisijaltaan alle 3 μm :stä noin 8 μm :iin (15).

Suuret pölyhiukkaset laskeutuvat painovoiman vaikutuksesta lähelle niiden lähdettä, kun taas hienojakoinen pöly on huomattavasti haastavampi hallita (17).

Pölyn hallinta ja sen kulkeutuminen sisätiloissa on monimutkainen ilmiö, johon vaikuttavat paine-erot, ilmanvaihdon toiminta ja ilmankosteus. Sisäilman laatuun vaikuttavat epäpuhtaudet voivat olla peräisin rakennuksen rakenteista, sisätiloissa tapahtuvista toiminnoista, rakennusmateriaaleista sekä ulkoilmasta. Näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta pöly voi levitä rakennuksen eri osiin, ja sen hallinta edellyttää tarkkaa ilmanvaihdon suunnittelua ja ylläpitoa (18).

4.1.1 Ilmanvaihdon merkitys pölyn leviämisessä

Ilmanvaihdon tehtävänä on poistaa sisäilmassa olevia epäpuhtauksia ja tuoda tilalle raikasta ilmaa. Ilmanvaihtojärjestelmän toiminta perustuu paine-eroihin, jotka saavat ilman virtaamaan suuremmasta paineesta pienempään (19). Tämä ilmavirtaus vaikuttaa suoraan siihen, kuinka pölyhiukkaset liikkuvat rakennuksen eri tiloissa.

Paine-eroja syntyy rakennuksissa monista syistä, kuten koneellisen ilmanvaihdon toiminnasta, lämpötilaeroista ja ulkoilman vaikutuksesta. Koneellisessa ilmanvaihdossa puhaltimet ohjaavat ilman virtausta, mutta jos järjestelmä on epätasapainossa, se voi aiheuttaa hallitsemattomia ilmavirtauksia ja pölyn leviämistä. Esimerkiksi alipaineinen sisätila voi vetää ulkoilman pölyä rakenteisiin, kun taas ylipaineinen tila voi siirtää sisällä syntyvää pölyä muihin huoneisiin tai ilmanvaihtokanaviin (18).

Paine-erot voivat syntyä myös lämpötilaerojen vaikutuksesta. Lämmin ilma on kevyempää kuin kylmä, mikä aiheuttaa konvektiovirtauksia ja voi liikuttaa pölyä

huoneesta toiseen. Tämä ilmiö on erityisen merkittävä rakennuksissa, joissa on puutteellisesti tasapainotettu ilmanvaihto (19).

Rakennuksen ilmanvaihdon toimintahäiriöt, väärin säädetyt ilmavirrat ja ilma-
vuodot voivat johtaa siihen, että pöly kulkeutuu rakenteisiin ja ilmanvaihtojärjes-
telmiin. Jos rakennuksen sisällä vallitsee alipaine, ulkoilman pölyä voi päästä si-
sätiloihin esimerkiksi ilmanvaihtokanavien vuotokohtien kautta, Ikkunoiden ra-
oista ja epätiiviestä rakenteista ja ovien avautuessa ja sulkeutuessa, erityisesti
rakennustyömailla.

Ylipaine puolestaan voi levittää sisäilman pölyä muihin tiloihin ja ilmanvaihtojär-
jestelmään, jolloin pölyä voi kertyä esimerkiksi ilmanvaihtokanaviin, ilmastointi-
laitteisiin ja suodattimiin. (18.)

Ilmanvaihtojärjestelmän kunto vaikuttaa suoraan siihen, kuinka paljon pölyä kul-
keutuu sisäilmaan ja rakenteisiin. Huoltamaton ilmanvaihtojärjestelmä voi itses-
sään olla pölyn lähde, jos sen suodattimet ja kanavat ovat likaantuneet.

Sisäilman laadun kannalta on tärkeää varmistaa, että Ilmanvaihtokanavat puh-
distetaan säännöllisesti. Suodattimet vaihdetaan ajallaan. Ilmavirrat tasapaino-
tetaan, jotta ilma ei kuljeta pölyä väärin paikkoihin. Korvausilman sisäänotto jär-
jestetään, jotta ulkoilman pöly ei pääse hallitsemattomasti sisälle.

Jos ilmanvaihtojärjestelmää ei huolleta asianmukaisesti, se voi levittää pölyä ti-
lasta toiseen ja aiheuttaa sisäilmaongelmia. Tämä voi johtaa esimerkiksi tunk-
kaiseen sisäilmaan, epämiellyttäviin lämpöolosuhteisiin ja korkeisiin epäpuh-
tauksien pitoisuuksiin. (18).

4.1.2 Ilmankosteuden vaikutus pölyn käyttäytymiseen

Sisäilman kosteudella on merkittävä vaikutus pölyhiukkasten liikkeeseen ja tart-
tumiseen eri pintoihin. Kuivassa ilmassa pölyhiukkaset pysyvät pidempään leiju-
massa ilmassa, koska niiden ympärillä oleva ilmavirtaus ei sido niitä yhtä

tehokkaasti kuin kosteammassa ilmassa. Tämä voi johtaa siihen, että pöly leviää helpommin tilojen välillä ja kertyy ilmakehään (19).

Toisaalta korkea ilmankosteus voi lisätä pölyn tarttumista pintoihin, mikä voi vähentää sen leviämistä, mutta samalla aiheuttaa muita ongelmia. Yli 70 % suhteellinen ilmankosteus voi edistää homeen ja mikrobien kasvua, mikä pahentaa sisäilman laatua. (19).

Sisäilmaston hallinnan kannalta optimaalinen suhteellinen ilmankosteus on 30–50 %. Tämä kosteustaso auttaa vähentämään pölyn leijumista ilman, että se aiheuttaa home- tai mikrobiongelmiä (19).

Sisäilman suhteellinen kosteus vaihtelee vuodenaikojen mukaan. Talvella lämmitetyissä asuinhuoneissa se on yleensä 20–40 %, kun taas kesällä kosteus saattaa nousta 50–60 % Kylminä pakkaskausina sisäilman suhteellinen kosteus saattaa laskea jopa 20 %

Kosteuden hallinta sisätiloissa on tärkeää tasapainoisen ilmaston ylläpitämiseksi. Liiallinen kosteus voi aiheuttaa kondensaatiota rakenteisiin ja muihin pintoihin, kun taas liian alhainen kosteus voi haihduttaa kosteutta materiaaleista ja vaikuttaa niiden ominaisuuksiin. Ilmanvaihdon ja rakenteiden kosteusteknisen toiminnan huomioiminen auttaa hallitsemaan kosteustasoja ja varmistamaan sisäilman sopivat olosuhteet eri vuodenaikoina. (15).

4.2 Sisäilman kosteuden nousu toimistohuoneessa

Sisäilman kosteuspitoisuuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten ulkoilman kosteustaso, ilmanvaihdon tehokkuus sekä sisätiloissa tapahtuva kosteuden tuotto. Toimistohuoneissa kosteuden nousu voi johtua erityisesti ihmisten läsnäolosta, ilmanvaihdon puutteista ja rakennusmateriaalien kosteuskäyttäytymisestä. Näiden tekijöiden vaikutuksesta sisäilman kosteuspitoisuus voi kasvaa ja aiheuttaa ongelmia huoneilman laadulle sekä rakenteille.

Toimistohuoneessa kosteutta syntyy ensisijaisesti ihmisten hengityksestä ja haihtumisesta. Keskimäärin yksi ihminen tuottaa 1–3 litraa vesihöyryä vuorokaudessa, riippuen aktiivisuustasosta. Jos toimistohuoneessa työskentelee useita ihmisiä ja ilmanvaihto on puutteellista, kosteuspitoisuus kasvaa merkittävästi.

Ilmanvaihdon tehokkuus vaikuttaa ratkaisevasti kosteuden kertymiseen. Kosteuspitoisuuden muutos sisäilmassa voidaan laskea seuraavasti.

$$v_s = v_u + \frac{G}{n \cdot V} \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

- v_s = sisäilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)
- v_u = ulkoilman vesihöyrypitoisuus (kg/m³)
- G = kosteuden tuotto sisällä (kg/h)
- n = ilman vaihtuvuus yksikössä (1/h)
- V = huoneen tilavuus (m³)
- t = aika (h)

Pitkällä aikavälillä, kun t kasvaa, kaava yksinkertaistuu muotoon.

$$v_s = v_u + \frac{G}{n \cdot V}$$

Jos ilmanvaihto ei poista kosteutta riittävästi, sisäilman kosteus kohoaa nopeasti kriittiselle tasolle, mikä voi johtaa huonoon sisäilman laatuun ja rakenteellisiin ongelmiin. On kuitenkin tärkeää huomioida, että kosteusarvot eivät ole todellisuudessa näin kaavamaisia ja yksiselitteisiä, sillä kosteusolosuhteisiin vaikuttavat monet muuttujat, kuten hetkelliset käyttöolosuhteet, materiaalien ominaisuudet ja ilmastonvaihtelut.

Ilmanvaihdon puutteet ovat yksi merkittävimmistä syistä toimistohuoneiden kosteuden nousulle. Jos ilmanvaihto on mitoitettu liian vähäiseksi tai se ei toimi suunnitellusti, sisäilman suhteellinen kosteus nousee. Sisäilman kosteuspitoisuus riippuu ilmanvaihdon vaihtuvuudesta ja ulkoilman kosteuspitoisuudesta.

Esimerkiksi toimistorakennuksissa oletetaan yleensä kosteudenlisäykseksi noin 2 g/m^3 , mutta ilmanvaihdon supistuessa kosteus voi nousta huomattavasti korkeammaksi.

Energiansäästön myötä myös pattereiden pintalämpötilaa on alennettu, mikä vaikuttaa sisäilman kosteuden tasapainoon. Pienempi pintalämpötila heikentää konvektiovirtausten tehokkuutta ja lisää kosteuden kerääntymistä pintoihin. Kylminä ajanjaksoina ikkunapintojen lämpötila voi laskea alle $+17 \text{ °C}$, mikä kasvat-
taa kosteusriskiä. Ilmanvaihdon puutteet ja lämpötilan tasapainon muutokset voivat nopeasti nostaa suhteellisen kosteuden kriittiselle tasolle.

Rakennusmateriaalit, sisustus ja tekstiilit vaikuttavat myös kosteuden tasapai-
noon. Materiaalien kosteuden varastointikyky on laskenut modernien rakennus-
materiaalien myötä, ja kun keinokuidut korvaavat luonnonmateriaaleja, kosteu-
den tasaaminen huonetilassa heikentyy. Tämä voi aiheuttaa tilanteita, joissa toi-
mistohuoneiden suhteellinen kosteus nousee nopeammin ja pysyy korkeana pi-
dempään.

Ilmanvaihdon oikea mitoitus ja tehokas kosteuden hallinta ovat keskeisiä ratkai-
suja sisäilman kosteuden nousun vähentämiseksi toimistohuoneissa. Jos ilman-
vaihdon vaihtuvuus on liian matala, sisäilman kosteuspitoisuus kasvaa nopeam-
min, mikä voi lisätä rakenteellisia kosteusongelmia ja heikentää sisäilman laa-
tua. Tämän vuoksi on tärkeää huolehtia riittävästä ilmanvaihdosta ja lämpötasa-
painosta toimistoympäristössä. (20, s. 48.)

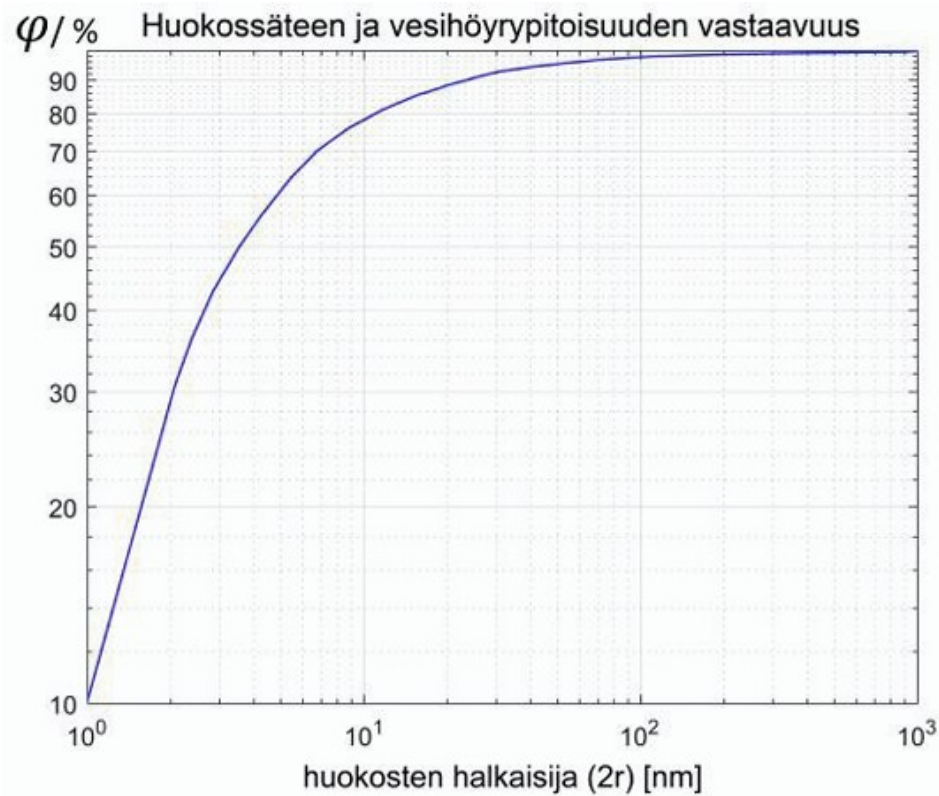
5 Kosteuden hallinta ja likaantumisen taustatekijät

Luvun tarkoituksena on tuoda esiin ne moninaiset fysikaaliset ja rakenteelliset mekanismit, joiden yhteisvaikutus voi johtaa lasirakenteiden likaantumiseen, optisten ominaisuuksien heikkenemiseen

5.1 Hygroσκοoppinen pöly ja kosteus lasipinnoilla

Kuten luvussa 3 todettiin, sisäilman pöly koostuu usein orgaanisista ja epäorgaanisista aineista, joilla voi olla hygroσκοoppisia ominaisuuksia. Tällaiset hiukaset pystyvät sitomaan kosteutta ympäröivästä ilmasta jo silloin, kun ilman suhteellinen kosteus on alle 100 %. Kun kosteutta alkaa kertymään pölykerrokseen, se voi johtaa kapillaarikondensaatioon – ilmiöön, jossa vesihöyry tiivistyy mikroσκοoppisiin huokosiin tai huokosmaiseihin rakenteisiin jo matalassa kosteudessa. Raportissa käsiteltyjen lähteiden mukaan pölyhiukkasten koko vaihtelee yleensä välillä 1 mm ja 0.01 μ m. Kun lasipinnoille kertyvä pöly muodostaa epäta-saisen ja huokoisen kerroksen, sen sisältämät pienet huokokset voivat toimia kapillaarisesti. Tätä tukee teoria, jonka mukaan alle 10 nanometrin kokoisissa huokosissa suhteellinen kosteus voi olla vain noin 10 %, kun taas suuremmissa huokosissa tarvitaan korkeampi ilmankosteus kondensaation syntymiseksi kuvan 14 käyrä esittää. (22.)

Syntynyt kosteus jää helposti pölykerrokseen, muodostaen sameita kohtia tai kalvomaisia alueita lasien välitilaan. Ilmiö ei välttämättä poistu tavanomaisella puhdistuksella, koska kyse ei ole pelkästä pölystä, vaan kosteuden ja pölyn muodostamasta yhdisteestä. Tämä voi osaltaan selittää, miksi lasielementtien sisäpinnat alkavat samentua erityisesti olosuhteissa, joissa ilmanvaihto on riittämätöntä ja kosteus pääsee kertymään rakenteisiin.



Kuva 11. Kuvassa huokossäteen ja vesihöyrypitoisuuden vastaavuus kapillaarikondenssissa.

5.2 Eristyslaselementtien kosteusongelmien taustatekijät

Vaikka tämän työn varsinainen tutkimuskohde on Inlookin ääntäeristävän tuplalasisen järjestelmäseinän likaantumiseen johtavat syyt ja niiden hallintakeinot, on perusteltua käsitellä myös eristyslaselementtien kosteudenhallintaa. Eristyslaselementit eroavat rakenteeltaan tutkitusta järjestelmäseinästä, mutta niiden kosteudensiirtymiseen ja tiivistymiseen liittyvä tutkimustieto voi tarjota arvokasta vertailupohjaa ja sovellettavia ratkaisuja ongelmaan.

Eristyslaselementtien kehitys on parantanut merkittävästi ikkunoiden lämmöneristystä, mutta kosteuden hallinta on edelleen yksi kriittisimmistä haasteista niiden pitkäikäisyyden ja toiminnallisuuden kannalta. Kosteuden tiivistyminen voi heikentää eristylasin optisia ominaisuuksia, lisätä lämmönsiirtymistä ja

pahimmillaan johtaa rakenteellisiin vaurioihin kuvan 12 perusteella voidaan tunnistaa eristyslasien kosteudenhallinnan keskeiset ongelmat ja niiden syyt.

Eristyslaselementtien kosteuden tiivistymiseen vaikuttaa useita tekijöitä, kuten lämpötilaerot, ilmanvaihto, tiivisteiden kunto ja lasielementtien valmistuslaatu. Yksi yleisimmistä ongelmista liittyy siihen, että ikkunoiden lämmöneristyskyky ei ole riittävä, jolloin sisäpinnan lämpötila laskee alhaisemmaksi kuin ilman kastepistelämpötila. Tällöin sisäilman kosteus tiivistyy lasin pinnalle. Tilanne paheenee, jos sisäilman kosteus on korkea ja ilmanvaihto puutteellinen. Lisäksi eristyslaselementin reunatiivisteet voivat vaurioitua ajan myötä, jolloin kosteutta pääsee lasien väliseen tilaan ja aiheuttaa sisäpinnan huurtumista. Tämä voi johtua valmistusvirheistä, huonolaatuisista materiaaleista tai lämpötilan ja painerojen aiheuttamasta mekaanisesta rasituksesta.

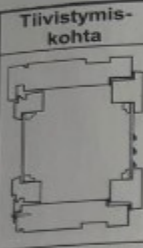
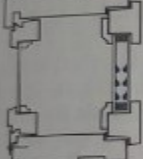
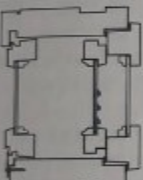
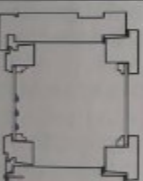
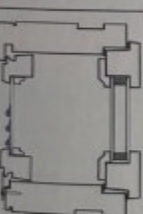
Tiivisteiden kunnolla on keskeinen merkitys kosteuden hallinnassa. Jos tiivisteet eivät ole täysin ilmatiiviitä, ulkoilman kosteus voi vähitellen tunkeutua lasien väliin. Tämä voi tapahtua erityisesti, jos rakennuksen paine-erot rasittavat tiivisteitä, jolloin syntyy mikroskooppisia vuotoja. Ajan myötä tiivisteiden elastisuus heikkenee, ja ne menettävät tehokkuuttaan, mikä altistaa eristyslaselementin kosteuden kertymiselle. Jos kosteutta kertyy jatkuvasti lasielementin sisään, sen haihtuminen on lähes mahdotonta, mikä johtaa lasien sumentumiseen ja pysyviin vaurioihin.

Toinen eristyslasien kosteudenhallinnan haaste liittyy ulkoisiin lämpötilavaihteluihin. Hyvin lämpöä eristävät ikkunat voivat aiheuttaa tilanteen, jossa ulkolasi jäähtyy yöllä alhaisemmaksi kuin ympäröivä ilma, minkä seurauksena kosteus tiivistyy ulkopintaan. Tämä ei kuitenkaan ole merkki viasta, vaan osoitus hyvästä lämmöneristyksestä. Sen sijaan, jos kosteutta esiintyy jatkuvasti eristyslaselementin sisäpinnalla, on syytä epäillä tiivisteiden vaurioitumista tai ilmanvaihdon puutteita.

Kosteuden hallinnan varmistamiseksi on tärkeää käyttää laadukkaita ja joustavia tiivistemateriaaleja, jotka kestävät lämpötilavaihteluita ja mekaanista

rasitusta. Myös rakennuksen ilmanvaihdon toimivuus on keskeinen tekijä, sillä huonosti ilmastoitu tila voi lisätä sisäilman kosteuspitoisuutta ja siten kasvattaa kondensaation riskiä. Lisäksi säännöllinen tarkastus ja huolto auttavat havaitsemaan mahdolliset vauriot ajoissa, jolloin lasielementin käyttöikä pitenee ja kosteuden tiivistymistä voidaan ehkäistä tehokkaasti. Eristyslasiens kosteudenhallinnan ongelmat liittyvät erityisesti lämpötilaeroihin, ilmanpaineisiin ja tiivisteiden kestävyteen, mutta huolellisella suunnittelulla ja laadukkailla materiaaleilla näitä haasteita voidaan merkittävästi vähentää. (22, s 179.)

Taulukko 3.3. Ikkunan eri lasipintoihin tiivistyvän kosteuden syitä.

Tiivistymiskohta	Kosteuden tiivistymisen syy
	Kosteutta sisäpinnassa <ul style="list-style-type: none"> • ikkunan lämmöneristävyys on huono • sisällä on poikkeuksellisen kosteaa • huonetilojen ilmanvaihto ei toimi kunnolla • ulkona on kova pakkane • sisäpuutteen tiivisteet vuotavat kylmää ilmaa ikkunan läpi ulkoa sisälle • ilmankierto ikkunan sisäpinnalla on huonoa esimerkiksi ikkunalaudan, ikkunapielen tai sisäpinnalla olevien verhojen tai kaihtimien vuoksi • ikkunan alapuolella ei ole lämpöpatteria
	Kosteutta eristyslasiin sisällä <ul style="list-style-type: none"> • eristyslasiin reunakittaus on vaurioitunut • asennusvirhe; eristyslasi on kannatettu vain toisesta lasista • valmistusmateriaalivirhe; eristyslasiin kokoonpanossa käytettyjen massojen tartunta tai kovettuminen on puutteellista • eristyslasiin valmistusvirhe; eristyslasiin kokoonpanossa käytetyt massat eivät tartu kunnolla esimerkiksi liikaisten pintojen vuoksi
	Kosteutta keskipuitteen lasissa <ul style="list-style-type: none"> • sisäpuutteen lasin kittaus tai puitteen nurkkaliitokset vuotavat ilmaa • vettä valuu seinän sisäpintaa pitkin tai seinän sisällä sisäpuutteen tai karmin päälle
	Kosteutta ulkolasin sisäpinnassa <ul style="list-style-type: none"> • sisäpuutteen tiiviste vuotaa ilmaa, huonetta yläpainainen • ulkopuite on tiivistetty liian hyvin • vettä valuu seinän sisällä karmin yläosan päälle • ulkopuitteen lasituskittaus vuotaa sadevettä ulkolasin sisäpuolelle • sadevesi tai lumi pääsee tunkeutumaan karmin ja puitteen väliseen tilaan • ikkunan ulkopuolella olevalle vesipelleille on kinostunut lunta, mikä haittaa puitteiden välisen tilan tuulettumista • rakoja sisäpuutteen tai karmin liitoksissa
	Kosteutta ulkolasin ulkopinnassa (seurausta hyvästä lämmöneristyksestä) <ul style="list-style-type: none"> • ikkunan lämmöneristävyys on hyvä • ulkona on yöllä kosteaa, tyyntä, pilvetöntä ja suhteellisen lämmintä • ulkona on yöllä kosteaa, tyyntä, pilvetöntä ja suhteellisen lämmintä • ulkoilman lämpötila kohoaa nopeasti yön jälkeen ja ulkona on tyyntä ja kosteaa <p>HUOMAA, että kosteuden tiivistyminen ikkunan ulkopintaan ei ole vika, joka vaatii korjaamista, vaan osoitus ikkunan hyvästä lämmöneristävyydestä ja poikkeuksellisista olosuhteista. Ikkuna kestää tiivistymisen ulkopintaan samalla tavalla kuin sateenkin.</p>

Kuva 12. Kosteuden tiivistymisen syyt eristyslaseissa.

6 Teknisen vian kuvaus ja alustavat havainnot

Rakenteen teknisen vian kartoittamiseksi haastateltiin Inlook Oy:n lasiseinäosaston työntekijöitä, joilla on pitkä kokemus lasiseinien parissa työskentelystä, ja jotka ovat aiemmin osallistuneet tutkimuskohteena olevan lasiseinäjärjestelmän teknisen vian analysointiin. Haastattelut toteutettiin kasvotusten, ja niiden tavoitteena oli selvittää

- Rakenteen tekniset ominaisuudet.
- Rakenteessa ilmenneet ongelmat.
- Olosuhteet, joissa ongelmia on ilmennyt.
- Tutkimusmenetelmät, joilla ongelmaa on aiemmin analysoitu.

Haastattelut valittiin tiedonkeruumenetelmäksi, koska työntekijöiden kokemus ja asiantuntijuus tarjosivat syvällisen näkemyksen kyseisen lasiseinäjärjestelmän haasteista ja niiden mahdollisista ratkaisuvaihtoehdoista.

6.1 Asennusvaiheen kriittiset ongelmakohdat

Haastatteluista ilmeni, että tekniset ongelmat liittyvät erityisesti lasien asentamiseen työmaalla. Kriittiseksi vaiheeksi tunnistettiin lasien tuplaaminen, jolloin lasien väliin muodostuu umpinainen ilmatila tila. Tämä edellyttää seuraavia toimenpiteitä:

Lasien pesu ja huolellinen tarkastus. Lasipintojen puhtauden varmistaminen ennen rakenteen sulkemista on oleellista, jotta likaa ei jää jo asennus vaiheessa rakenteeseen.

Asennusajankohdan merkitys. Tämä vaihe pyritään suorittamaan vasta työmaan loppusiivouksen jälkeen, mikäli tilanne sallii, jotta vältetään työmaa aikaisien pölyhiukkasten ja lian joutuminen lasien väliin.

6.2 Likaantumisen ilmeneminen ja olosuhdevaikutukset

Haastatteluista nousi esiin keskeisiä havaintoja lasien välisessä tilassa ilmenneestä likaantumisesta.

Imukupin kuviot lasin pinnassa ovat ensimmäisiä kohtia, joissa likaa havaitaan. Lika näyttää samealta kosteudelta lasien pinnoilla ja likaantumista ilmaantuu vähiten talvella.

Joissakin kohteissa likaantumista tapahtuu jatkuvasti, kun taas toisissa ei lainkaan. Saattaa myös esiintyä tilanteita, joissa osa lasiseinistä likaantuu ja osa pysyy kirkkaana samassa kohteessa.

Nämä havainnot viittaavat siihen, että likaantumiseen vaikuttavat sekä ympäristöolosuhteet että rakennuksen sisäilman ominaisuudet, kuten kosteuspitoisuus ja pölymäärä.

6.3 Ongelman tutkiminen ja aiemmat ratkaisuyritykset

Haastatteluissa kävi ilmi, että ongelmaa on tutkittu ja ratkaisuja kokeiltu useilla eri tavoilla kuten ilmakierron lisäämisellä.

Ilmankierron parantamiseksi rakenteessa profiileihin on porattu reiät rakenteen ylä- ja alaosaan, jotta ilma kiertäisi paremmin lasien välissä. Tämä painovoimainen ilmanvaihtoratkaisu ei kuitenkaan ole tuottanut toivottua tulosta ja on osoittautunut akustisesti huonoksi vaihtoehdoksi.

Ratkaisu voisi toimia paremmin, jos järjestelmäseinän suunnittelussa otetaan huomioon rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä sekä tilan ilmavirrat, johon järjestelmä asennetaan. Lisäksi on tärkeää varmistaa, että profiileihin porattujen reikien kautta rakenteen sisään ei kulkeudu epäpuhtauksia. Tämä voitaisiin toteuttaa esimerkiksi asentamalla suodatin, joka keräisi epäpuhtaudet ja estäisi niiden pääsyn rakenteeseen.

Kosteudenpoistopussien käyttö

Järjestelmään on asennettu lasien väliin kosteudenpoistopusseja, jotka on sijoitettu alumiinilistan alle. Listaan on porattu satunnaisia reikiä, jotta kosteudenpoistopussit toimisivat paremmin. Tästä huolimatta menetelmällä ei ole onnistuttu estämään lasien samentumista eikä imukuppien jälkien muodostumista järjestelmän lasien sisäpinnoille.

Lasien välitilan lämmittäminen

Eräessä kohteessa likaantunutta lasiväliä lämmitettiin rakennuspuhaltimella järjestelmän ulkopuolelta noin puolen tunnin ajan, mikä kirkasti lasit väliaikaisesti. Likaantuminen kuitenkin toistui 3–6 kuukauden kuluttua.

Lasien peseminen likaantumisen jälkeen

Järjestelmää on myös pesty jälkikäteen. Tämä edellyttää kahta asentajaa, jotka avaavat lasiseinäjärjestelmän niin, että lasien sisäpinnat päästään pesemään. Likaantuminen kuitenkin toistuu pesusta huolimatta noin 3–6 kuukauden välein.

Haastatteluiden yhteenveto ja asetetut hypoteesit

Haastattelut toivat esille selkeitä havaintoja ja aiemmissa tutkimuksissa käytettyjä ratkaisuyrityksiä, jotka eivät ole olleet täysin toimivia. Tulokset viittaavat siihen, että likaantumisen syyt liittyvät useiden eri tekijöiden yhteisvaikutukseen, kuten

- Sisäilman kosteuteen ja pölyhiukkaspitoisuuteen
- Rakenteen ilmatiiveyteen
- Asennusprosessin kriittisiin vaiheisiin
- Lasin pintakäsittelyn ja puhdistuksen tehokkuuteen.

Haastattelujen perusteella muodostettiin seuraavat hypoteesit, joita tullaan tutkimaan kokeellisesti.

Koska järjestelmän likaantuminen on vähäisempää talvella, voidaan olettaa, että sisäilman suhteellinen kosteus vaikuttaa likaantumiseen

Ongelma saattaa liittyä rakenteen riittämättömään ilmatiiveyteen, mikä mahdollistaa kosteuden ja pölyn pääsyn lasien välitilaan.

Nykyinen kosteudenpoistojärjestelmä ei ole riittävä estämään ilmankosteuden nousua rakenteessa.

Käytetty lasinpesumenetelmä taas vaikuttaisi siltä, että se ei ole tarpeeksi tehokas poistamaan lasinostossa käytettävien imukuppien jälkiä, vaikka se visuaalisesti näyttäisi siltä. Tämä imukupista jäänyt lika voisi toimia likaantumisen alkupisteenä.

7 Pölyyntymiseen liittyvien ilmiöiden kokeellinen tutkimus

Kirjallisten lähteiden ja asiantuntijahaastatteluiden pohjalta valittiin kaksi testausmenetelmää tuplalasisen järjestelmäseinän likaantumisen syiden selvittämiseksi.

Ensimmäisessä testissä pyrittiin selvittämään, miten suhteellisen kosteuden nousu vaikuttaa järjestelmän välitilaan. Testin tavoitteena oli saada varmuutta kosteuden nousun vaikutuksesta lasipintojen likaantumiseen sekä määrittää suuntaa antavat suhteellisen kosteuden tasot, joissa likaantuminen alkaa ilmetä.

Toinen testi oli sovellettu vesitiiveystesti. Tämän testin tavoitteena oli todentaa rakenteen mahdollinen tiiveyden puutteellisuus ja kartoittaa vuotokohtat.

Testit suoritettiin Inlook Oy:n varastotiloissa Helsingin Sahaajankadulla. Testitalaksi valittiin entinen maalaamon työnjohdon huone, jota käytettiin tuolloin varastotilana. Huoneen pinta-ala oli noin 9 m², ja siinä oli alkuperäinen lasiseinäjärjestelmä sekä käyntiovi. Huoneen viereisenä tilana toimi suurempi varastohuone. Testihuoneessa oli olemassa olevat tulo- ja poistoilmaventtiilit.

Tila remontoitiin testejä varten sopivaksi. Vanha käyntiovi ja lasiseinäjärjestelmä purettiin, ja viereiseen seinään tehtiin uusi aukko käyntiovea varten. Lisäksi tilassa suoritettiin sähkötöitä, kuten vanhojen sähköasennusten siirtoja.

Huoneeseen rakennettiin aukko, jonka korkeus oli 2 900 mm ja leveys 2 000 mm. Tilaan asennettiin uusi, tiiviimpi käyntiovi, jonka ääneneristysarvo (Rw) on 38 dB. Lisäksi alakattoon asennettiin uusi T-lista.

Uuden oven asennusraot tiivistettiin akryylimassalla mahdollisimman hyvän ilmatiiviyden saavuttamiseksi. Muutostöiden jälkeen tila vastasi kuvan 13 mukaista lopputulosta.



Kuva 13. Muutostöiden jälkeen.

Kun tila oli muokattu sopivaksi testejä varten, aukkoon asennettiin kaksi tuplala-
siseinäjärjestelmää. Kahden järjestelmän käyttö mahdollisti sen, että molempiin
rakenteisiin voitiin asettaa erilaiset kosteustasot samanaikaisesti, mikä nopeutti
mittauksia ja vertailujen tekemistä. Kuvassa 14 on esitetty valmiit järjestelmät
asennettuina testiä varten.

Profiilit tilattiin uutena ja maalautettiin Inlookin maalaamossa Tallinnassa. Profiilit sahattiin Helsingin Sahaajankadulla ja esikasattiin paikan päällä. Lasit leikattiin hyödyntämällä jäljelle jääneitä hukkalaseja.



Kuva 14. Saumakittausta vaille oleva Double glazy

Kuvassa 14 näkyy pystyprofiiliin poratut 13 mm reiät: yksi sisäpuolelle ylhäälle vasemmalle ja toinen ulkopuolelle alas oikealle. Näitä reikiä hyödynnettiin tutkimuksissa. Reikien koko valittiin siten, että ilmankosteusmittarin anturi mahtui

niistä läpi. Lisäksi reiät oli mahdollista sulkea tiiviisti sinitarralla ja karmitulpilla mittausten jälkeen.

7.1 Koe 1 kosteuden vaikutus -testi välitilassa

Testihuoneessa alipaineistus toteutettiin sulkemalla tuloilmaventtiili ja jättämällä poistoilmaventtiili auki. Alipaineen muodostuminen varmistettiin tarkkailemalla ilmavirtausta profiilirakenteeseen aiemmin poratun tarkistusreiän kautta. Alipaineisuuden toteamiseksi avattiin huoneen ovi ja arvioitiin ilman liikettä reiän kohdalla käsin. Tarkastuksen perusteella voitiin todeta, ettei tilaan enää virrannut ilmaa, jolloin testausolosuhteiden katsottiin vastaavan tilannetta, jossa toimistotilan ilmanvaihto on kytketty pois käytön ulkopuolella.

Testin aikana mitattavia suureita olivat rakenteen välitilan suhteellinen kosteus (RH), lasipintojen visuaaliset havainnot sekä lämpötila. Mittaukset suoritettiin noin 10 minuutin välein koko kokeen ajan, jolloin voitiin seurata olosuhteiden muutoksia riittävällä tarkkuudella ja ajantasaisuudella.

Testimenettelyt alipaineistuksen varmistamisen jälkeen: Tuplalaisen rakenteen välitilan ilmankosteutta nostettiin Senz SEHU45WH -ilmankostuttimella. Kuvassa 15 näkyy kun laitetta käytetään kokeessa 1.



Kuva 15. Järjestelmän lasien välisen tilan suhteellisen ilmankosteuden nostaminen ilman virtauksen ollessa testihuoneeseen päin.

Rakenteen välitilan suhteellinen kosteus mitattiin Testo 605-H1 -ilmankosteuden mittalaitteella, joka oli kalibroitu edellisen vuoden aikana. Mittalaite tuotti luotettavia mittaustuloksia huoneilman kosteustasosta, ja sen mittaustarkkuus oli ± 3 prosenttiyksikköä suhteellisessa kosteudessa.

Testin tavoitteena oli tarkastella kosteuden nousun vaikutuksia järjestelmän lasipintojen likaantumiseen. Ilmankosteutta nostettiin asteittain 10 prosenttiyksikön välein. Ensimmäisessä rakenteessa testaus aloitettiin kosteustasolla 30 % RH ja toisessa 40 % RH. Kosteustasoja nostettiin joka aamu viikon ajan.

Testin aikana kosteustasot eivät pysyneet vakaina vuorokauden ympäri, vaan erityisesti yön aikana kosteuden havaittiin laskevan merkittävästi. Kun havaittiin,

että lasipintojen likaantumista alkoi ilmetä kosteustason ylittäessä 70 % RH, päätettiin suorittaa tarkentava erilliskoe.

Tässä erillisessä kokeessa lasien välitilan puoleiset pinnat puhdistettiin huolellisesti ennen testauksen aloittamista. Tämän jälkeen rakenne jätettiin vuorokauden ajaksi tasapainottumaan ympäröivän tilan kosteustasoon, jolloin rakenteen ja tilan väliset kosteuserot tasaantuivat. Vuorokauden kuluttua välitilan suhteellinen kosteus nostettiin suoraan 70 %:iin. Tämän kosteustason saavuttamisen jälkeen havaittiin jälleen lasipinnoilla silminnähtävää likaantumista.

Havaitut ilmiöt

Testi suoritettiin rakennuksen logistiikkatilassa, jonka ilman pölypitoisuutta ei mitattu erikseen. Tilassa voidaan kuitenkin perustellusti olettaa esiintyneen hienojakoista pölyä, joka on tyypillistä varasto- ja materiaalinkäsittely-ympäristöissä, joissa käsitellään pakkauksia ja tavaravirtoja.

Valaistusolosuhteet koostuivat vähäisestä luonnonvalosta sekä tilan kattoon asennetuista keinovalaisimista. Havainnointi suoritettiin testihuoneen puolelta siten, että valaistus osui lasipintoihin viistosti ylhäältä. Likaantuminen oli parhaiten havaittavissa tällaisessa valokulmassa.

Lasipintojen tarkastelu eri etäisyyksiltä ja kulmista vaikutti havaittavuuteen merkittävästi. Kun rakennetta tarkasteltiin etäämmältä, lika ei erottunut selkeästi. Sen sijaan lähietäisyydeltä, kun havaintokulmaa muutettiin ylös- tai alaspäin liikkumalla, löydettiin katselukulmia, joissa lasipintojen epäpuhtaudet olivat selvästi havaittavissa.

Rakenteen lasivälitilassa havaittiin useita ilmiöitä, jotka viittasivat lasipintojen likaantumiseen. Merkittävimpana havaintona pidettiin lasinostossa käytettyjen imukuppien jälkien muodostumista lasipintaan. Jäljet ilmenivät pyöreähköinä ja sameina alueina, jotka korostuivat kosteuden noustessa, kuten kuvassa 16 näkyy.

Lisäksi havaittiin, että lasipinnoille oli jäänyt jälkiä myös lasinpesun yhteydessä käytetyistä kosteuspyyhkeistä. Myöhemmässä erillistestissä, jossa lasipinnat kuivattiin Würthin puhdistusliinalla ilman erillisiä pesuaineita, muodostui silti havaittavia pyyhintäjälkiä.



Kuva 16. Imukupinjäljet lasien välissä.

Koska kaikkia muuttujia ei ollut mahdollista hallita tarkasti ja käytössä olleiden mittalaitteiden tarkkuus oli rajallinen, testi luokitellaan kenttätestiksi eikä varsinaiseksi laboratoriokokeeksi. Tästä huolimatta mittaustulokset ja havainnot on pyritty esittämään niin tarkasti ja läpinäkyvästi kuin testin olosuhteet sallivat.

7.2 Koe 2 sovellettu vesikoe

Koe 2 suunniteltiin ensimmäisen kosteusperusteisen kokeen havaintojen pohjalta. Ensimmäisessä testissä todettiin, että rakenteen lasivälitilassa tapahtunut kosteuden nousu vaikutti lasipintojen likaantumiseen, mikä näkyi esimerkiksi imukuppien ja pyyhintäliinojen jälkien korostumisena. Tämän jälkeen heräsi tarve selvittää, onko rakenteessa mahdollisia vuotokohtia, jotka voisivat selittää kosteuden kertymistä.

Testin päätavoitteena oli paikantaa lasiseinärakenteen mahdolliset vuotokohtat. Testin suunnittelussa hyödynnettiin ympäristöministeriön kuntotutkimusoppaan ohjeistusta. Vaikka merkkiainekoe olisi ollut suositeltava menetelmä, käytettävissä ei ollut siihen soveltuvaa mittauskalustoa. Tästä syystä päätettiin toteuttaa vesitesti visuaalisiin havaintoihin perustuen.

Testiä varten rakennettiin tuplalasinen pienoismalli, jonka mitat olivat 400 × 400 mm. Pienoismalli vastasi käytettävän lasiseinärakenteen profiili- ja tiivistysratkaisuja, ja sen avulla pystyttiin rajaamaan ja havainnoimaan vuotokohtia hallitusti.

Kyseessä oli havainnointiin perustuva testi. Vesi johdettiin rakenteeseen hallitusti, ja tuloksia seurattiin visuaalisesti erityisesti liitosten, tiivisteiden ja listoitusten kohdalla. Havainnot dokumentoitiin valokuvien avulla.

Vesi kaadettiin rakenteeseen ylimpään profiiliin poratun reiän kautta suppilon avulla. Testissä käytettiin aina sama määrä vettä, kaksi litraa, jotta olosuhteet pysyivät vertailukelpoisina eri testauskerroilla.

Testin eteneminen ja havainnot

Testaus aloitettiin alkuperäisellä rakenteella, jossa vesitiiveyttä tarkasteltiin visuaalisesti. Tarkastelussa havaittiin vesivuotoja erityisesti profiilien liitoskohdissa.

Rakenteen kuivumisen jälkeen liitoskohtiin lisättiin tiivistemassaa. Massan annettua kuivua, suoritettiin uusi vesitesti, jossa vuotojen esiintymistä seurattiin samoista kohdista. Kuvassa 17 esitetään vesivuoto jälkiasennustiivisteidien liitoskohdassa.



Kuva 17. Jälkiasennustiivisteidien liitoskohdan vuoto.

Kolmannessa vaiheessa pienoismallista poistettiin lasit ja rakenteet kuivattiin huolellisesti. Tämän jälkeen profiilin ensiasennustiivisteidien liitoskohdat tiivistettiin tiivistemassalla. Tiivistyksen toteutustapa on esitetty kuvassa 18. Kun tiivistemassa oli levitetty, ensiasennustiivisteet asennettiin takaisin paikoilleen. Rakenteen annettiin kuivua vuorokauden ajan ennen seuraavaa testausvaihetta.



Kuva 18. Tiivisteiden massaus.

Koestus suoritettiin uudelleen edellisen kuivatusvaiheen jälkeen. Kuvassa 19 esitetään testin tulos, jossa havaittiin, että vettä tihkui enää ainoastaan asennuslistan läpi.



Kuva 19. Lasituslistan välistä tihkuu vettä.

Neljännessä testausvaiheessa pienoismallista poistettiin ainoastaan lasit, mutta ensiasennustiivisteet jätettiin paikalleen. Osat kuivatettiin huolellisesti ennen seuraavaa käsittelyä. Tämän jälkeen ensiasennustiivisteiden liitoskohtiin levitettiin tiivistemassaa, ja lasit painettiin tiivistemassaa vasten. Rakenne jätettiin kuivumaan vuorokauden ajaksi.

Kuivumisen jälkeen suoritettiin uusi vesitesti. Kuvassa 20 esitetään testin tulos, jossa vuotoja ei havaittu visuaalisesti. Rakennetta seurattiin kolmen vuorokauden ajan, eikä vedenpinnan havaittu muuttuneen pienenomallin sisällä tarkastelujakson aikana.



Kuva 20. Neljännen vesitestin lopputulos.

Vesitestin yhteenveto

Vesitestillä onnistuttiin paikantamaan vuotokohdat profiilin liitoskohtiin, ensi-asennustiivisteeseen kulman liitoskohtaan, asennuslistan liitoskohtaan sekä jälki-asennustiivisteeseen kulman liitoskohtaan.

8 Pohdinta

Omaa pohdintaa opinnäytetyöprojektissa käytettyjen kirjallisten lähteiden ja tehtyjen havaintojen perusteella.

Tässä opinnäytetyössä hyödynnettiin sekä kirjallisia lähteitä että asiantuntija-haastatteluja. Haastattelut suoritettiin projektin alkuvaiheessa, ja ne tarjosivat arvokasta taustatietoa järjestelmäseinärakenteen käytännön ongelmista ja niiden ratkaisuksista. Lisäksi omat kokemukseni lasiseinien asennuksesta ohjasivat testien suunnittelua käytännönläheisesti.

Kirjallisuuteen perehtyminen jäi osin päällekkäiseksi testausvaiheiden kanssa, mikä vaikeutti joidenkin riskitekijöiden syvällistä käsittelyä, erityisesti pölyhiukkasten kiinnittymiseen liittyvien ilmiöiden osalta. Tämä on jatkotutkimuksen kannalta merkittävä kehityskohde. Luvussa 4 esitetyt tiedot kuitenkin tukevat käsitystä siitä, että tilojen käyttötarkoitus ja ilmanvaihdon säätö vaikuttavat sisäilman pölypitoisuuteen sekä pölyn kulkeutumiseen rakenteen sisään. Yhdistettynä kohonneeseen suhteelliseen kosteuteen nämä tekijät voivat johtaa lasivälitilan likaantumiseen.

Havainnot ensimmäisestä testistä tukevat tätä kokonaiskuvaa: ilman suhteellisen kosteuden nousu 70 %:iin johti imukuppijälkien sekä pesu- ja puhdistusliinojen aiheuttamien jälkien korostumiseen lasipinnoilla. Kosteus ei myöskään pysynyt suljettuna tilassa, vaan laski, vaikka ei täysin palautunut ympäröivän huoneilman tasolle.

Puhdistusliinojen aiheuttamien jälkien mekanismia tulisi tutkia tarkemmin. On epäselvää, liittyykö jälkien synty sähköiseen varaukseen, joka syntyy pyyhinnässä, vai lasipinnan mahdollisiin mikrokooppisiin epätasaisuuksiin. Nämä saattavat syntyä jo tuotantovaiheessa. Ilmiö voi osoittautua merkittäväksi tekijäksi likaantumisen kokonaisuudessa.

Kirjallisuudesta keräämäni tieto akustiikan perusteista tukee kaksilasisen järjestelmän kehitystä myös ääniympäristön näkökulmasta. Massa–jousi–massa-

periaatteella rakennettu rakenne tarjoaa useita mahdollisuuksia järjestelmän akustisten ominaisuuksien parantamiseen. Edellytyksenä on kuitenkin, että likaantumisongelma saadaan hallintaan.

Kaksilasinen järjestelmäseinä tarjoaa merkittäviä etuja yksirakenteisiin verrattuna erityisesti työergonomian ja äänenvaimennuksen osalta. Vaikka akustiikka jäi työn kokonaisuudessa osin irralliseksi, sen käsittely syvensi omaa teknistä ymmärrystäni ja tuki ammatillista kehittymistäni. Tämä osa työstä antoi eväitä jatkossa tapahtuvaan suunnittelu- ja kehitystyöhön.

Testien käytännön toteutus oli vaativa, mutta se kehitti ongelmanratkaisutaitoja ja toi esiin kenttätestauksen rajoituksia. Vaikka kaikkia muuttujia ei voitu kontrolloida tai mitata tarkasti, kokeet tuottivat toistettavia ja havainnollisia tuloksia, joiden pohjalta voidaan edetä tuotekehityksessä.

Yksi keskeinen jatkotutkimusalue liittyy pyyhintäjälkien muodostumiseen lasipinnoille. Ilmiötä voidaan tutkia testihuoneessa vertaamalla eri lasinpesumenetelmiä. Menetelmiä kehitettäisiin järjestelmällisesti ja testattaisiin kokeen 1 mukaisessa olosuhteessa. Tavoitteena olisi löytää pesutapa, joka ei jätä näkyviä jälkiä lasivälitilan sisäpintoihin kosteuden vaikutuksesta.

Kun sopiva pesumenetelmä on tunnistettu, tulisi sen pohjalta laatia kirjallinen ohjeistus. Ohjeen tarkoitus on ohjata järjestelmän lasien pesua tuotannon ja mahdollisesti myös huollon yhteydessä, jotta likaantumisriskiä voidaan pienentää jo asennusvaiheessa.

Toinen jatkotoimenpide koskee tiivistysratkaisujen kehittämistä. Testausta jatketaan testihuoneessa kahdella rinnakkaisella lasielementillä, joista toiseen tehdään asennusteknisesti kehitetty tiivistys ja toinen jätetään alkuperäiseen kuntoon vertailua varten. Vuotokohtiin johdetaan savua savukynän avulla, ja tiiveys tarkastetaan visuaalisesti.

Kun toimiva ja toteutuskelpoinen tiivistystapa on tunnistettu, siitä tulee laatia erillinen kirjallinen ohjeistus. Tämän avulla voidaan yhdenmukaistaa järjestelmän tiivistyskäytännöt ja parantaa tuotteen laatua ja toimintavarmuutta.

Vaikka kosteudenpoistojärjestelmän kehittäminen ei ehtinyt osaksi tämän työn kokeellista osuutta, sen suunnittelussa voidaan tulevaisuudessa hyödyntää testien aikana paikannettuja vuotokohtia. Tavoitteena on kohdistaa kosteudenpoisto suoraan näihin kriittisiin alueisiin. Lisäksi jatkokehityksessä tulee huomioida tiivistemassojen käyttäytyminen pumppausilmiön vaikutuksesta, jotta rakenteesta saadaan mahdollisimman pitkäikäinen ja toimintavarma.

9 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin Inlook Oy:n kaksilasisen järjestelmäseinän sisäpuolisten lasipintojen likaantumista. Luvuissa 2 ja 3 käsiteltiin yleisellä tasolla ääntä eristäviä järjestelmäseiniä ja niiden käyttökohteita. Näiden lukujen tarkoituksena oli antaa lukijalle käsitys tutkittavan järjestelmän toimintaympäristöstä ja lasirakentamiseen liittyvistä erityispiirteistä.

Vaikka lasien turvallisuusvaatimukset liittyvät oleellisesti lasirakentamiseen erityisesti lasin haurauden ja äkillisen rikkoutumisen aiheuttamien vaaratilanteiden vuoksi tätä aihetta ei syvennetty työssä. Syynä oli se, että vuonna 2018 voimaan astunut rakennusten käyttöturvallisuusasetus olisi tehnyt yleisluontoisesta osuudesta tarpeettoman laajan ja vienyt käsittelyn pois työn varsinaisesta aiheesta.

Akustiikka sen sijaan päätettiin sisällyttää tarkasteluun, koska se liittyy keskeisesti tuplalasisen järjestelmäseinän kehittämistarpeisiin. Massa–jousi–massaperiaatteen ansiosta järjestelmä mahdollistaa hyvän ääneneristyksen ja kevyempien lasien käytön, mikä parantaa asentamisen ergonomiaa erityisesti kohteissa, joissa lasinnostimen käyttö ei ole mahdollista. Lisäksi akustiset ominaisuudet vaikuttavat suoraan niihin rakenteellisiin muutoksiin, joita voidaan toteuttaa likaantumisen ehkäisemiseksi.

Luvuissa 4, 5 ja 6 syvennyttiin likaantumismekanismeihin ja ilmiön taustatekijöihin. Kirjallisista lähteistä hankittu tieto vahvasti asiantuntijahaastatteluissa esiin nousseita hypoteeseja kosteuden ja pölyhiukkasten vaikutuksesta lasien likaantumiseen. Valitettavasti työn aikataulu ei mahdollistanut tarttumismekanismien yksityiskohtaista selvittämistä.

Työn aikana suoritettiin kuitenkin kaksi koetta, joiden tavoitteena oli tutkia rakenteeseen liittyviä likaantumiseen johtavia syitä sekä hahmottaa, millä keinoin ongelmaa voitaisiin tulevaisuudessa ehkäistä.

Luvussa 7 esiteltiin tuplalasisen järjestelmäseinän koejärjestelyt. Koska kaikkia muuttujia ei saatu täysin hallittua, kokeet olivat luonteeltaan enemmän testiluontoisia kuin varsinaisia laboratoriokokeita. Ensimmäisessä kokeessa tärkeimpiä havaintoja olivat kosteuden nousun vaikutus lasien sisäpintojen likaantumiseen, mutta ei niinkään lasin pölyyntymiseen vaan pölyn havaittavuuteen. likaantumisen käynnistymiseen vaadittu kosteustaso sekä se, että lika muodostui nopeasti eikä poistunut kokonaan kosteuden haihduttua.

Luvussa 8 pohdittiin jatkotutkimuksia, kuten lasien pesun kokeellista testaamista ensimmäisen kokeen tulosten pohjalta, mikä on lupaava suunta jatkokehitystä ajatellen.

Toisessa kokeessa keskeinen havainto oli rakenteen vuotaminen ja vuotokohdat pystyttiin paikantamaan. Näiden tulosten perusteella, kuten luvussa 8 esitettiin, on mahdollista laatia asennusteknisesti toimiva tiivistysohjeistus. Lisäksi ensimmäisen kokeen koetilassa voitaisiin jatkossa testata samanaikaisesti sekä nykyistä että parannettua järjestelmää vertailun mahdollistamiseksi.

Lähteet

- 1 Lasiseinät. Verkkoaineisto. Inlook Oy <<https://www.inlook.fi/palvelut/asennuspalvelut/lasiseinat/>> Luettu 13.4.2025
- 2 Tuoteluettelo järjestelmäseinät. Yrityksen sisäinen aineisto. Inlook Oy
- 3 Lasifakta 2024 verkkoaineisto. Pilkington Lahden Lasitehdas Oy huhtikuu 2024. <<https://www.pilkington.com/fi-fi/fi/arkkitehdit-suunnittelijat/lasifakta-2024>> Luettu 13.4.2025
- 4 Tampereen yliopisto. Mikko Kylliäinen; Sakari Tervo; Arttu Yli-Pietilä. 2018. Talonrakentamisen akustiikka.
- 5 Ääniympäristö. 2018. Verkkoaineisto. Suomen ympäristöministeriö. <https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Ymparistoministerion-ohje-rakennuksen-aaniymparistosta-2852D34E_DA43_4DCA_9CEE_47DBB9EFCB08-138568.pdf/5e3efaa4-9566-17ae-83c6-2b5805fc9d/Ymparistoministerion-ohje-rakennuksen-aaniymparistosta-2852D34E_DA43_4DCA_9CEE_47DBB9EFCB08-138568.pdf?t=1603260126601> Luettu 13.4.2025
- 6 Suomen standardisoimisliitto SFS Standardit SFS 5907:2022
- 7 lasiteknistätietoa. Verkkoaineisto. Tasolasi yhdistyksen. <<https://www.tasolasiyhdistys.fi/lasitietoa/teknista-tietoa/>> Luettu 13.4.2025.
- 8 RT-38-10901. 2007. Rakennuslasit, tasolasit. Rakennustieto.
- 9 RT 38-10941. 2008. Eristyslasit. Rakennustieto.
- 10 Rakennuksen ääniolosuhteiden suunnittelu ja toteutus. 2019. Suomen ympäristöministeriö. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-035-4>>. Luettu 13.4.2025.
- 11 Unto Siikanen. 2015. Rakennusfysiikan perusteet ja sovelluksia. Rakennustieto.
- 12 Ril 243-1-2007 rakennus akustinen suunnittelu. Suomen rakennusinsinörien liitto.
- 13 SIT 05-610038 Huoneakustiikka. 2006. Rakennustieto.

- 14 Pölyntorjunta. 2021. Verkkoaineisto. Hiltti. <https://www.hilti.fi/content/dam/documents/e1/finland/Hilti_2021_Dust_eBook_FI.pdf> Luettu 13.4.2025.
- 15 Ympäristöopas 2016. Pitkäranta, Miia. Suomen ympäristöministeriö. <<http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-11-4626-8>> Luettu 13.4.2025.
- 16 Katupöly. Verkkoaineisto. THL. Luettu 13.4.2025. <<https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ilmansaasteet/liikenteen-ilmansaasteet/katupoly>> Luettu 13.4.2025.
- 17 Ilmassa leijuvan pölyn ehkäiseminen ilmankosteuttamalla. Verkkoaineisto. Airtec. <<https://airtecsolutions.fi/blogi/airtec-blog/airtec-blog/ilmassa-leijuvan-poelyn-ehkaiseminen-ilmankosteutta-nostamalla>> Luettu 13.4.2025
- 18 RT 103806. 2025. Ilmanvaihtojärjestelmän ylläpito, puhdistus ja ilmavirtojen säätö. Rakennustieto.
- 19 Sisäilmätietoa. Verkkoaineisto. Sisäilmayhdistys ry. Verkkosivut. <<https://sisailmayhdistys.fi>>. luettu 13.4.2025.
- 20 Dick Björkholtz. 1997. Lämpö ja kosteus rakennusfysiikka. Rakennustieto.
- 21 Ari Asp. 2024. Tampereen yliopiston väitöskirjat 1011.
- 22 Ril 255-1-2014. Rakennusfysiikka 1. Suomen rakennusinsinöörien liitto.

