

Kari Seitaniemi

Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta 1900-luvun koulurakennuksessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

6.11.2018

Tekijä Otsikko	Kari Seitaniemi Painovoimainen ilmanvaihto koulurakennuksessa
Sivumäärä Aika	45 sivua + 2 liitettä 6.11.2018
Tutkinto	Insinööri (YAMK)
Koulutusohjelma	Rakentaminen, YAMK
Suuntautumisvaihtoehto	Talotekniikka
Ohjaajat	Yliopettaja Aki Valkeapää Erikoisasiantuntija Mikko Keinänen
<p>Tässä opinnäytetyössä selvitetään mahdollisuutta uudistaa 1908 valmistuneen suojellun Tehtaankadun ala-asteen ilmanvaihto painovoimaiseksi. Työssä selvitetään ilmanvaihdon nykytilanne ja historia kaloriferijärjestelmästä. Työn tavoitteena on selvittää painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaedellytykset koulurakennuksessa, jossa vaatimuksena on turvallinen, terveellinen ja toimiva sisäilmasto.</p> <p>Erilaisia painovoimaisen ilmanvaihdon toteutusratkaisuja selvitetään suunnitteluohjeiden avulla ja sovelletaan kohteen vaatimuksiin. Kirjallisuusselvityksessä tutkitaan painovoimaisen ilmanvaihdon kokemuksia muissa Suomen koulurakennuksissa. Ilmanvaihdon ilmamääriä tutkitaan laskennallisesti huomioiden tuuliroottoreiden ja venttiileiden vaikutukset.</p> <p>Lisäksi selvitetään painovoimaisen ilmanvaihdon suodatuksen tarvetta sekä äänitekijöiden huomioimista kaupungin keskustassa. Painovoimaisen ilmanvaihdon kanavakoot ja tilatarpeet selvitetään luokkatilojen ilmanvaihtovaatimusten mukaisesti.</p> <p>Laskentatulokset osoittivat nykyhormeja käytettäessä painovoimaisen ilmanvaihdon ilmamäärien jäävän kaikissa ulkoilman lämpötiloissa alle määräystason. Tilanne on erityisen huono lämpimällä säällä ylimmässä kerroksessa, jossa painovoimainen ilmanvaihto ei toimi käytännössä lainkaan. Massiivisilla uusilla ilmanvaihtohormeillakaan ei päästä riittäviin ilmanvaihtomääriin lämpimällä säällä ylemmissä kerroksissa.</p> <p>Nykyvaatimusten mukaisten ilmamäärien toteuttaminen olemassa olevaan koulurakennukseen ei onnistu ilman massiivisia rakenteellisia muutoksia.</p>	
Avainsanat	painovoimainen ilmanvaihto, mitoitus, suodatus, kaloriferi

Author(s) Title	Kari Seitaniemi Natural ventilation in school buildings
Number of Pages Date	45 pages + 2 appendices 6 Nov 2018
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Building Services Engineering
Instructor(s)	Aki Valkeapää, Principal Lecturer Mikko Keinänen, Special expert analysist
<p>This Master's thesis studied the possibility to renovate ventilation of Tehtaankatu primary school to natural ventilation. The school building has been built in 1908 and is protected by Finnish National Board of Antiques. In this study the present status of ventilation and it's history as calorifere system is studied. The goal was to find out the operational precondition of natural ventilation for school building where safe, healthy and working indoor air environment is required.</p> <p>Various methods of executing natural ventilation is studied through design instructions and implemented to the requirements of this particular building. Literature search is done to find out experiences with natural ventilation in other Finnish school buildings. Ventilation rates are calculated taking into account the rooftop ventilators and air valves.</p> <p>Also the need of air filtration is studied and sound indicators as the building is situated in the city center. Required air duct sizes are defined to meet the need of air exchange rate in class rooms.</p> <p>Results indicates that the air exchange rates are too low in all outside temperatures when current air ducts are used. Ventilation rates are especially low in higher outside temperatures and rooms that are situated higher. Third floor has practically no natural ventilation in summer conditions. Air flow rates are not enough even with massive new air ducts.</p> <p>Modern requirements of air exchange rates in class rooms are not met with natural ventilation in existing buildings without massive construction work.</p>	
Keywords	natural ventilation, calculation, air filtration, calorifere

Alkusanat

Haluan kiittää erityisesti Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy:n projektipäällikkö ja erityis-
asiantuntija Mikko Keinästä suuresta avusta ja työn kommentoinnista.

Helsingissä,

Kari Seitaniemi

Sisällys

Alkusanat	4
1 Johdanto	1
2 Painovoimainen ilmanvaihto	2
2.1 Toiminta	2
2.2 Painovoimaisen ilmanvaihdon konsepteja	3
2.3 Hormiston vaikutus	4
2.4 Tuulen ja ikkunatuuletuksen vaikutus	5
2.5 Ilmanvaihdon säädettävyys	6
2.6 Vedonparantajat (tuuliroottorit, hormi-imurit)	6
2.7 Kaloriferijärjestelmä	11
3 Kokemuksia koneellisesta ja painovoimaisesta ilmanvaihdosta koulurakennuksessa 14	
4 Painovoimaisen ilmanvaihdon laskenta	18
4.1 Hormivaikutuksen laskenta	18
4.2 Poistoilmahormin painehäviö	19
4.3 Tulo- ja poistoilmaventtiileiden ja säleikköjen painehäviö	21
4.4 Poistoilmahormin ilmavirran laskeminen	23
5 Ääni ja suodatus	24
5.1 Ilman suodattaminen	24
5.1.1 Ilman suodattaminen painovoimaisessa ilmanvaihdossa	25
5.1.2 Raitisilmapatteri suodattimella	26
5.2 Ääni painovoimaisessa ilmanvaihdossa	28
6 Tehtaankadun ala-aste	30
6.1 Kohteen esittely	30
6.2 Tehtaankadun ympäristöolosuhteet	31
6.3 Painovoimaisen ilmanvaihdon riittävyys	33
6.4 Energiankulutus – painovoimainen vs. koneellinen	33
6.5 Luokkahuoneen painovoimaisen ilmanvaihdon toteutus Purmon AIR- radioattoreilla	35
6.6 Luokkatilan äänilaskenta	37

7	Painovoimaisen ilmanvaihdon ilmamäärät	38
7.1	Nykyhormien käyttäminen painovoimaisessa ilmanvaihdossa	39
7.2	Uusien hormien rakentaminen painovoimaiselle ilmanvaihdolle	40
8	Yhteenveto	42
	Lähteet	44
	Liite 1: Ilmanvaihdon alueet	46
	Liite 2: Ilmamäärät	48

1 Johdanto

Painovoimainen ilmanvaihto on noussut rakennusalalla puheenaiheeksi rakennusten sisäilmaongelmien ja koneellisen ilmanvaihdon ongelmien vuoksi. Koneellisen ilmanvaihdon liian suuren alipaineen aiheuttama epäpuhtauksien leviäminen rakenteiden vuotokohdista sisäilmastoon on yksi painovoimaisen ilmanvaihdon puolustusargumentti. Muutoinkin ympäristöarvot ja vihreän rakentamisen suosion lisääntyminen ovat herätelleet keskustelua ja mielenkiintoakin luonnollista ilmanvaihtoa kohtaan, olemmehan historian näkökulmasta syntyneet, kasvaneet ja kehittyneet ilman koneellista ilmanvaihtoa.

Nykyisin Suomessa painovoimasta ilmanvaihtoa suunnitellaan uudiskohteisiin erittäin vähän, lähinnä kysymykseen tulevat kesämökkit ja muut pienrakennukset. Kuitenkin käytössämme on paljon kiinteistöjä, jotka ovat alkujaan suunniteltu ja joita on pitkään käytetty painovoimaisella ilmanvaihdolla.

Yksi tällainen kohde on Tehtaankadun ala-aste Helsingissä. Painovoimaisia kouluja on Suomessa vielä joitakin, mutta suurin osa niistä on modernisoitu koneellisella ilmanvaihdolla. Tehtaankadun ala-aste on vuosisadan alussa rakennettu kulttuurihistoriallisesti arvokas ja suojeltu rakennus. Arvokas historia suojelee koulun arkkitehtuuria ja määrittää sen kunnostuksen ja korjaamisen. Ilmanvaihto on tärkeä osa rakennuksen toimintaa ja peruskorjausta.

Rakennuksen tunnelma ja visuaalisuus muuttuvat, kun korkeisiin, kaareviin ja koristeltuihin vuosisadan alun tiloihin asennetaan kanavistoja ja putkistoja. Hyvinkin sisustettuina ne muuttavat arkkitehtuurista ilmettä. Toisaalta koneellinen ilmanvaihto vaikuttaa koko rakennuksen lämpö- ja kosteustasapainoon, sisäilmastoon sekä rakennusfysikaalisen toimintaan.

Työssä tutkitaan painovoimaisen ilmanvaihdon ilmamääriä hyödyntäen nykyisiä tiilihormeja. Laskettuja ilmamääriä verrataan nyky määräysten vaatimiin henkilö määräperusteisiin ilmamääriin. Lisäksi huomioidaan nykyvaatimusten mukaiset määräykset ilman suodatukselle sekä ilmanvaihdon äänitasoille.

Mahdollisuus hyödyntää olemassa olevia ilmanvaihtohormeja turmelematta koulun historiallista tunnelmaa modernilla tekniikalla on koulurakennuksen perusparannuksen arkkitehtuurinen lähtökohta. Vastapainona on terveellinen, viihtyisä ja energiatehokas kokonaisuus, jossa käyttäjien aistima hyvänlaatuinen tunne on kuitenkin se kaikkein tärkein. Työn tarkoituksena on selvittää painovoimaisella ilmanvaihdolla toimivien julkisten arvo kiinteistöjen peruskorjausten toimenpiteet.

2 Painovoimainen ilmanvaihto

2.1 Toiminta

Painovoimaisessa ilmanvaihdossa on monia hyviä puolia, mutta myös ongelmallisia ja haasteellisia asioita. LVI – kortissa todetaan seuraavasti:

Monien selvitysten mukaan ihmiset viihtyvät paremmin luonnollisen ilmanvaihdon rakennuksissa kuin koneellisen ilmanvaihdon rakennuksissa. Selviä syitä tähän ei ole kuitenkaan voitu osoittaa. Näyttää siltä kuin ilman hidas liike ja siitä johtuva alhainen äänitaso olisi käyttäjälle keskeinen tyytyväisyystekijä. [1.]

Ilmanvaihdon keskeisin ominaisuus on taata hyvä sisäilman laatu, jossa meille kylmemässä ilmasto-olosuhteessa asuville korostuu vedottomuus, ilmanvaihdon energiatehokas sekä ilman suodattaminen [1]. Nämä asiat muodostuvat haasteellisiksi painovoimaisessa ilmanvaihdossa.

Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta perustuu ilman tiheuserojen sekä tuulen aiheuttamaan paine-eroon. Lämmin (harvempi ja kevyempi) ilma nousee ylöspäin ja kylmä ilma (tiheämpää ja raskaampaa) laskeutuu painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Lämmin sisäilma siis nousee hormoneissa ylöspäin ja kylmä ulkoilma virtaa sisälle korvausilmareiteistä. [2.]

Ilmanvaihto on sitä tehokkaampaa mitä suurempi lämpötila-ero on sisäilman ja ulkoilman välillä. Kun lämpötila-eroa ei ole, pysähtyy ilmanvaihto. Tilanteessa, jossa ulkoilma on sisäilmaa lämpimämpää, pyrkii tiheusero painamaan ulkoilmaa hormoneista sisätiloihin eli tapahtuu takaisinvirtausta. Takaisinvirtausta voi tapahtua myös sopivissa tuuliolosuhteissa. [2.]

Ilman tiheyteen vaikuttaa lämpötilan ohessa myös sen kosteus. Kosteampi ilma on kevyempää, joten sisäilman kosteuden noustessa (ihmisistä/toiminnasta johtuen) tehostuu painovoimainen ilmanvaihto hiukan. Vaikutus on kuitenkin niin vähäistä, että painovoimaisen ilmanvaihdon suunnittelu tehdään usein pelkästään lämpötila-erojen perusteella. [2.]

2.2 Painovoimaisen ilmanvaihdon konsepteja

Rakennustiedon LVI-kortissa [1] on esitetty kolme erilaista painovoimaisen ilmanvaihdon toteutustapaa: julkisivuilmanvaihto, läpivirtausilmanvaihto ja tuuletusilmanvaihto.

Julkisivuilmanvaihdossa korvausilma tulee sisätiloihin kaksoisjulkisivun kautta, jossa ilmaa johdetaan ulkoseinän ja erillisen julkisivuseinän välissä. Tällaisen soveltaminen Tehtaankadun arvokohteen kaltaiseen koulurakennukseen ei tule kysymykseen ilman merkittäviä arkkitehtuurisia muutoksia.

Läpivirtausilmanvaihto soveltuu pienehköihin ja mataliin rakennuksiin. Siinä korvausilma tuodaan sisätiloihin maan alle rakennetun kanaviston kautta, jossa ilma myös maaperän lämpötilan takia hiukan lämpiää sekä kesällä viilenee. Ilma jaetaan tiloihin esimerkiksi ikkunapenkkin alle asennetuista korvausilma säleiköistä.

Ilmassa olevat raskaat partikkelit laskeutuvat alhaisen ilman sisäänottonopeuden takia maakäytävän lattialle. Vuosittain 1–2 kertaa puhdistettava ilmakäytävä on pinnoitettu helposti pestävällä pölynsidonta-aineella. Suositus on kuitenkin, että järjestelmää sovelletaan puhtaan ympäristön alueella, kuten maaseudulla tai taajamissa. Kylmän ilmaston alueella, kuten Suomessa, on tuloilmakäytävä lämmön- ja kosteudeneristettävä. [1.]

Kouluihin tehdyissä ratkaisuissa on käytetty apupuhalimia tehostamaan korvausilmavirtaa lämpimällä säällä, kun ilma ei muutoin liiku. Yhteiseen kanavistoon on mahdollista järjestää keskitetty puhallinavusteinen ilman suodatus. Vaikka järjestelmän sähkönkulutus on alhaista, on sen rakentaminen kallista. Hinta muodostuu maanalaisen korvausilmakäytävän rakennuskustannuksista.

Kokemukset vastaaventyyppisestä järjestelmästä Latokartanon koulusta, jossa ilmavirtaa säädellään luokkakohtaisilla säätöpelleillä, osoittivat, että järjestelmän ilmamäärien

hallintaan on syytä kiinnittää huomioita. Korvausilman epätasainen jakautuminen luokkatiloihin saman ilmanvaihdon runkokanaviston varrella oli merkittävää. Yhden säätöpellin liike vaikutti muihin tiloihin tehden järjestelmästä epästabiliin. Lisäksi tilojen alipaineisuus oli mittausten perusteella heittelevää. [17.]

Korvausilmakäytävän ollessa riittävän tilava (alhainen virtausnopeus) sekä poistoilma-aukkojen sijaintien ollessa keskitettyinä, olisi järjestelmään lisättävissä alhaisen painehäviön omaava nestekiertoinen lämmöntalteenotto. Lämmöntalteenotto toteutettaisiin ns. ripaputkipattereilla, jotka eivät vaadi erillistä ilman suodattamista. Järjestelmän hyötysuhde ei olisi kovin suuri ja siitä tulisi myös kookas ja hintava (vuosihyötysuhde luokkaa 25 - 35 %). [20.]

Tuuletusilmanvaihto on perinteisen painovoimaisen ilmanvaihdon toteutustapa Suomessa. Ominaista rakennuksille on kapea runkorakenne, korkeat tilat, hyvä ulkopuolinen aurinkosuojaus, hallitut sisäiset kuormat, massiiviset rakenteet, jotka varastoivat lämpöä sekä hyvin toimivat avattavat ikkunat sekä korvausilmaventtiilit.

Tuuletusilmanvaihdossa korostuvat käyttäjän toimet, joiden tulisi ikkunoita avaamalla varmistaa riittävän hyvä sisäilman laatu. Liiallista lämpötilannousua ehkäistään yötuuletuksella, joka erityisesti julkisissa tiloissa on vaikeasti toteutettava.

Ilman epäpuhtaudet ja liikennemelu voivat olla erittäin häiritseviä, ja käyttäjän on paikon hyväksyttävä joko korkeampi huonelämpötila tai meluisuus. Korvausilma voidaan tuoda kanavistoa pitkin suojaisamman pihan puolelta. Luonnollisen ilmanvaihdon toiminnan kannalta vaakakanavistot heikentävät ilmanvaihtoa ja kanavista on tehtävä erittäin väljiä. Talvisaikaan ikkunoista tuleva veto voi olla häiritsevää ja lisää energiankulutusta. Ikkunoista tuleva ilma tulisi johtaa kohti kattoa, jossa se lämpiää ennen laskeutumista oleskeluvyöhykkeelle.

2.3 Hormiston vaikutus

Painovoimaisen ilmanvaihdon hormiin syntyy sitä suurempi veto, mitä korkeampi hormi on. Vastavoimana toimii kuitenkin kitkavastus, joka on sitä suurempaa mitä karheampi kanavisto on. Myös hormin poikkileikkausmuoto vaikuttaa ilmavirtaukseen. Neliömäisessä hormissa tapahtuu yhtä suuri virtaus kuin sellaisessa pyöreässä hormissa, jonka halkaisija on sama kuin neliömäisen kanavan sivun pituus. Suorakaiteen muotoinen

hormi on huonompi kuin neliömäinen hormi johtuen sisäpinnan suhteesta poikkileikkausalaan, joka aiheuttaa suuremman virtausvastuksen. [2.]

Hormiston mutkat aiheuttavat myös virtausvastusta, ja niitä olisi syytä välttää. Mikäli mutkia joudutaan tekemään, olisi ne syytä pyöristää. Suunnitteluohjeena on, että vaakasuuntaisen hormin maksimi pituus on 10 % koko hormin pituudesta. Korvausilmaventtiilin ja poistoilmahormin yläpään välinen korkeusero tulisi olla vähintään 4,5 metriä. [2.]

Takaisinvirtausta voi tapahtua tuulen vaikutuksesta johtuen myös kylmemmissä olosuhteissa. Tällöin on mahdollista, että kylmentyneeseen hormiin tiivistyy kosteutta sisäilmasta. Hormit tulisikin valmistaa kosteutta tasaavasta materiaalista kuten punatiilestä tai puusta, joista on kokemusta hormimateriaalina yli sadan vuoden ajalta. Peltisiä, muovisia tai pinnoitettuja poistohormeja käytettäessä tulisi suunnitella ratkaisu mahdollisen kondenssin poistamiseksi kanavistosta. [2.]

2.4 Tuulen ja ikkunatuuletuksen vaikutus

Tuulen aiheuttama paine-ero sisä- ja ulkoilman välille aiheuttaa joko sisään tai ulosvirtausta sen mukaan, aiheuttaako tuuli ali- vai ylipaineen. Tuulenpuoleisella osalla rakennusta tuuli työntää ilmaa sisään ja suojan puolella imee ilmaa ulos rakennuksesta. Tuuli myös aiheuttaa hormin päässä takaisinvirtausta. Takaisinvirtausta voidaan estää hormin muotoilulla sekä asentamalla hormin päähän tuulihattuja, jotka myös parantavat painovoimaisen ilmanvaihdon toimintaa erityisesti lämpiminä aikoina.

Tuulen vaikutukseen on merkittävänä tekijän paikkakuntakohtainen tuulisuus sekä rakennuksen ympäröivät muut rakennukset ja puusto. Tuulen vaikutus tulisi selvittää kohdekohtaisesti.

Painovoimainen ilmanvaihto toimii lämpiminä vuodenaikoina ainoastaan ikkunatuuletuksen avulla. Ikkunat on suunniteltava siten, että vedon tunne minimoidaan, mutta myös saavutetaan riittävä tuuletuspinta-ala. Jatkuvaan tuuletukseen sopii parhaiten alasaranoitu yläikkuna, joka ohjaa sisään virtaavan ilman kohti kattoa ja vähentää vedon tunnetta. Tehokkaaseen lyhytaikaiseen tuuletukseen taas sopii kapea ja korkea sivusaranoitu tuuletusikkuna. [2.]

Ikkunatuuletuksessa (ja painovoimaisessa ilmanvaihdossa ylipäättään) hankaluuksia vedon tunteen lisäksi aiheuttaa ulkoilman suodattamisen mahdottomuus sekä äänien kantautuminen ulkoa sisätiloihin. Nämä ovat ristiriidassa nykyisten ilmanvaihdon suunniteluohjeiden kanssa. Ikkunatuuletuksista ei suositella näiden johdosta paikkoihin, joissa ulkoilman epäpuhtaudet aiheuttavat ilman suodattamisen tarpeen tai ympäristön aiheuttama melu on haitallista.

2.5 Ilmanvaihdon säädettävyys

Painovoimaisella ilmanvaihdolla ei saada täysin tasalaatuista sisäilmastoa ympäri vuoden. Tämä ei ole ongelma, jos katsotaan, että ihmisen on luontevaa joustaa hiukan ympäristön ja luonnonolosuhteiden mukaan. Tällöin talvella on hyväksyttävä viileämpi tuulilma ja kesällä taas lämpö sekä suuremmat ilmavirtaukset (ikkunatuuletus).

Painovoimainen ilmanvaihto on toimintavarma ja pitkäikäinen järjestelmä, kun järjestelmän käyttäjä ymmärtää venttiileiden ja ikkunoiden avaamisen ja sulkemisen tarpeen ja ymmärtää järjestelmän toiminnan. Painovoimainen ilmanvaihto ei sovi tiloihin, joissa on erityisen suuri hetkellinen ilmanvaihdon tarve osittain juuri säädettävyytensä takia. Nykyvaatimus ilmanvaihdon 30 % tehostamisesta koskee myös painovoimaista ilmanvaihtoa. Käytännössä se toteutettaisiin käyttäjän toteuttamana ikkunatuuletuksen ja tai venttiileiden säädön avulla. [2.]

Painovoimainen ilmanvaihto aiheuttaa pienen paine-eron, jolloin vaara, että epäpuhtauksia imeetään rakenteiden vuotokohtien kautta on vähäistä. [2.]

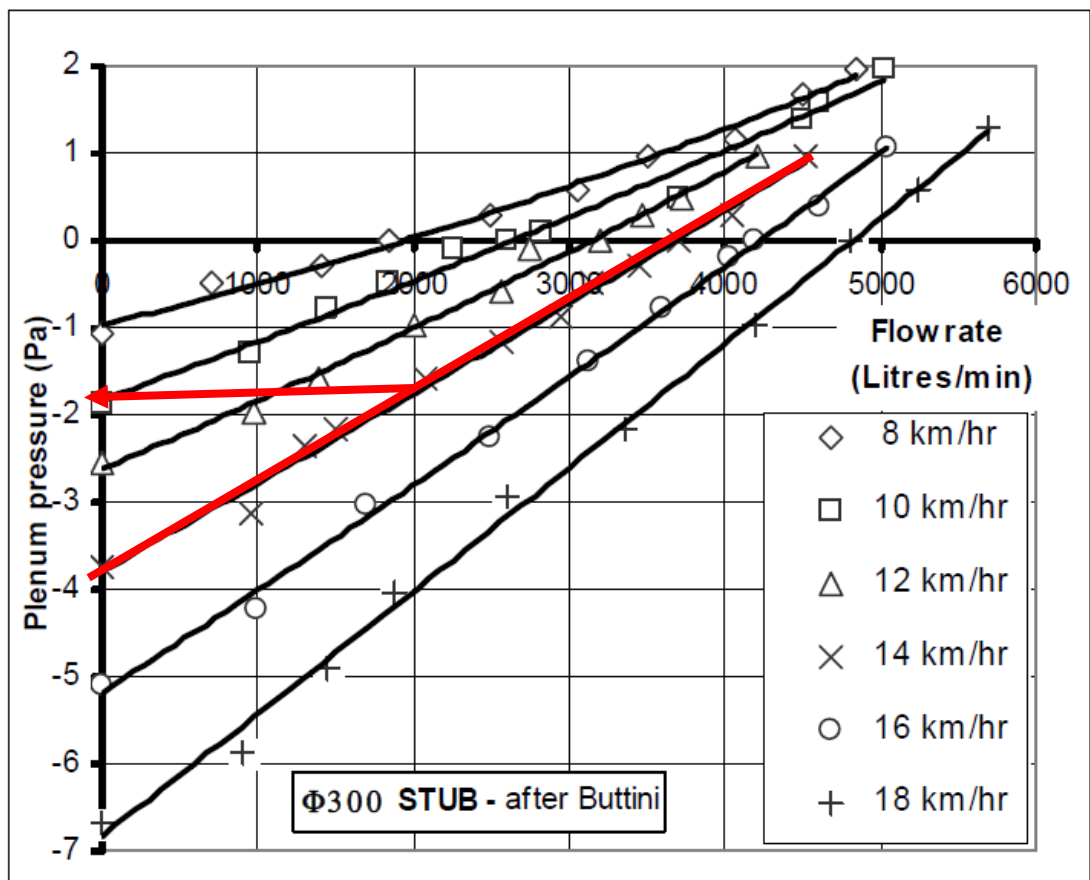
2.6 Vedonparantajat (tuuliroottorit, hormi-imurit)

Yleisesti kirjallisuudessa, ohjeistuksissa ja säädöksissä mainitaan painovoimaisen ilmanvaihdon parantajana ns. tuuliroottori, joka tuulen vaikutuksesta lisää hormin alipainetta ja siten tehostaa ilmanvaihtoa.

Kuitenkaan luotettavien mittausten tai mitoitusohjeiden löytäminen roottorivalmistajien sivuilta tai painovoimasta ilmanvaihtoa käsittelevissä opinnäytetöissä tai tutkimuksissa oli vaikeaa.

Revel, Huynh, Ismail ja Rahman [3] ja [4] mukaan tuuliroottoreiden vaikutus on kuitenkin kyseenalaistettava tai vähintään arvioitava pienemmäksi kuin valmistajien lupaamat arvot. Terveysilman [5] mukaan tuuliroottorin tehostava vaikutus on keskimäärin 20–30 %, mikä täsmää tässä selvityksessä tehdyn laskelman kanssa.

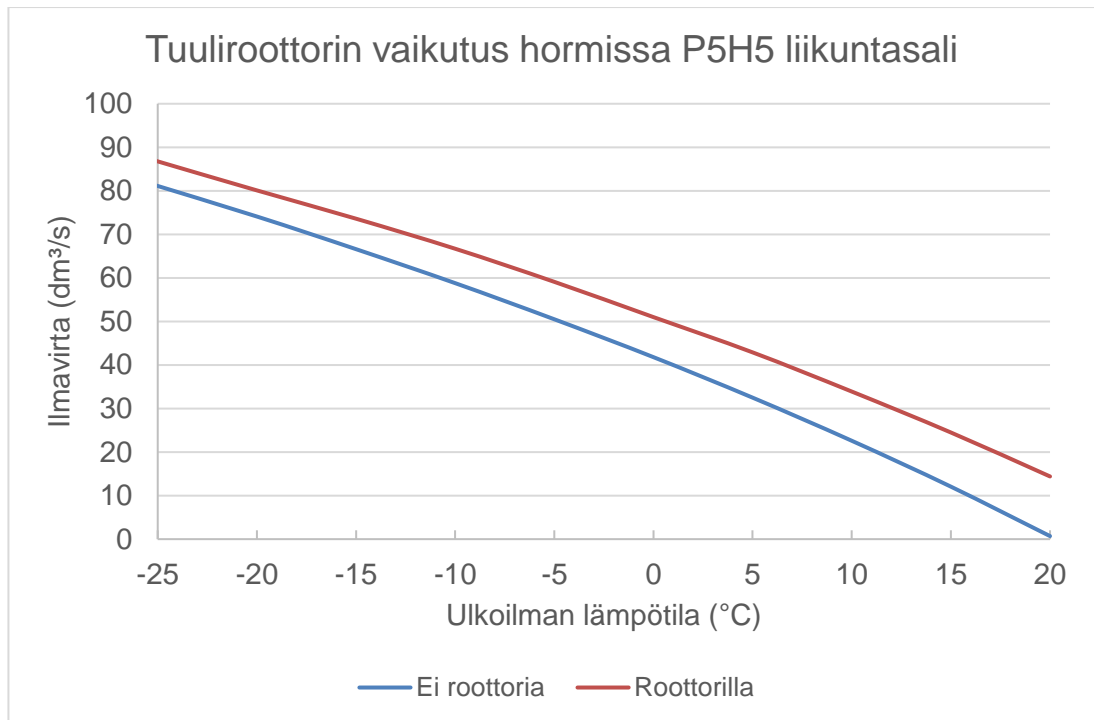
Tutkimusten ja valmistajankin käyrästön perusteella [6] roottorin vaikutus pienenee nol-laksi luonnollisen hormivaikutuksen kasvaessa suuremmaksi. Roottorilla on myös negatiivinen vaikutus alhaisilla tuulenopeuksilla ja suuressa luonnollisen hormivaikutuksen tapauksessa (kuva 1).



Kuva 1. Tuuliroottorin vaikutus hormipaineeseen riippuen tuulen nopeudesta 8–18 km/h ja luonnollisen hormivirtauksen määrään 0–6000 l/min. Esimerkiksi Etelä-Suomen keskituulenopeudella 4,17 m/s (n. 14 km/h, punainen vinoviiva) on luonnollisen hormivirtauksen ollessa 33 dm³/s tuuliroottorin aiheuttama tehostava paine-ero noin 1,9 Pa. [3.]

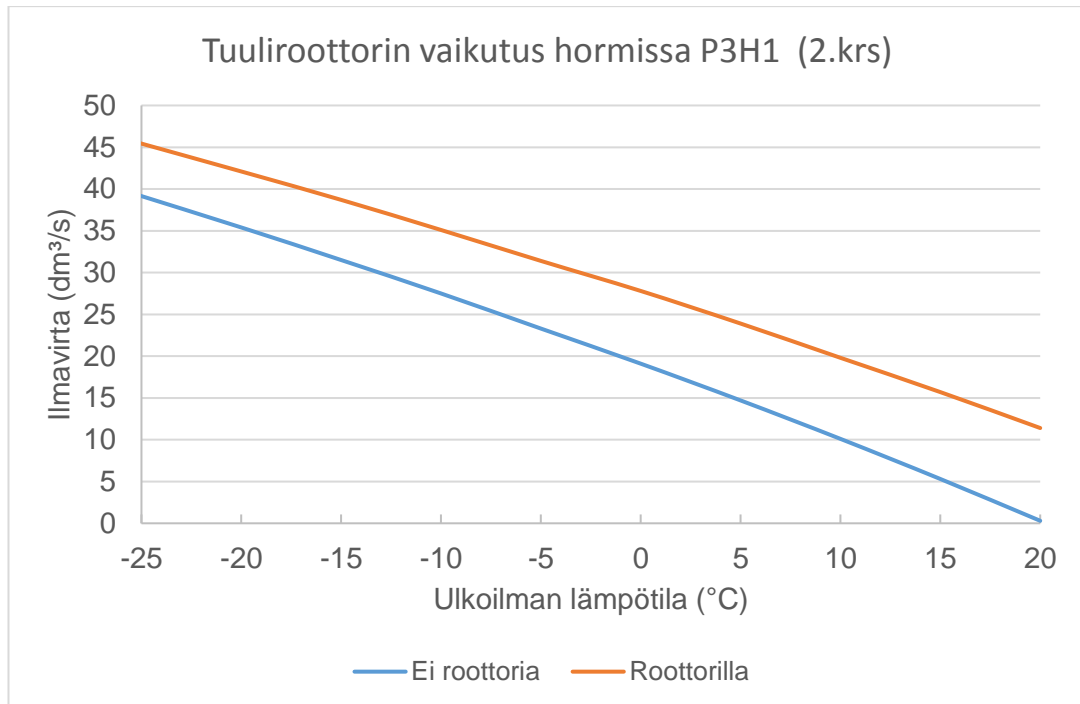
Kuten on odotettua, tuuliroottori parantaa ilmanvaihtoa erityisesti tilanteissa, joissa luonnollinen hormivaikutus on olematon ja ulkona tuulee. Kuten Revel, Huynh, Ismail ja Rahman [3.] ja [4.] ovat esittäneet, on käyrien perusteella on tehty sovitefunktio luonnollisen

hormivaikutuksen aiheuttaman ilmamäärän ja roottorin tehostavan alipaineen (tai ylipaineen) välille. Vaikutus hormipaineeseen luokkaa 2–7 Pa (Suomessa vallitsevassa keskimääräisessä tuulennopeudessa 4 m/s). Kuvaajissa (kuvat 2–4) on esitetty laskennalliset arvot painovoimaisen ilmanvaihdon toiminnasta tuuliroottorilla ja ilman. Kuvaajien luotettavuutta ei voida pitää absoluuttisena totuutena, mutta suuntaa-antavana arviona tehostuksen vaikutuksesta.

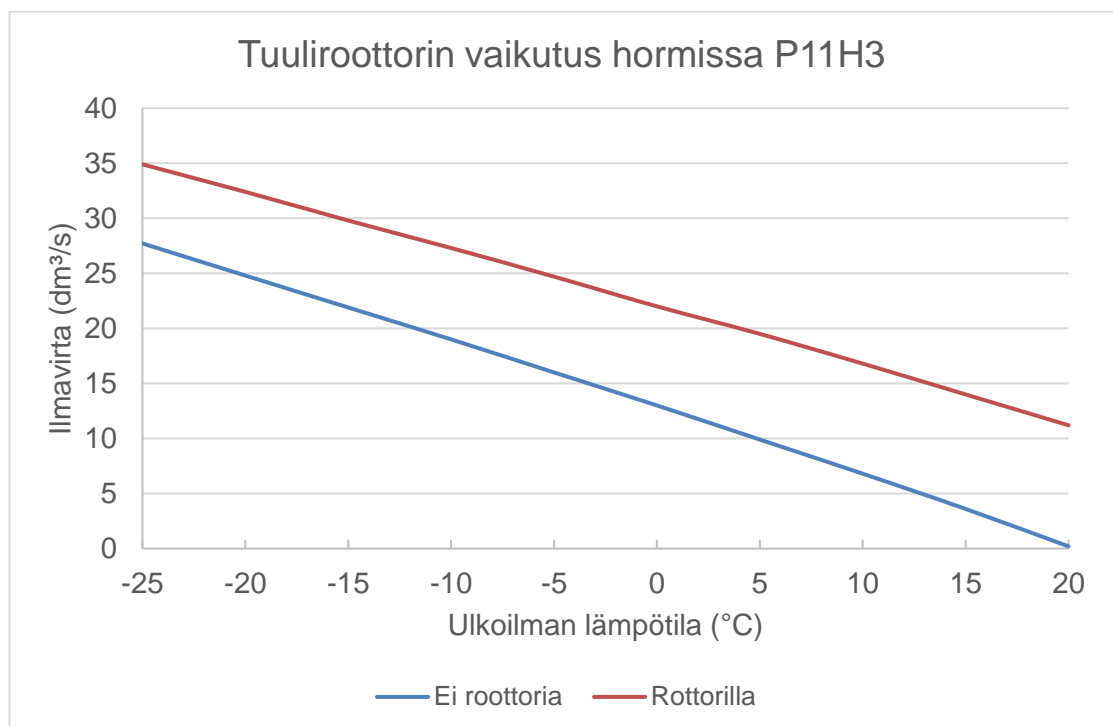


Kuva 2. Kuvaaja tuuliroottorin vaikutuksesta hormin ilmanvaihtoon Revelin ja Huynhin [3.] tulosten mukaisesti, kun tuulennopeus on 4,17 m/s. Hormin pituus 17 m (1.krs), koko 300 x 300.

Kuvaajistakin nähdään, että luonnollisen hormivaikutuksen pienentyessä (hormin lyhen-
tyessä ylemmissä kerroksissa) on roottorilla suurempi suhteellinen ilmanvaihtoa kasvat-
tava vaikutus.

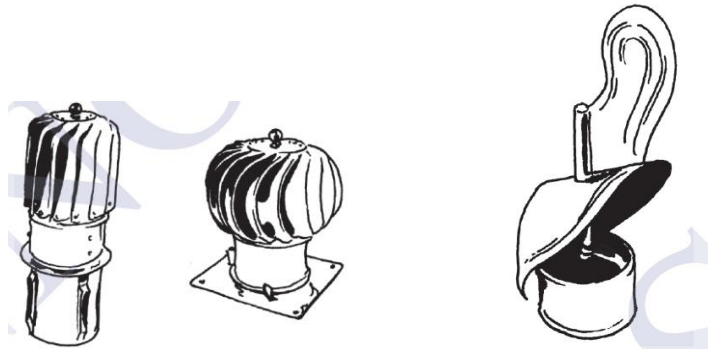


Kuva 3. Kuvaaja tuuliroottorin vaikutuksesta hormin ilmanvaihtoon Revelin ja Huynhin [3.] tulosten mukaisesti, kun tuulennopeus on 4,17 m/s. Hormin pituus on 9 metriä (2.krs) koko 300 x 300.



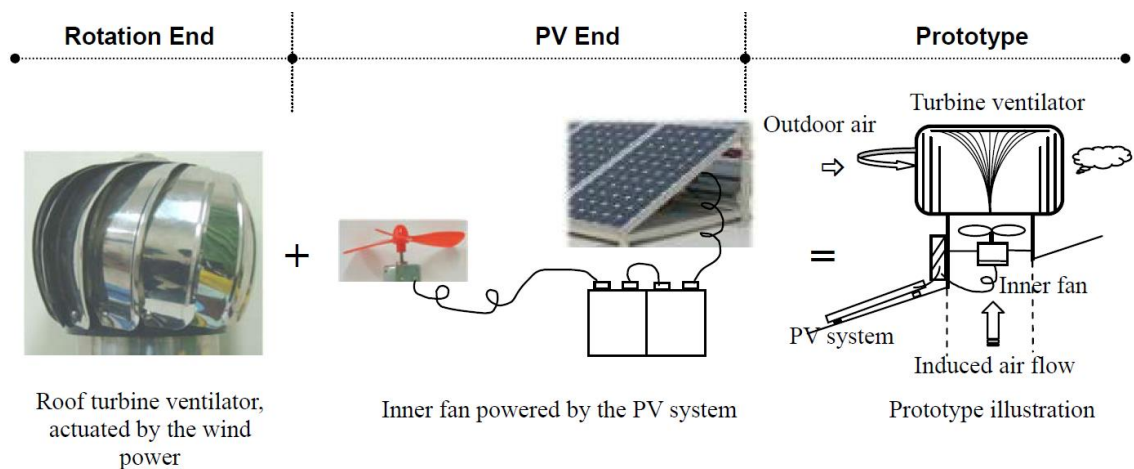
Kuva 4. Kuvaaja tuuliroottorin vaikutuksesta hormin ilmanvaihtoon Revelin ja Huynhin [3.] tulosten mukaisesti, kun tuulennopeus on 4,17 m/s. Hormin pituus 6 m (3.krs), koko 150 x 300.

Hormin päähän asennettava tuuliohjain vähentää tuulen aiheuttamaa takaisinvirtausta ja lisäksi suojaa hormia sateelta. [2.] Kuvassa 5 on esitetty tuuliroottoreita ja tuuliohjain.



Kuva 5. Tuuliroottoreita ja tuulenohjain. [2.]

Tutkimuksessa [24] todetaan, että tuuliroottorin yhteyteen liitetty aurinkosähköavusteinen puhallin auttaa tehostamaan ilmavirtausta tuulennopeuteen 7,5 m/s saakka. Tätä suuremmissa tuulennopeuksissa tuuliroottorin vaikutus dominoi eikä puhaltimesta ole enää apua. Tutkitun prototyypin kuva on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Prototyyppi tuuliroottorista, johon on integroitu aurinkosähköavusteinen puhallin. [24.]

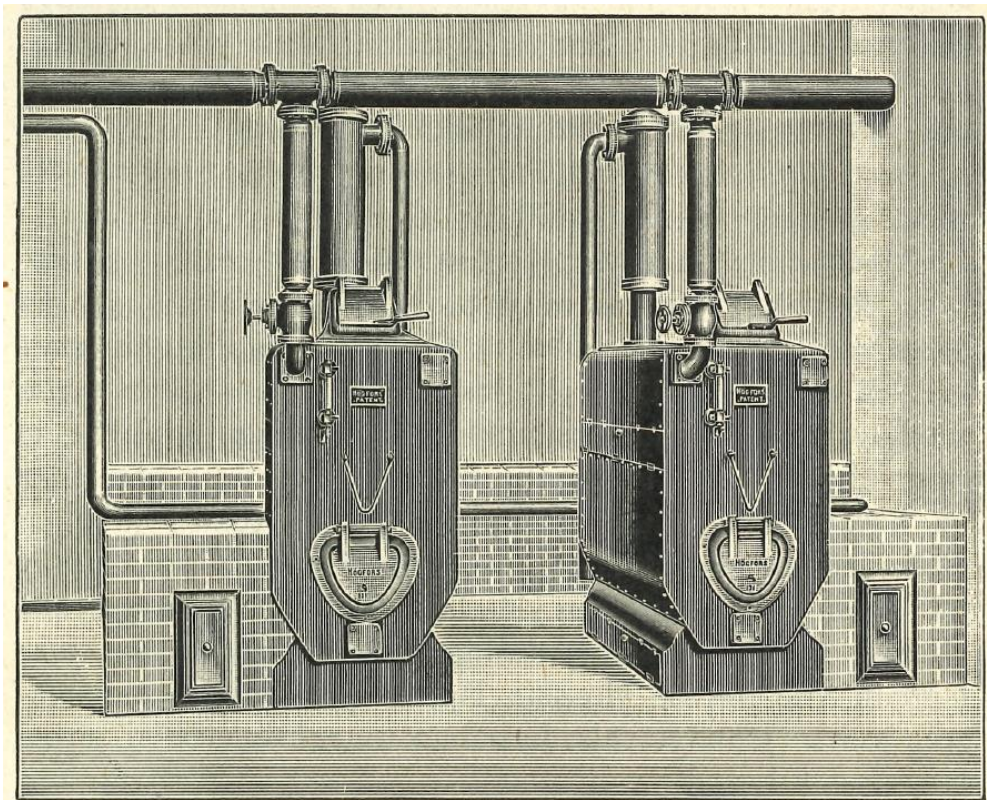
Painovoimaista ilmanvaihtoa ja tuuliroottoria voitaisiin siis avustaa sähkötoimisella puhaltimella tilanteissa, joissa ilmanvirtaus jää alhaiseksi. Tällöin järjestelmä tosin muistuttaa koneellista poistoilmanvaihtoa, mikä ei ole varsinaisesti tarkoituksena. Aurinko- ja tuulisähköavusteisissa sovelluksissa on luonnollisesti ongelmia silloin kun energiaa ei ole saatavilla.

Tuuliroottoreista löytyy myös useita tutkimuksia, joissa selvitetään mahdollisuutta hyödyntää niitä sähköntuotannossa. Tuuliroottorit siis toimisivat mikroluokan tuulivoimaina. Sovelluksilla ei kuitenkaan ole suoranaisesti tekemistä ilmanvaihdon kanssa, vaan useimmiten ne asennetaan kattotelineelle ilman alapuolista hormia.

2.7 Kaloriferijärjestelmä

1800-luvun loppupuolella rakennettiin Suomessakin keskuslämmitteisiä koulurakennuksia, joissa lämmönsiirtoaineena oli joko vesi, ilma tai höyry. Tässä työssä tarkastellussa, luvussa 6 esiteltävässä, koulurakennuksessa oli sekä keskuslämmiteinen hörypatterietä ilmalämmiteinen kaloriferi tai kalorifäärijärjestelmä.

Hörylämmityksessä kellaritiloissa olevasta hörykattilasta (kuva 7) johdettiin höyryä putkia pitkin huonetilojen lämpöpattereille, joissa höyry tiivistyi luovuttaen lämpöä ja tiivistyneen veden palatessa putkia pitkin takaisin hörykattilaan.



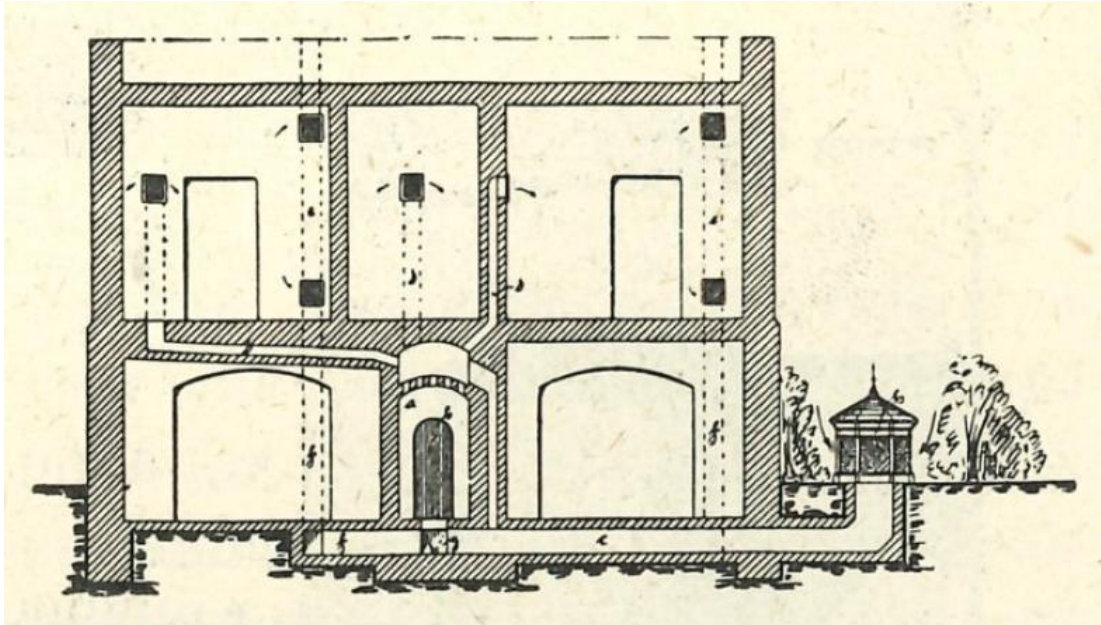
Kuva 7. Höpforssin vesi- ja hörylämmityskattiloita. [8.]

Höyrylämmitysputkisto oli toisesta päästään avonainen putki vesisäiliön yläpuolella, jottei höyrynpaine kasva liian suureksi. Höyrypattereiden koko oli pienempi verrattuna vesikiertoisiin pattereihin ja siten järjestelmä edullisempi ja sirompi. Haittapuolena on erityisesti laitoksen ylösajossa tapahtuva höyryn tiivistyminen putkistossa, jolloin niihin kohdistuu suuria hetkellisiä voimia niitä mahdollisesti vaurioittaen. Lisäksi patterien pintalämpötila nousee niin kuumaksi, että lähellä oleva ihminen kokee sen tukalaksi. Höyryjärjestelmässä on aina vähintään kaksi kattilaa, joista kumpikin yksinään riittää koko järjestelmälle. Tällöin järjestelmä toimii toisen kattilan ollessa epäkunnossa tai huollettavana.

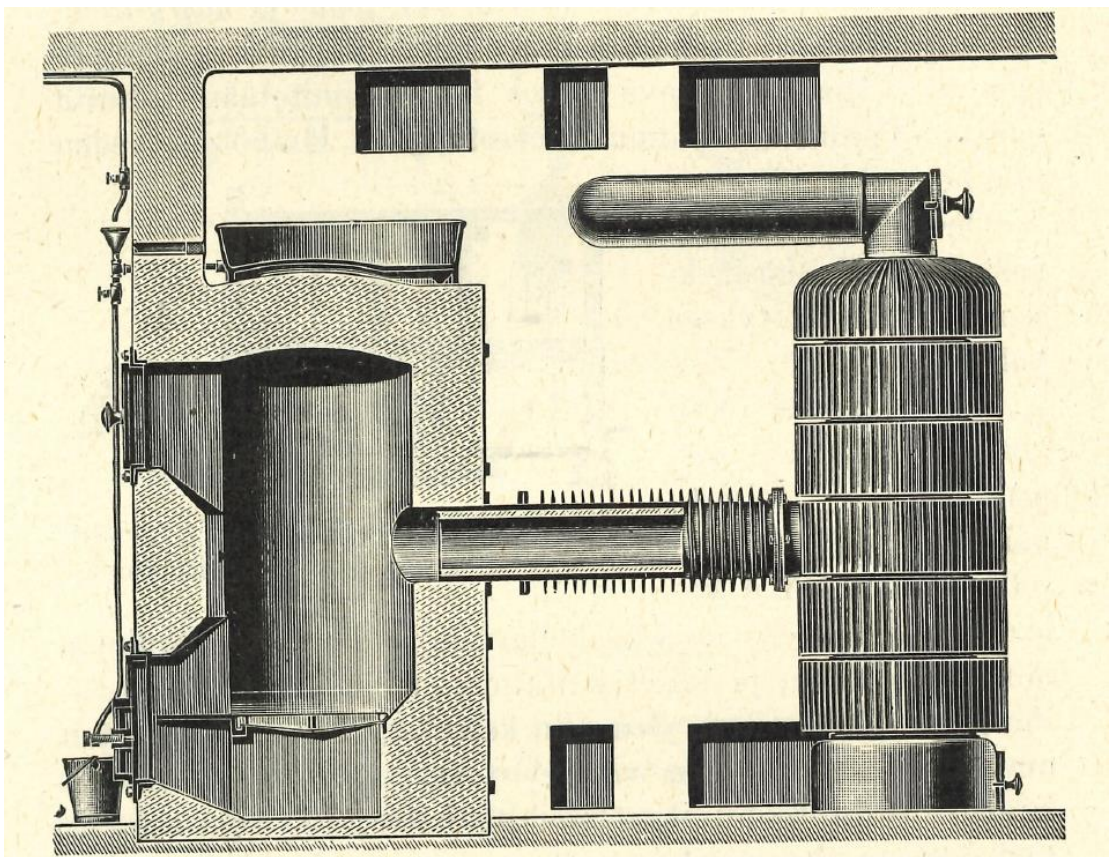
Kolmesta lämmitystavasta vanhimmassa eli ilmalämmityksessä ilmaa lämmitetään kellarin lämpökammioissa yleensä rautauunilla, *kalorifäärillä*. Kammioista lämmennyt ilma nousee sisätiloihin omien hormiensa kautta. Pinta-alaltaan suuremmissa kohteissa on useampia lämpökammioita, jotta vältytään vaakahormeilta, kuten on tilanne Tehtaankadun koulussa.

Hormien tulisi kulkea mahdollisimman pystysuoraan ja mutkia tulisi välttää. Lämpimän ilman liikkuvuuteen vaikuttaa erityisesti hormin korkeus, minkä takia ylempänä olevat kerrokset ovat edullisemmassa asemassa kuin alempana olevat tilat. Talvipakkasilla alempien kerrosten tilat on ollut vaikeampi pitää lämpimänä pelkästään ilmalämmitykseen perustuvissa järjestelmissä.

Kaloriferijärjestelmissä on myös ollut mukana ilman kostutusta esimerkiksi avonaisten vesiastioiden avulla. Tämä on kuitenkin turhaa, jos järjestelmä on hyvin suunniteltu ja sitä käytetään oikein. Myös ilmakehän huollettavuuteen on kiinnitetty huomiota mm. kanavien sileäpintaisuudella.



Kuva 8. Vuosisadan alun keskusilmalämmitysjärjestelmä. [8]



Kuva 9. Högforssin tehtaan suunnittelema lämpökammio kalorifääreineen. [8]

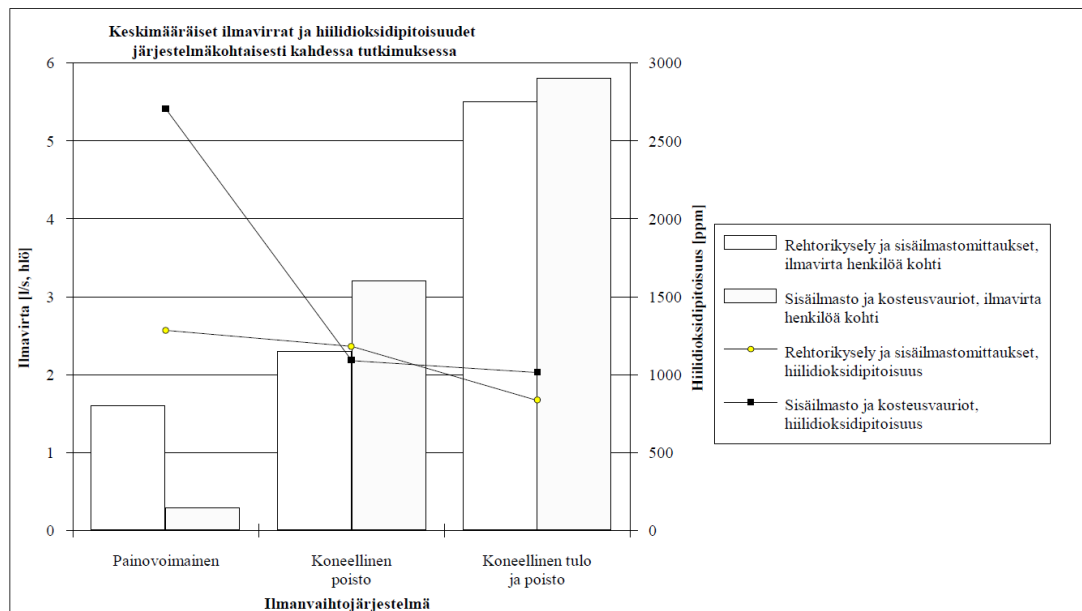
Ilmalämmitysjärjestelmä eli kaloriferijärjestelmä yleistyi 1890-luvun alussa. Kaloriferijärjestelmässä lämmintä ilmaa johdetaan tiloihin tuloilmahormiston kautta. Tuloilmahormien

lämmittäessä seinää, jossa kulkevat myös poistoilmahormit tehostui painovoimainen ilmanvaihto entisestään. Lämmityskauden ulkopuolella tätä tehostavaa vaikutusta ei kuitenkaan ole.[8.]

3 Kokemuksia koneellisesta ja painovoimaisesta ilmanvaihdosta koulurakennuksessa

Kurnitskin, Palosen ja Ruotsalaisen vuonna 1996 tekemän kyselyn mukaan [10] eniten tyytyväisiä rehtoreita oli koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon kouluissa (”täysin toimiva 57 %; ”ei toimi lainkaan 2 %) ja eniten tyytymättömiä oli painovoimaisen ilmanvaihdon kouluissa (”täysin toimiva” 18 %; ”ei toimi lainkaan” 33 %). Yleisimpinä sisäilmaongelmina koettiin vedon tunne talvella, riittämätön ja tunkkainen ilmanvaihto koko lukuvuoden ajan.

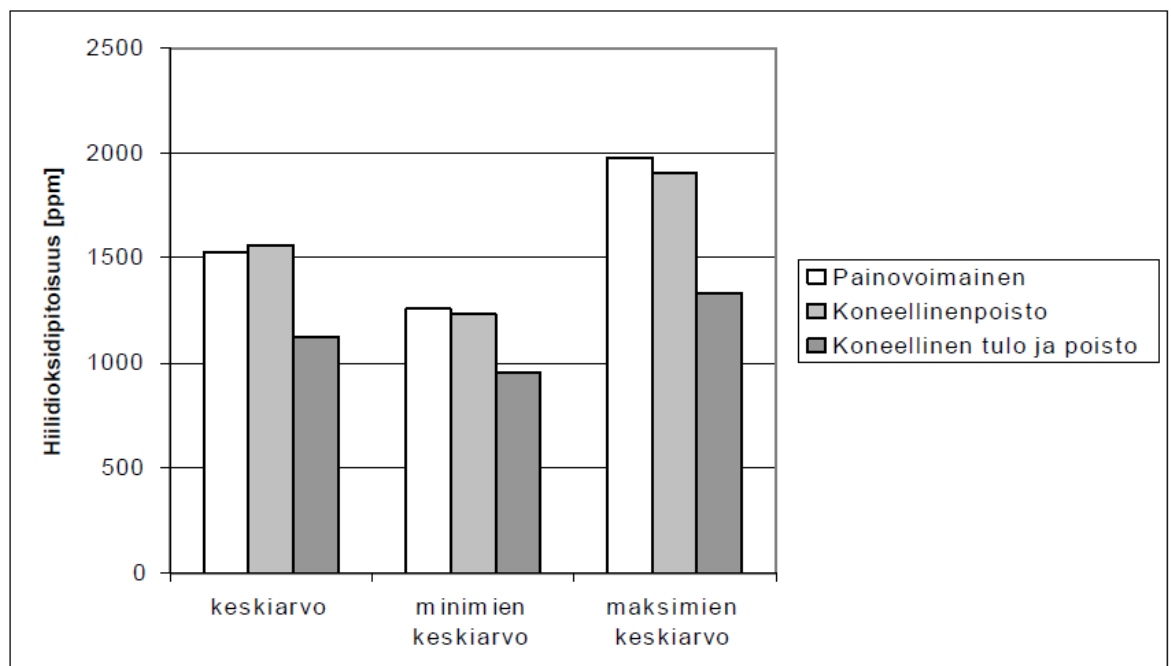
Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon kouluissa keskimääräinen ilmamäärä oli 5,9 l/s/hlö ja 1,9 l/s/m², koneellisen poistoilmanvaihdon kouluissa 2,3 l/s/hlö ja 0,9 l/s/m² sekä painovoimaisen ilmanvaihdon kohteissa mitatut ilmamäärät olivat keskimäärin 1,6 l/s/hlö ja 0,39 l/s/m² (kuva 10).



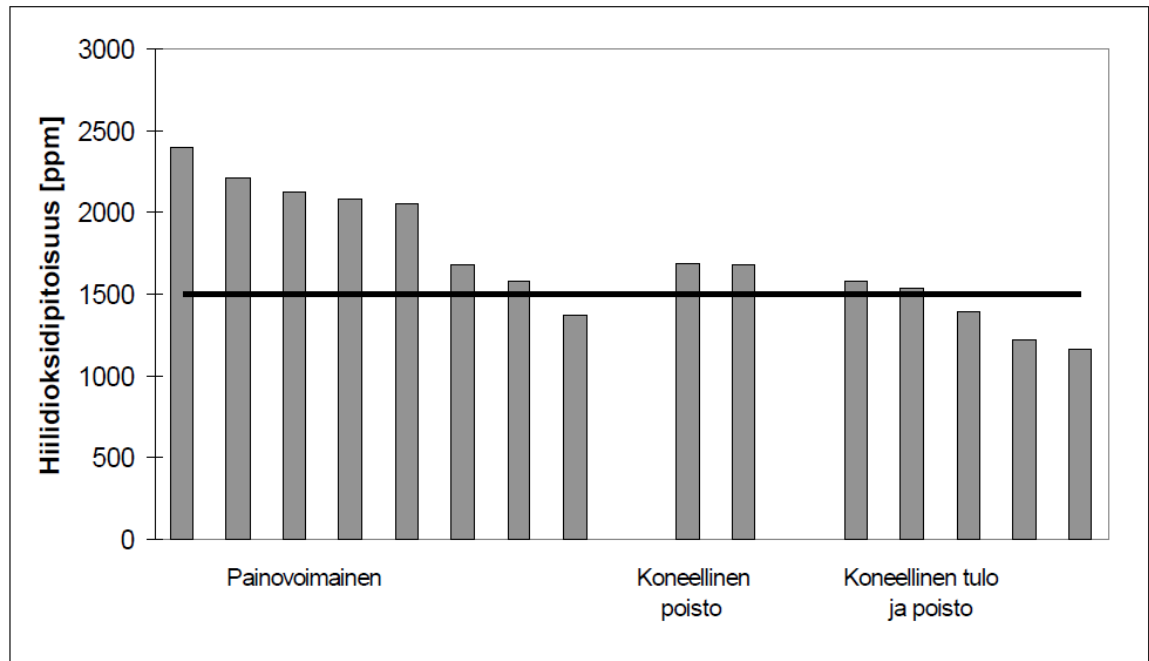
Kuva 10. TKK:n vuonna 1996 tekemän koulujen sisäilmastaselvityksen tuloksia [10].

Mitatut hiilidioksidipitoisuudet olivat keskimäärin koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon kouluissa 836 ppm, koneellisen poiston kouluissa 1 181 ppm ja painovoimaisen ilmanvaihdon kouluissa 1 285 ppm. Hiilidioksidipitoisuusmittaukset suoritettiin kymmenessä koulussa yhteensä 34 luokassa yhden opetustunnin aikana kertamittauksena.

Yhteenvedona tutkimuksista voidaan sanoa, että ilmanvaihtojärjestelmällä oli syy-yhteys rehtorien kyselytulokseen sekä mitattuihin hiilidioksidipitoisuus ja lämpötilamittauksiin. Vastaavantyyppisiä tuloksia saatiin myös Karjalaisen ja Kimarin [11] tekemässä selvityksessä (kuva 11 ja 12).



Kuva 11. Oulun kaupungin vuosina 1998 - 1999 tekemän koulujen sisäilmast selvityksen hiilidioksidipitoisuusmittauksen tulokset [11].



Kuva 12. Oulussa vuonna 1999 tehtyjen koulumittausten hiilidioksidipitoisuuksia [11].

Karjalaisen ja Kimarin tutkimuksessa [11] selvitettiin eri-ikäisten ja eri ilmanvaihtotekniikoilla toteutettujen koulujen sisäilmastoa ja energiataloutta. Kaikissa kohteissa oli tulossa perusparannus ja kysely- ja mittaustutkimukset tehtiin ennen ja jälkeen remontin. Painovoimaisen ilmanvaihdon kouluja oli tutkimuksessa kahdeksan kappaletta, jotka remontin yhteydessä muutettiin koneelliseksi tulo- ja poistoilmanvaihdollisiksi.

Yhteenvedon kyselytuloksista ennen remonttia voidaan sanoa, että painovoimaisen ilmanvaihdon kohteiden kyselytulokset ovat vastaavantyyppisiä kuin koneellisella poistoilmanvaihdolla varustetuissa kouluissa. Parhaat kyselytulokset sai koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetut koulut.

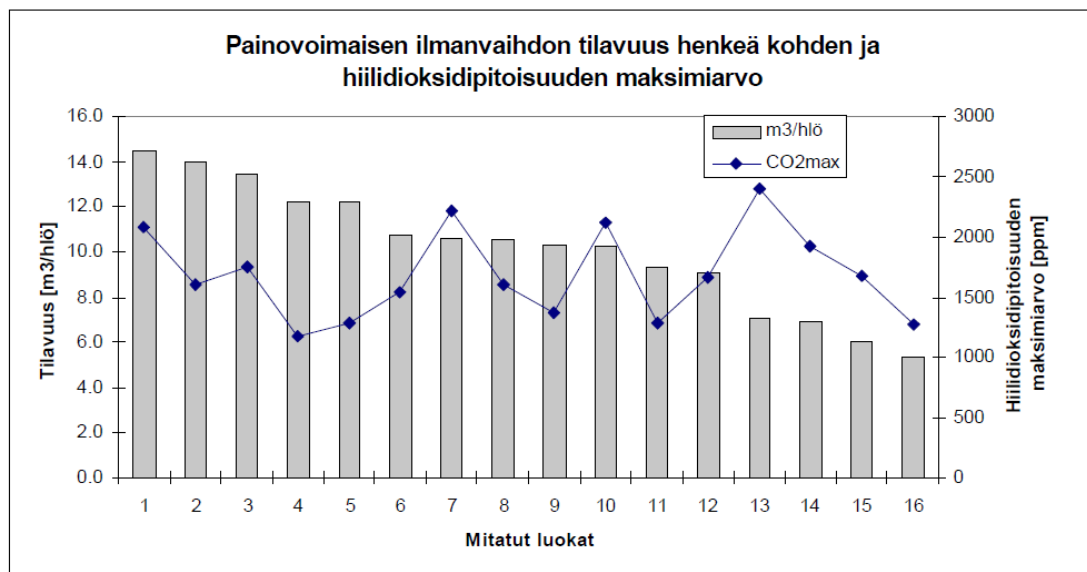
Remonttien jälkeen painovoimaisen ilmanvaihdon koulujen sisäilman hiilidioksidipitoisuus laski keskimäärin 850 ppm. Remontin jälkeisen kyselyn tuloksissa ei valitettavasti eritelty miten kyselytulokset muuttuivat painovoimaisen ilmanvaihdon kouluissa ilmanvaihdon muuttuessa koneelliseksi tulo- ja poistoilmanvaihdoksi. Kokonaisuudessaan kuitenkin kyselyn tulokset remontin jälkeen olivat parantuneet selvästi.

Mielenkiintoinen havainto painovoimaisen koulun hiilidioksidipitoisuusmittauksissa oli se, että luokkatilojen tilavuudella ei ollut suoranaista yhteyttä hiilidioksidipitoisuuteen.

Kuvassa 13 esitetystä käyrästä kahdessa luokkatilassa on CO₂ -pitoisuus ollut alle 1200 ppm.

Samassa yhteydessä tutkittiin myös koulujen energiankulutusta, mutta tässä ei eritelty kuinka painovoimaisen ilmanvaihdon koulujen osalta kävi. Kokonaisuudessaan mitatuissa kouluissa (5 kpl) lämmitysenergiankulutus nousi keskimäärin 12 % ja sähköenergiankulutus 34 %. Nämä johtuvat kasvaneista ilmanvaihtomääristä ja puhaltimien sähkökulutuksesta. Raportissa kuitenkin todetaan, että nämä arvot ovat hyvin epävarmoja, koska mittausaika jäi lyhyeksi (6–12 kk) ja usein ilmanvaihto pidetään remontin jälkeen päällä 24/7.

Tutkimuksen perusteella laadittiin ohjeistus ”koulujen ilmanvaihdon korjausratkaisut”, jossa todetaan, että kouluissa tarvitaan koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto lämmöntalteenotolla. Jäähdytystä kouluissa ei ohjeistuksen mukaan tarvita vähäisen kesäkäytön takia. Huomioitava on kuitenkin, että tutkimuksen koulurakennukset eroavat niin rakennusialtaan kuin arkkitehtuuriltaan Tehtaankadun ala-asteesta [11.].



Kuva 13. Painovoimaisen ilmanvaihdon koulujen hiilidioksidipitoisuudet luokkahuoneiden tilavuuden mukaan [11].

4 Painovoimaisen ilmanvaihdon laskenta

4.1 Hormivaikutuksen laskenta

Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta perustuu ilman tiheyseroihin. Yksinkertaisempi ja hiukan epätarkempi menetelmä on laskea hormivaikutuksen aiheuttama paine-ero pelkästään sisä- ja ulkoilman lämpötila-eron perusteella. Tarkemmassa laskennassa huomioidaan sisä- ja ulkoilman kosteus, jotka vaikuttavat ilman tiheyteen ja siten hormivirtaukseen. Lisäksi on huomioitava hormin kitkavastus sekä hormiston suunnanmuutokset (90°:n kulmat). Erityisen suuri vaikutus on hormin korkeudella: mitä korkeampi hormi, sen suurempi ilmavirtaus.

Hormivaikutuksen tuottama paine-ero lasketaan yhtälöllä 1.

$$\Delta p_{\text{hormi}} = \Delta \rho \times g \times h \quad (1)$$

Δp_{hormi} on hormivaikutuksen paine-ero [Pa]
 $\Delta \rho$ on sisäilman ja ulkoilman välinen tiheysero [kg/m³]
 g on painovoiman kiihtyvyys [9,81 m/s²]
 h on hormin ylä- ja alapään välinen korkeusero [m]

Ilman tiheyteen sekä sisällä että ulkona vaikuttaa lämpötilan lisäksi ilman kosteus. Ilman tiheys lasketaan yhtälöllä 2

$$\rho = \frac{p_{k,i} M_{k,i} + p_h M_h}{RT} \quad (2)$$

ρ on ilman tiheys [kg/m³]
 $p_{k,i}$ on kuivan ilman osapaine [Pa]
 $M_{k,i}$ on kuivan ilman moolimassa [28,96 g/mol]
 p_h on vesihöyryn osapaine [Pa]
 M_h on vesihöyryn moolimassa [18,91 g/mol]
 R on yleinen kaasuvakio [8,314 J/(mol K)]
 T on ilman lämpötila [K]

kuivan ilman osapaine lasketaan yhtälöllä 3

$$p_{k,i} = p_{\text{ymp}} - p_h \quad (3)$$

p_{ymp} on ympäristön kokonaisilmanpaine [101 325 Pa]

vesihöyryn osapaine lasketaan yhtälöllä 4

$$p_h = \frac{\varphi}{100} p'_h \quad (4)$$

φ on ilman suhteellinen kosteus [%]
 p'_h on kylläisen vesihöyryn paine [Pa]

kylläisen vesihöyryn paine lasketaan yhtälöllä 5

$$p'_h(T) = 10^5 \cdot e^{11,78 \left[\frac{(T-372,79)}{(T-43,15)} \right]} \quad (5)$$

T on ilman lämpötila [K]

4.2 Poistoilmahormin painehäviö

Poistoilmahormin painehäviö lasketaan kuten muukin kanavan tai putkivirtauksen painehäviö.

$$\Delta p_{virtaus} = \left(\frac{\lambda}{d_h} L + \sum \xi \right) \times \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (6)$$

ρ on ilman tiheys [kg/m³]
 v on ilman nopeus hormissa [m/s]
 λ on kitkavastuskerroin [-]
 d_h on hydraulinen halkaisija [m]
 L on hormin kokonaispituus [m]
 $\sum \xi$ on poistoilmahormin kertavastuslukujen summa (suunnanmuutokset)[-]

kitkavastuskerroin λ lasketaan yhtälöillä 7–10 riippuen virtauksen turbulenttisuudesta. Laminaarivirtauksessa ($Re < 2300$) kitkavastuskerroin lasketaan yhtälöllä

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (7)$$

Reynoldsin luku lasketaan yhtälöllä

$$\text{Re} = \frac{v d_h}{\nu} \quad (8)$$

ν on ilman kinemaattinen viskositeetti [m^2/s]

Kehittyvässä virtauksessa ($2300 \leq \text{Re} \leq 4000$) kitkavastuskerroin lasketaan yhtälöllä 9 [21]

$$\lambda = \left[-2 \times \text{LOG} \left(\frac{k}{(3,71 \times d_h)} + \frac{2,51}{\text{Re}} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

k on kanavan karheus [m]

Turbulenttisessä virtauksessa ($\text{Re} > 3000$) kitkavastuskerroin lasketaan yhtälöllä

$$\lambda = \left[\left(2 \times \text{LOG} \frac{3,71 \times d_h}{k} \right)^{-1} \right]^2 \quad (10)$$

Taulukossa 1 on esitetty eri materiaalien virtauskanavan karheuksia.

Taulukko 1. Erialaisten virtauskanavien pinnankarheuden arvoja [9].

	Karheus, k
MATERIAALIT MITOITUS 2	mm
Pelti	0,15
Sukka (FuranFlex)	0,5
Tiili, tas.uusi (2)	2
Tiili, tas.vanha (3)	3
Tiili, raaka, uusi (5)	5
Tiili, raaka, vanha (8)	8

Hydraulinen halkaisija lasketaan kulmikkaan kanavan tapauksessa yhtälöllä 11. Pyöreän kanavan tapauksessa käytetään kanavan sisähalkaisijaa.

$$d_h = \frac{(2ab)}{(a+b)} \quad (11)$$

a on kanavan leveys [m]
b on kanavan syvyys [m]

4.3 Tulo- ja poistoilmaventtiileiden ja säleikköjen painehäviö

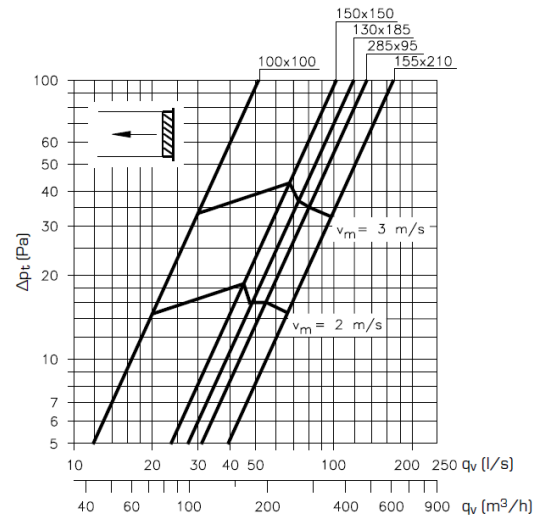
Kitkapainehäviön lisäksi painehäviötä muodostuu ulkoilmasäleiköstä sekä tulo- ja poistoilmaventtiilistä. Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminnan kannalta on erittäin tärkeää, että näiden laitteiden kokonaispainehäviö on alhainen. Painehäviön tulisi olla alle 4 Pa, mielellään alle 2 Pa [2]. Kuvissa 14 – 15 on esitetty tuloilmasäleikön koko- ja painehäviötietoja.

USVN



Koko B x H	B ₁ x H ₁ (mm)	Paino (g)
100 x 100	130 x 130	270
150 x 150	180 x 180	430
285 x 95	315 x 125	590
130 x 185	160 x 215	590
155 x 210	190 x 245	670

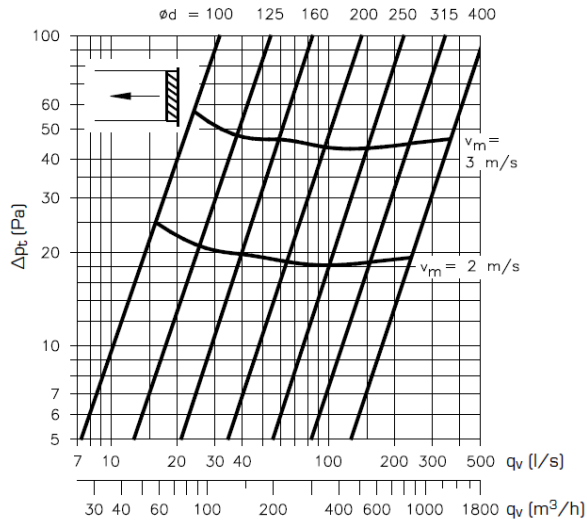
USVN



Kuva 14. Suorakulmainen USVN -tuloilmasäleikkö: mitat ja painehäviöt.



USAV



USAV

Koko	ØD (mm)	Ød (mm)	A (mm)	C (mm)	Paino (g)
50	65	49.5	3	20	38
63	78	62.5	3	20	67
70	86	69.5	3	20	75
80	99	79.5	3	20	81
100	132	99.5	3	25	165
125	152	124.5	3	25	235
150	181	149.5	3	25	360
160	189	159.5	3	25	410
200	231	199.5	3	25	490
250	278	249.5	3	28	740
315	355	314	4	25	1235
400	439	399	5	26	2182

Kuva 15. Pyöreä USAV -tuloilmasäleikkö: painehäviöt ja mitat.

4.4 Poistoilmahormin ilmavirran laskeminen

Poistoilmahormiin syntyy hormivaikutuksen johdosta alipaine ja ilmavirtaus. Alipaine on yhtä suuri kuin kaikki virtausvastukset yhteensä. Virtausvastuksiin sisältyy itse hormin aiheuttama kitka- ja kertavastusten summa sekä venttiileiden, säleikköjen, suodattimien, äänenvaimentimien ja korvausilmakanavien painehäviö (kaava 12).

$$\Delta p_{\text{hormi}} = \Delta p_{\text{häviöt}} \quad (12)$$

Δp_{hormi} on hormivaikutuksen paine-ero [Pa] (kaava 1)

$\Delta p_{\text{häviöt}}$ on virtausvastusta aiheuttavien painehäviöiden summa [Pa]

Painehäviöt lasketaan yhtälöllä 13

$$\Delta p_{\text{häviöt}} = \Delta p_{\text{virtaus}} + \Delta p_{\text{laitteet}} \quad (13)$$

$\Delta p_{\text{virtaus}}$ on hormin kitka- ja kertavastusten painehäviö [Pa] (kaava 6)
 $\Delta p_{\text{laitteet}}$ on venttiileiden, säleikköjen yms. laitteiden painehäviö [Pa]

Sijoittamalla kaava 13 kaavaan 12 ja ratkaisemalla yhtälöstä virtausnopeus v saadaan laskettua hormissa virtaavan ilman nopeus ja edelleen kertomalla se hormin pinta-alalla saadaan hormissa virtaava ilmavirtaus. Koska poistoilmahormin painehäviö ja venttiileiden yms. laitteiden painehäviö ovat riippuvaisia ilman virtausnopeudesta, ratkaistaan virtausnopeus iteroimalla.

5 Ääni ja suodatus

5.1 Ilman suodattaminen

Ilman suodattaminen ilmanvaihtojärjestelmissä voidaan jakaa seuraaviin pääluokkiin:

- Hiukkassuodatin (kuitusuodatin)
- Kaasusuodatin (aktiivihiihisuodatin)
- Sähkösuodatin
- UV-suodatin

Hiukkassuodatin on yleisin käytetty suodatinmalli ja sen toiminta perustuu ohuiden kuitujen aiheuttamiin sekä mekaanisiin, että sähköisiin ilmiöihin. Hiukkassuodattimien suodatusaste on laaja alkaen karkeasuodattimista (G-luokka) päättyen pienhiukkassuodattimiin (EPA, HEPA ja ULPA –suodattimet).

Hiukkassuodattimen etuina on edullinen hinta (suodatusasteen kasvattaminen lisää hintaa merkittävästi) ja toimintavarmuus. Haittapuolina on asennuksen tiiviyn varmistaminen, suodattimen aiheuttama painehäviö ja sen kasvaminen suodattimen ikääntyessä sekä säännöllinen huoltotarve (suodattimien vaihtaminen).

Kaasusuodatin poistaa ilmasta kaasumaisia epäpuhtauksia ja vaatii usein taaksensa vähintään karkeasuodattimen suodatinmateriaalista irtoavan pölymäisen epäpuhtauden suodattamiseksi. Yleisin käytetty kaasusuodatin on aktiivihiihi, mutta myös muita suodatinmassoja, adsorbenttejä, käytetään suodatustarpeen mukaisesti (CO₂, SO₂, NO₂, O₃, VOC-yhdisteet, NO jne.). [18.]

Sähkösuodattimien käytön ennustetaan lisääntyvän LVI-sovelluksissa paikallispuhdistimien, alhaisen painehäviön ja yleisesti kasvavien vaatimusten lisääntyessä. Sähkösuodattimet erottavat ilmasta tehokkaasti pienhiukkasia ultrapienistä hiukkasista (<0,01 µm) näkyviin hiukkasiin saakka. Haittapuolena on, että sähkösuodattimet tuottavat myös otsonia (O₃), joka on erittäin reaktiivinen ja voimakas hapetin. Otsoni aiheuttaa hengitettynä ärsytystä keuhkojen limakalvoille ja voi vaurioittaa keuhkokudosta sekä aiheuttaa hengitysvaikeuksia. Erityisesti alttiita ovat astmaatit, vanhukset sekä pikkulapset. Lisäksi otsoni voi muodostaa muiden kemiallisten aineiden kanssa muita ei-toivottuja yhdisteitä. [19.]

Otsonin syntymekanismia sähkösuodattimissa ei tarkasti tunneta, mutta käytettäessä alhaisempaa jännitettä on otsonin muodostuminen vähäisempää, tällöin tosin myös hiukkasuodatusteho on pienempi. [19.]

Ultraviolettisäteily-suodatin (UV-suodatin) poistaa tehokkaasti viruksia, bakteereja ja homeitiöitä, mutta tarvitsee aina rinnalleen myös hiukkasuodattimen. UV-suodatuksessa on huomioitava käyttöturvallisuus sekä syntyvä suodatuksessa syntyvä otsoni.

5.1.1 Ilman suodattaminen painovoimaisessa ilmanvaihdossa

Painovoimaisessa ilmanvaihdossa korvausilma otetaan huonetilaan joko ulkoseinässä olevan korvausilmaventtiilin, ikkunan ylä- tai alapuolella olevan rakoventtiilin tai ikkunatiivisteiden ja puitteiden rakosista. Painovoimaisen ilmanvaihdon aikaansaaman alhaisen paine-eron takia on venttiilien painehäviöiden oltava pieniä. Vastaavasti tulisi käytettävien suodattimien painehäviön olla erittäin alhainen mikä tekee ilman suodattamisesta hankalaa. Karkeat G4-luokan suodattimet toimivat kohtuullisesti kylmällä ilmalla, mutta tynnessä ja lämpimässä säässä on niidenkin aiheuttama painehäviö usein liikaa.

Hiukkasuodatuksen tarpeen vuoksi ei voida käyttää kaasusuodatusta eikä UV-suodatusta. Sähkösuodattimet ovat alhaisen painehäviön ja tehokkaan toimintansa vuoksi houkutteleva ratkaisu, mutta ongelmaksi muodostuu otsonin muodostuminen ja huomioitava on sähkönkulutus sekä huollettavuus ja huollon tarve (suodattimien peseminen).

Hiukkassuodattimet ovat varmin ratkaisu, mutta niiden painehäviö osittain estää niiden käytön vain joitakin Pascaleja paine-ero tekevän painovoimaisen ilmanvaihdon ratkaisussa. Suuri suodattimien lukumäärä tekee myös niiden huollosta kalliimpaa ja työläämpää.

Järkevin tapa ilman suodatukseen olisi tehdä se keskitetysti suuremmilla suodattimilla ja suodatuspinta-alan suhteen kasvaessa tarvittavaan ilmamäärän, myös alhaisemmilla painehäviöillä. Toisaalta, jos ulkoilma olisi riittävän puhdasta, ei suodatusta tarvittaisi lainkaan tai pelkkä karkeasuodatus olisi riittävä. Huonekohtaisilla ilmanpuhdistimilla saadaan parannettua sisäilman laatua, mutta ei luonnollisesti poisteta hiukkaslähdettä eli korvausilmaa.

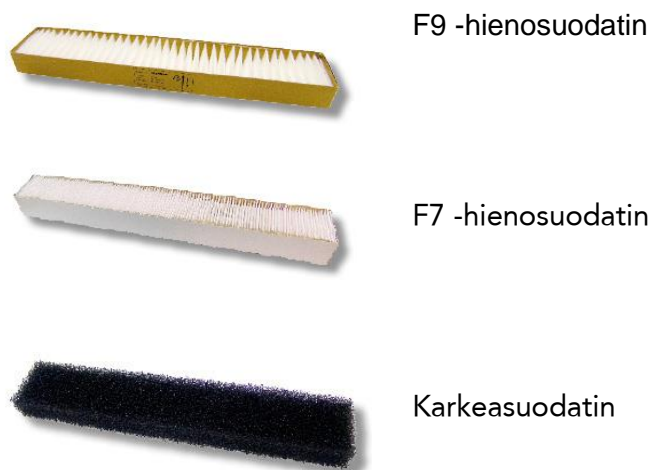
5.1.2 Raitisilmapatteri suodattimella

Saatavilla on Purmon valmistama raitisilmapatteri, jossa ulkoilma virtaa rakomaisen aukon sekä suodattimen läpi lämmityspatterille. Sekä virtauskanavisto, suodatin että patteri aiheuttavat painehäviötä. Tuote on lähtökohtaisesti suunniteltu koneellisen poistoilmanvaihdon tarpeisiin, mutta niiden käyttäminen myös painovoimaisen ilmanvaihdon tapauksessa on mahdollista.



Kuva 16. Purmon Air-tuloilmalaitteet (raitisilmaradiaattorit). Vasemmalla standardimalli ja oikealla teleskooppimalli [22].

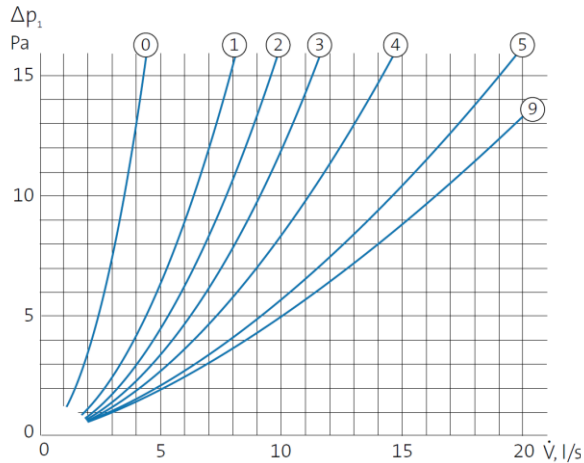
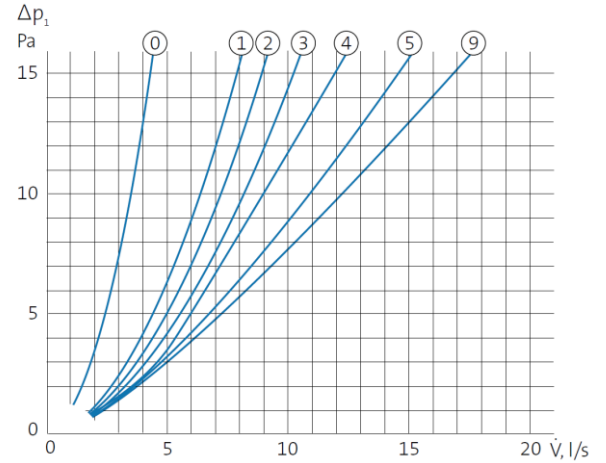
Suodattimeksi on valittavissa kolme erilaista suodatinta; hienosuodatin F9, hienosuodatin F7 ja pestävä karkeasuodatin.



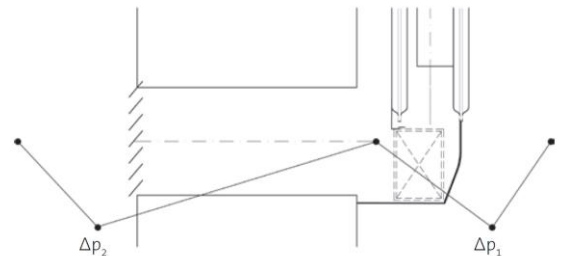
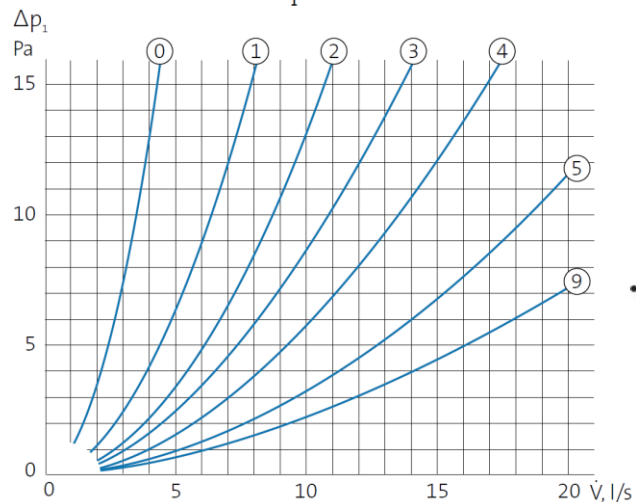
Kuva 17. Purmon raitisilmaradiaattoreihin saatava suodattimet [22].

Raitisilmaradiaattoriratkaisussa saataisiin tiloihin hallittu, suodatettu ja lämmitetty korvausilma. Ilman riittävyys on kuitenkin syytä varmistaa tilakohtaisesti riippuen radiaattorin koosta. Myös suodattimien vaihtotyö olisi tehtävä säännöllisesti.

Kuvassa 18 ja 19 on esitetty raitisilmaradiaattorin painehäviökäyrät riippuen suodattimesta (ΔP_1) sekä patterin rivisyydestä. Painehäviökäyrät eivät huomioi tuloilmaventtiilin aiheuttamaa painehäviötä (ΔP_2).

DIAGRAM 1: F9 PARTIKELFILTER – Δp_1 DIAGRAM 2: F7 PARTIKELFILTER – Δp_1 

Kuva 18. Purmon raitisilmariaattorin painehäviöt, kun suodattimena F9- tai F7-hieno-suodattimet. Käyrät 0–9 ovat radiaattorimallille 22 ja käyrät 0–5 malleille 11 ja 21. (0 on täysin kiinni ja 9 täysin auki).

DIAGRAM 3: GROVFILTER – Δp_1 

Kuva 19. Purmon raitisilmaradiaattorin painehäviö, kun suodattimena on karkeasuodatin. Käyrät 0–9 ovat radiaattorimallille 22 ja käyrät 0–5 malleille 11 ja 21. (0 on täysin kiinni ja 9 täysin auki). Oikealla on esitetty kokonaispainehäviön muodostuminen.

5.2 Ääni painovoimaisessa ilmanvaihdossa

Painovoimainen ilmanvaihto vaatii suuret ja väljät (alhainen painehäviö) korvausilma-aukot. Epäpuhtauksien lisäksi korvausilma-aukoista sisätiloihin kantautuva äänihaitta voi olla merkittävä. Sainion painovoimaisen ilmanvaihdon suunnitteluoppaassa [2] sekä LVI-

kortissa [1] mainitaan, ettei painovoimaista ilmanvaihtoa tulisi käyttää alueilla, joissa on suuri meluhaitta.

Perinteinen ilmanvaihtokanaviston äänenvaimennin ei aiheuta suurta painehäviötä, joten sen puolesta sellaisen käyttö olisi Tehtaankadun ala-asteella mahdollista. Kuitenkin sen vaatima tila, pituus, on vähintään 600 mm, jolloin sen asentaminen esim. seinärakenteen sisään on haasteellista. Lisäksi 600 mm pitkän äänenvaimentimen äänenvaimennusominaisuudet ovat heikot ja riittävään äänenvaimennukseen tarvittaisiin 900 mm tai 1200 mm pitkiä vaimentimia. Markkinoilta löytyy myös äänenvaimennettuja korvausilmaventtiileitä, mutta ne on tarkoitettu pientalosovelluksiin eikä niistä saatava ilmamäärä ole riittävä koulukohteisiin.

Katumelun vaikutus laskettiin yhdelle Tehtaankadun puoleiselle luokkatilalle tilanteessa, jossa luokkaan tehtäisiin uusi korvausilmaventtiili.

Äänitaso rakennusosakohtaisesti lasketaan yhtälöllä 14 [16].

$$L_{s,*} = L_u - 1 \times (R_W + C_{TR}) + 10 \text{LOG} \left(\frac{a'_*}{20} \right) \quad (14)$$

jossa

* on kunkin rakennusosan tunnus

L_u on ulkotilan äänitaso [dB]

$L_{s,*}$ on kyseisen rakennusosan äänitaso (äänen voimakkuus sisällä) [dB]

$R_W + C_{TR}$ on on kyseisen rakennusosan äänieristävyystermi liikennemelulle [dB]

a'_* on kyseisen rakennusosan prosentuaalinen pinta-ala [-]

Yhtälöllä 14 saadut rakennusosakohtaiset äänitasot lasketaan yhteen yhtälöllä 15

$$L = 10 \log \left(10^{\left(\frac{L_{ikk}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{seinä}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_{k.vent}}{10}\right)} \right) \quad (15)$$

L on tilaan tuleva katumelun äänitaso yhteensä [dB]

L_{ikk} on ikkunan läpi tuleva äänitaso [dB]

$L_{seinä}$ on ulkoseinän läpi tuleva äänitaso [dB]

$L_{k.vent}$ on korvausilmaventtiilin kautta tuleva äänitaso [dB]

Luokkatilan äänilaskennan tulokset esitetään luvussa 6.6.

6 Tehtaankadun ala-aste

6.1 Kohteen esittely

Tehtaankadun ala-aste on vuonna 1908 valmistunut jugendtyylinen koulu Helsingin eteläisessä kantakaupungissa (kuva 21). Koulussa on kolme maanpäällistä kerrosta, kellarikerros ja ullakkotilat. Varsinaiset opetustilat sijaitsevat pääosin 2–3 kerroksissa ja osin 1. kerroksessa, jossa on myös hallinnolliset tilat. Kellarikerroksessa on ruokala sekä koulun lämmityskeittiö sekä varastotiloja ja teknisiä tiloja. Koulussa on liikunta-/juhlasali sekä teknisen työn luokka. Ullakolla sijaitsee osa ilmanvaihtokoneista.



Kuva 20. Tehtaankadun ala-asteen julkisivu Tehtaankadulle.

Rakennuksen pinta-ala on 4074 brm². Rakennuksen perustukset ovat betoni- ja kivirakenteisia, ulkoseinät ja kantavat väliseinät tiilirakenteisia (ns. massiivitiilirakenne). Alapohja on pääosin maanvastainen betonilaatta ja yläpohja pääosin kevytbetonilankkua. Vesikatteena on konesaumattu peltikate.

Kohteessa on osittain painovoimainen, osittain koneellinen poisto- ja osittain koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Ilmanvaihtoalueet on esitetty liitteessä 1.

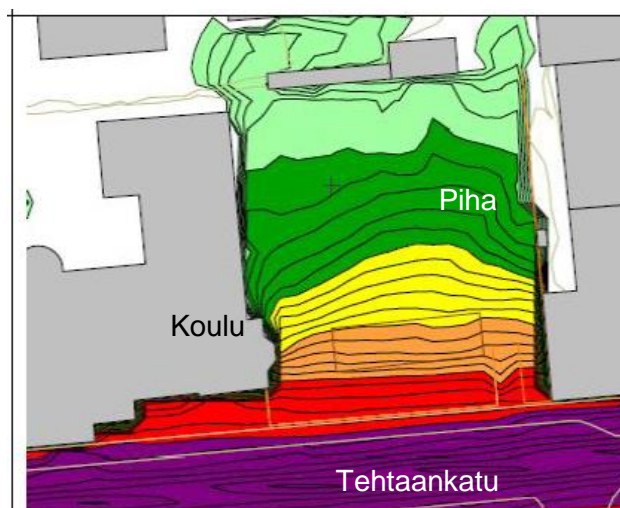
Koulussa on kaukolämmitteinen patterilämmitys, ja se on yhdistetty kunnalliseen vesi- ja viemäriverkoston.

6.2 Tehtaankadun ympäristöolosuhteet

Tehtaankatu sijaitsee Etelä-Helsingissä, ja vaikka alue lasketaan Helsingin keskustaan, ei se ole kaikkein vilkkaimmin liikennöity väylä. Vuonna 2009 Helsingin ympäristökeskus on tehnyt julkaisun *Herkkien kohteiden ilmanlaatu ja melutilanne* [12], jossa käsitellään mm. Tehtaankadun ala-astetta.

Samaisena vuotena 2009 Helsingin kaupunginmittausosaston raportissa ilmoitetaan Tehtaankadun liikennemääräksi Tehtaankadun ala-asteen koulun kohdalla 6 600 liikennemäärä/vrk [13]. Liikennemäärä sisältää kaikki autotyypit ja raitiovaunut. Raportissa on ilmanlaatuarviona tyydyttävä ja mainintana, että liikennemäärä on ”melko vähäistä” ja piha-alue on ”syvä”.

Melutilanteesta arvioidaan, että melu leviää pihalle esteettä, mutta ulkoilupihan syvyyden takia on pihan takaosa hiljaisempi (kuva 21).

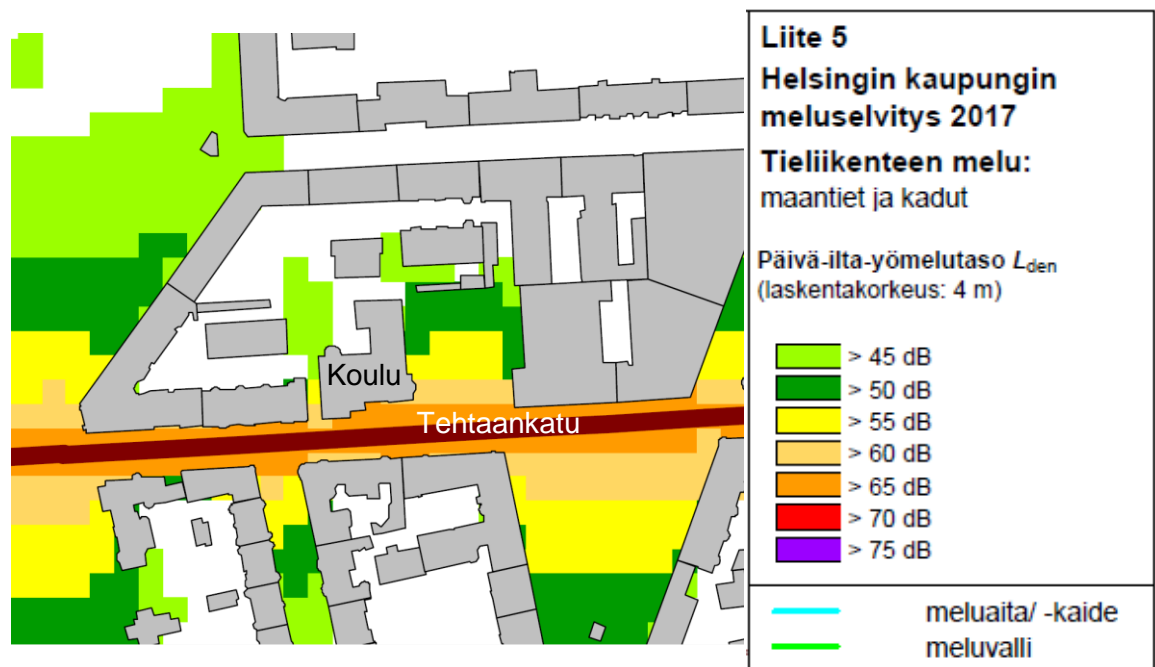


Kuva 21. Melumittauksen tulokset Tehtaankadun koulun pihalta vuodelta 2009 [13].

Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla 2016–selvityksen [14] mukaan pienhiukkaspäästöt tieliikenteen osalta ovat laskeneet vuosittain. Energiantuotannon pienhiukkaspäästöt ovat laskeneet vuoteen 2009 asti, jonka jälkeen on ollut sahaavaa liikettä.

Tehtaankadun koulun ympäristöolosuhteet ovat vuoden 2009 selvityksen mukaan siis ilmanlaadultaan tyydyttäviä ja melutilanteen osalta välttäviä. YTV:n suuntaa-antavien suositusten mukaisesti tulisi tuloilma-aukkojen vähimmäisetäisyys kadusta olla 10 metriä, jos liikennemäärä on yli 5 000 ajoneuvoa/vrk.

Helsingin kaupungin vuoden 2017 meluselvityksen mukaan [15] on liikenteen melutaso Tehtaankadun koulun kohdalla päivisin 65–70 dB



Kuva 22. Meluselvityksen tulokset 2017 [15].

Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen näkemys korvausilman suodattamiseen ja äänitasoon on se, että ilma tulisi suodattaa pienhiukkassuodattimilla (F-taso) eikä äänitaso saisi lisääntyä nykyisestä. Kohteen painovoimainen ilmanvaihto tulisi siis tehdä suodatettuna sekä vaimennettuna, huolimatta toteutustavasta. Hiukkassuodattimen suodatus-tason päättää lopulta rakennusvalvonta.

6.3 Painovoimaisen ilmanvaihdon riittävyys

Luvussa 4 esitetyn laskennan pohjalta on laadittu Excelissä toimiva ohjelmisto, jolla voidaan mitoittaa painovoimaisen ilmanvaihdon ilmamäärät. Ohjelma huomioi hormivaikutuksen lisäksi tuulivaikutuksen tuulen suunnan ja paineen, venttiileiden painehäviön il-mavirran funktiona sekä vedonparantajan (tuuliroottori) tehostavan vaikutuksen [9]. Taulukossa 2 on esitetty tuloste ohjelmasta, jossa voidaan verrata kolmea eri tapausta hormin 1 laskennasta.

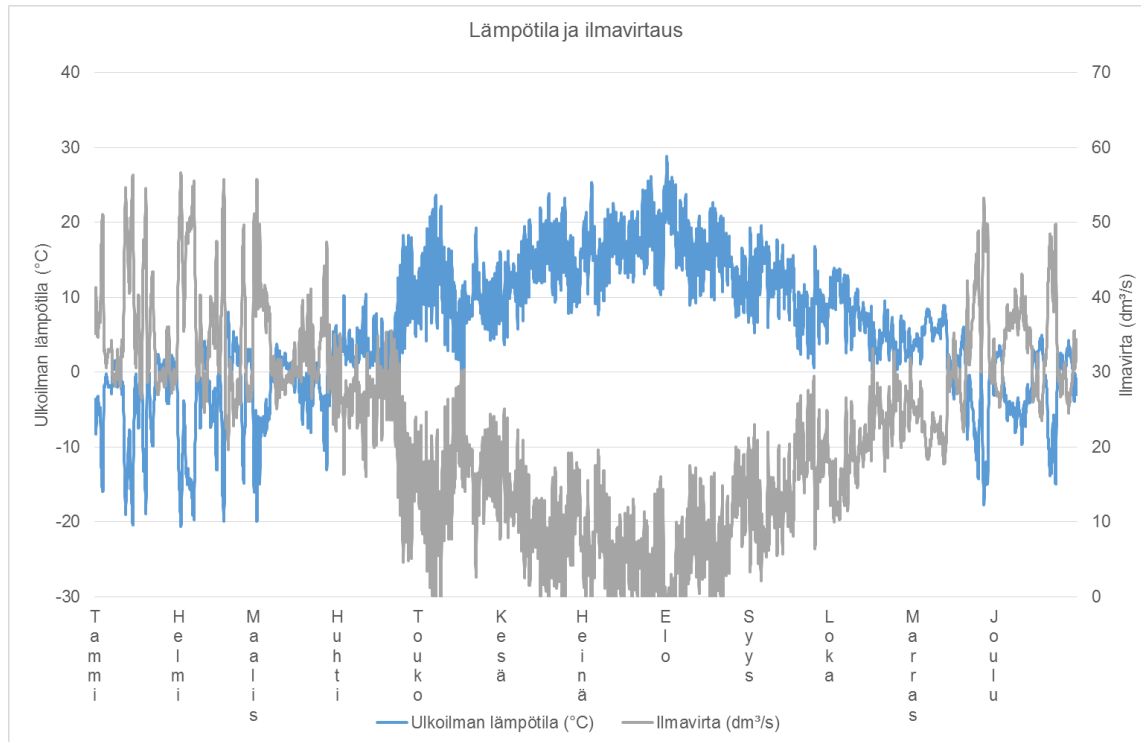
Taulukko 2. Mitoitusohjelman esimerkkituloste: nykyisessä tilanteessa on 250x250 hormi ilman tuuliroottoria, vaihtoehdossa 2 on 150x250 hormi tuuliroottorilla ja vaihtoehdossa 3 on 150x150 hormi ilman tuuliroottoria.

TULOKSET HORMI 1	NYKYINEN	VAIHTOEHTO 2	VAIHTOEHTO 3	
Mitoittava ulkolämpötila	+10,0	+10,0	+10,0	°C
Mitoittava sisälämpötila	+21,0	+21,0	+21,0	°C
Ulkoilman kosteus	88,9	88,9	88,9	%
Sisäilman kosteus	50,0	50,0	50,0	%
Rakennuksen suuntaus (tuulivaikutus)	Etelä	Etelä	Etelä	
Tuulen nopeus 10 m korkeudella	4,1	4,1	4,1	m/s
Tuulen suunta	Lounas	Lounas	Lounas	
Rakennuksen sijanti (tuulisuus)	Kaupunki	Kaupunki	Kaupunki	
ILMAVIRTA HORMISSA	14,2	24,3	13,7	dm³/s
Tuuliroottori	Ei	Kyllä	Ei	
Hormin korkeus	10,0	10,0	10,0	m
Hormin pituus vaakatasossa	0,0			m
Hormin leveys	250	150	150	mm
Hormin syvyys	250	250	250	mm
Hormityyppi	Tiilimuuraus, raaka, vanha (8)	Tiilimuuraus, raaka, vanha (8)	Tiilimuuraus, raaka, vanha (8)	-
Hormin 90° kulmien lukumäärä	1	1	1	kpl
POISTOILMAVENTTIILI	RK-200 (avaus 40 mm) x1	RK-200 (avaus 40 mm) x1	RK-200 (avaus 40 mm) x1	-
ULKOILMAVENTTIILI	RK-200 (avaus 40 mm) x1	RK-200 (avaus 40 mm) x1	RK-200 (avaus 40 mm) x1	-
ULKOILMASÄLEIKKÖ	USVN-155x210 x1	USVN-155x210 x1	USVN-155x210 x1	-

6.4 Energiankulutus – painovoimainen vs. koneellinen

Painovoimaisen ilmanvaihdon toiminnalla on varsin suuri vaikutus kiinteistön energiankulutukseen. Järjestelmässä ei ole lämmöntalteenottoa ja kylmän ulkoilman johtaminen tiloihin kasvattaa tilakohtaisten lämmityslaitteiden tehoja. Energiategokkuuden näkökulmasta koulurakennuksissa tulisi ilmanvaihtoa rajoittaa kylmällä säällä tilojen ollessa tyh-

jillään (öisin ja viikonloppuisin). Kuvassa 23 on esitetty tuntitasolla laskettu ilmanvaihtomäärä ja ulkoilman lämpötilä. Taulukossa 3 on esitetty energialaskennassa käytettyjä arvoja.



Kuva 23. Ulkoilman lämpötilä ja painovoimainen ilmavirtaus vuoden ajalta, kun horni 1.krs luokkaan.

Koko koulurakennuksen ilmanvaihdon energiankulutusta ei selvitetty, mutta malliksi laskettiin yhden luokkatilan energiankulutus sekä painovoimaisena että koneellisella ilmanvaihdoilla tapauksessa.

Taulukko 3. Energialaskennan lähtöarvoja, laskenta suoritettu mitoitusohjelmistolla [9].

Säädata	Vantaa TRY 2012
Mitoittava sisälämpötila	21 °C
Ulkoilman kosteus	Vantaa TRY 2012
Sisäilman kosteus	50 %
Hormin korkeus	12 m
Hormin pituus vaakatasossa	0 m
Hormin leveys	250 mm
Hormin syvyys	250 mm
Hormityyppi ja karheus	Tiilimuuraus, raaka, vanha (k=8)
Hormin 90° kulmien lukumäärä	1
Poistoilmaventtiili	RK-315 (avaus 30 mm) x1
Ulkoilmaventtiili	RK-315 (avaus 30 mm) x1
Ulkoilmasäleikkö	USAV-315 x1

Taulukossa 4 on esitetty laskennalliset ilmanvaihdon lämmitysenergiantarpeet yhden luokkahuoneen osalta. Nykyinen ilmanvaihdon kulutus on 4 833 kWh ja koneellisen tulo-/poistoilmanvaihdon energiankulutus olisi 2 440–8 565 kWh riippuen ilmanvaihdon aikaohjelmasta. Laskelmasta voidaan päätellä, että koneellinen ilmanvaihto kuluttaisi vähemmän energiaa, kun sen käyttöaikaa rajoitetaan ja enemmän energiaa, jos se on päällä jatkuvasta.

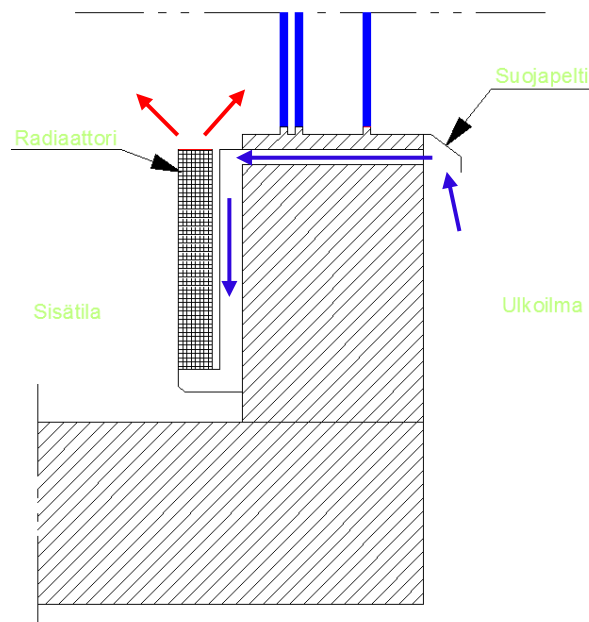
Taulukko 4. Ilmanvaihdon energiankulutus mallilaskelmassa yhden luokkahuoneen osalta.

	Min	Max	K.A.	LTO hyötysuhde	Tuloilman lämmitysenergiantarve
	dm ³ /s			%	kWh
Painovoimainen ilmanvaihto (nykyinen)	0	56,6	22,9	-	4 833
Koneellinen tulo-/poistoilmanvaihto (sama ilmamäärä kuin painovoimaisessa, mutta LTO:lla)	0	56,6	22,9	65	1 692
Koneellinen tulo-/poistoilmanvaihto (mitoitusilmanvaihto päällä arkisin)	150	150	150	65	2 440
Koneellinen tulo-/poistoilmanvaihto (mitoitusilmanvaihto) päällä 24/7	150	150	150	65	8 565

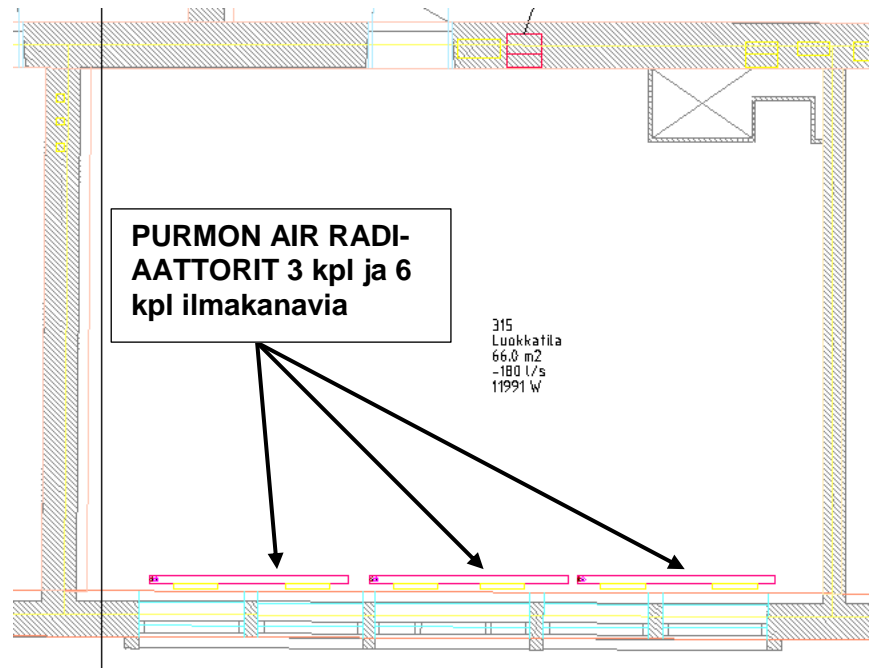
6.5 Luokkahuoneen painovoimaisen ilmanvaihdon toteutus Purmon AIR-radiaattoreilla

Tarkastellaan kolmannen kerroksen luokkatilaa, johon olisi asennettavissa kolme Purmon Air tuloilmaradiaattoreita (kuvat 24–25) Kuhunkin radiaattoriin olisi saatavissa tehdasvalmisteisia korvausilmakanavistoja kaksi. Käyristä saatujen ja Z-kanavan lasketun painehäviön perusteella olisi luokkatilaan saatavissa korvausilmaa ko. patteriratkaisun avulla alla olevan taulukon mukaisesti hienosuodatuksella 5 Pa:n painehäviöllä 60 dm³/s ja karkeasuodatuksella 7 Pa:n painehäviöllä 120 dm³/s.

Tällä ratkaisulla olisi ilmamäärä huomioimatta vuotoilmaa ikkunatiivisteiden ja muiden epäjatkuvuuskohtien läpi riittävä hienosuodatuksella 10 henkilölle ja karkeasuodatuksella 20 henkilölle.



Kuva 24. Purmon Air-radiaattorin kanavakytkentä ikkunapenkkiin.



Kuva 25. Purmon Air-radiaattoreiden sijoittelu luokkahuoneeseen. Kussakin patterissa kolme korvausilmakanavistoa.

6.6 Luokkatilan äänilaskenta

Laskennassa käytetään seuraavasti määriteltyjä prosentuaalisia pinta-aloja:

- Korvausilmaventtiilin $a'_{\text{venttiili}} = 10$
- Ikkunan $a'_{\text{ikkuna}} = \text{ikkunoiden pinta-ala} / \text{tilan lattiapinta-ala}$
- Seinän $a'_{\text{seinä}} = \text{seinän pinta-ala} / \text{tilan lattiapinta-ala}$

Taulukossa 5 on esitetty äänilaskennan tulos, kun ulkoilman äänitaso on 70,2 dB ja korvausilmaventtiilin arvioitu äänieristävyysluku on 30 dB.

Taulukko 5. Tehtaankadun luokkatilan äänilaskenta, jos seinään tehtäisiin korvausilma-aukko.

KORVAUSILMAVENTTIILI			
Äänitaso ulkona	L_u	70,2	dB
Korvausilmalaitteen äänieristävyyssuku, liikennemelun mukaisesti	$D_{n,e,w} + C_{tr}$	30	dB
Tilan pinta-ala	A_{tila}	66	m ²
Rakennuosan ala prosenteina huoneen alasta	10	15,15	%
Vaimennus		-31	dB
ÄÄNEN VOIMAKKUUS SISÄLLÄ		39	dB

IKKUNAT			
Äänitaso ulkona	L_u	70,2	dB
Ikkunan äänieristävyys, liikennemelu	$R_{W} + C_{tr}$	35	dB
Ikkunan pinta-ala	A_{ikkuna}	16,6	m ²
Rakennuosan ala prosenteina huoneen alasta		25,15	%
Vaimennus		-34	dB
ÄÄNEN VOIMAKKUUS SISÄLLÄ		36	dB

SEINÄ			
Äänitaso ulkona	L_u	70,2	dB
Seinän äänieristävyys, liikennemelu	$R_{W} + C_{tr}$	60	dB
Seinän pinta-ala	$A_{seinä}$	21,9	m ²
Rakennuosan ala prosenteina huoneen		33,14	%
Vaimennus		-58	dB
ÄÄNEN VOIMAKKUUS SISÄLLÄ		12	dB

LIIKENNEMELU TILASSA YHTEENSÄ 40,8 dB

LIIKENNEMELU TILASSA ILMAN KORVAUSILMAVENTTIILIÄ 36,2 dB

Luokkatilan raja on sisäilmastoluokituksen S2-mukaisesti 35 dB, joten ulkoäänitasolla 70 dB ei tätä saavutettaisi edes nykytilanteessa. Huomioitava on, että ulkoäänitaso on mitattu äänenpaine katutasolla eikä sen vaimenemista toisen kerroksen luokkatilaan, joka on kadusta noin kuuden metrin päässä, ole huomioitu. Oletetulla korvausilmaventtiilin äänenvaimennuksella 30 dB olisi äänitaso luokkatilassa uudessa tilanteessa 40,8 dB.

7 Painovoimaisen ilmanvaihdon ilmamäärät

Ilmamäärät laskettiin tiloista, joista oli saatavissa tietoa hormikartoitusraportista. Laskenta tehtiin painovoimaisen ilmanvaihdon mitoitusohjelmalla kolmella eri ulkolämpötilalla. Ulkolämpötiloina käytettiin Helsingin kaupungin rakennusvalvonnan vaatimia mitoitustilämpötiloja +17,3 °C (heinäkuun keskilämpötila Helsingissä), ulkolämpötilaa -10 °C sekä vuoden keskimääräistä lämpötilaa +5,6 °C. Painovoimaisen ilmanvaihdon opissa ulkoilman mitoitustilämpötilana käytetään +10 °C ja sisälämpötilana +21 °C. Tämä

osuu käytettyjen mitoitustilapötilojen +5,6 °C ja +17,3 °C väliin, joten sitä ei erikseen laskettu.

Sisä- ja ulkoilman kosteuspitoisuudet arvioitiin vallitsevan ulkolämpötilan perusteella. Kosteuspitoisuuden vaikutus laskennassa ilmamäärään ei ole kovin merkittävä, sen tehostava vaikutus on luokkaa 0,5–1,5 l/s. Laskelmissa oletettiin, että tiloihin tehtäisiin uudet, poistohormin kanssa pinta-alaltaan yhtä suuret, korvausilma-aukot.

Laskentatulokset on esitetty liitteessä 2. Muutaman hormin osalta laskettiin myös ilma-virta sukittuna. Sukitus pienentää laskentamallissa kitkapainehäviötä ja parantaa ilmanvirtausta vain hiukan. Todellisuudessa huonokuntoiset hormit tulisi sukittaa, jotta ne toimivat halutulla tavalla.

Tuuliroottori tehostaa painovoimaista ilmanvaihtoa, kuten luvussa 2.6 osoitettiin, mutta roottorin vaikutusta ei huomioida ilmapirran mitoituksessa. [2]

7.1 Nykyhormien käyttäminen painovoimaisessa ilmanvaihdossa

Liitteen 2 kerroskohtaisissa piirustuksissa on esitetty nykyhormeja käyttämällä saatava ilmanvaihtomäärä kolmella eri ulkoilmanlämpötilalla sekä ilmamäärä, joka nykyisten suunnitteluohjeiden mukaisesti tulisi saada.

Ilmamäärä on riittävä ainoastaan 1. kerroksen pienehköissä tiloissa, joista toinen toimii tällä hetkellä koulusairaanhoidajan ja toinen pienryhmäkäytössä. Kaikissa muissa tiloissa ei saada henkilömäärän mukaisesti riittävää ilmanvaihtoa. Erityisesti kolmannen kerroksen tiloissa ilmanvaihto olisi lähes olematon. Ne on syystäkin muutettu koneelliseksi ilmanvaihdoksi vastikään.

Lisäksi hormikartoituksen mukaan nykyhormeissa on paljon tukkeutumisia ja vuotoja, joten niiden hyödyntäminen vaatisi hormien avaamista, suurentamista sekä pinnoittamista. Pelkkä hormien sukitus maksaa 160 euroa/metri, jolloin sukituksen kokonaiskustannus on luokkaa 120 000 euroa [23]. Sukitus ei yksistään riitä varmistamaan riittävää ilmanvaihtoa, joten on selvää, etteivät nykyiset tiilimuuratut hormit riitä tuottamaan vaadittuja ilmamääriä.

7.2 Uusien hormien rakentaminen painovoimaiselle ilmanvaihdolle

Koska nykyisillä hormoneilla saatava ilmanvaihtuvuus on riittämätöntä koulukäyttöön, laskettiin myös peltikanavakoko, jolla painovoimainen ilmanvaihto voisi toimia. Suunnittelu tehtiin kolmen päällekkäisen luokkatilan osalta.

Hormivaikutuksen paine-ero putoaa merkittävästi noustessa kerroksissa ylöspäin. Suurempi haaste luokkakohtaisen suunnitteluilmamäärän 150 dm³/s toteuttamiseksi ei niinkään ole kanavakoko vaan riittävän alhaisen korvausilmaventtiin tai useiden venttiilien asentaminen. Käytännössä ulkoseinään olisi tehtävä suuret korvausilma-aukot.

Korvausilman tuomista käytävän kautta siirtoilmasäleiköillä myös pohdittiin. Tällainen ratkaisu on toteutettu Helsingin kaupungin toimesta eivätkä kokemukset siitä ole olleet rohkaisevia. Ilmavirta on jäänyt alhaiseksi ja meluhaitta käytävältä luokkatilaan lisääntynyt.

Taulukko 6. Painovoimaisen ilmanvaihdon ilmamäärät uusilla peltisaumakanavilla kolmen päällekkäisen luokkatilan osalta eri ulkoilman lämpötiloissa [9].

$$T_s = +21 \text{ °C}; RH_s = RH_u = 0 \% ; 1 \text{ kpl } 90^\circ;$$

	1.krs	2.krs	3.krs
Ilmanvaihdon suunnitteluarvo	150 dm ³ /s	150 dm ³ /s	150 dm ³ /s
Poistoilmahormin korkeus	15 m	10 m	6 m
	Pyöreän kanavan halkaisija		
Ulkoilman lämpötila	D= 500 mm	D= 630 mm	D= 800 mm
-5,0 °C	186 dm ³ /s <i>riittävä</i>	151 dm ³ /s <i>riittävä</i>	121 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>
+5,6 °C	138 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>	117 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>	88 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>
+10,0 °C	118 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>	97 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>	69 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>
+17,3 °C	58 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>	42 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>	0 dm ³ /s <i>ei riittävä</i>
Ilmanvaihtoventtiileitä	Poisto- ja ulkoilma: 10 kpl RK-315, a=30 mm, säleikkö: 10 kpl USA V-400	Poisto- ja ulkoilma: 10 kpl RK-315, a=30 mm, säleikkö: 10 kpl USA V-400	Poisto- ja ulkoilma: 10 kpl RK-315, a=30 mm, säleikkö: 10 kpl USA V-400
<i>Ulkosäleikön pinta-ala</i>	<i>3,1 m²</i>	<i>3,1 m²</i>	<i>3,1 m²</i>

Laskennalliset painovoimaisen ilmanvaihdon ilmamäärät kolmen päällekkäisen luokkatilan osalta on esitetty taulukossa 6. Peltikanavien kokoa on laskentaesimerkissä kasvatettu kerroksen kasvaessa. Taulukon esimerkinomaiset arvot osoittavat, että luokkatiloihin tarvittava ilmamäärä (150 dm³/s) saavutetaan vain alle -5,0 °C:n lämpötiloissa kahdessa alimmassa kerroksessa. Lisäksi on huomattava suuri venttiileiden lukumäärä ja ulkosäleikön kokonaispinta-ala, joka käytännössä tarkoittaisi, että ulkoseinään ikkunoiden ala- ja tai yläpuolelle tehtäisiin suuret aukot. Rakenteellisten, arkkitehtuurillisten ja meluvaikutusten vuoksi tämä ei ole toteutuskelppoinen vaihtoehto.

Kanavat olisi lisäksi eristettävä (50 mm), jolloin niiden vaatima lattia-pinta-ala on huomattava. Taulukon arvoista nähdään, että painovoimainen ilmanvaihto toimii hormin korkeuden ollessa riittävä, mutta luokkatilojen vaatiman suuren ilmamäärän saavuttaminen

ei onnistu. Painovoimainen ilmanvaihto soveltuu siis paremmin pienemmän henkilötiheyden kohteisiin. Kohteen julkisivu on suojeltu, joten näkyvien korvausilmaventtiileiden asennus varsinkaan Tehtaankadun puoleiselle pääjulkisivulle ei tule kysymykseen.

Peltikanavien käyttö painovoimaisessa ilmanvaihdossa ei ole suositeltavaa (ks. luku 2.4) vaan tulisi käyttää kosteutta ja lämpötilaa tasaavia materiaaleja (tiili).

8 Yhteenveto

Käyttäjäkokemukset painovoimaisen ilmanvaihdon kouluissa ovat olleet verrattavissa koneellisella poistoilmanvaihdolla varustettuihin kouluihin, mutta heikompaa (myös mitausten osalta) kuin koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla varustetuissa kouluissa.

Painovoimaisen ilmanvaihdon energiankulutus on suurempaa kuin hyvällä hyötysuhteella (>65 %) varustetulla koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla. Painovoimaisen ilmanvaihdon haasteena on lisäksi korvausilman suodattaminen ja äänieristävyys erityisesti kaupunkiympäristössä. Painovoimaisen ilmanvaihdon etuina on alhaisempi rakennuksen alipaineisuus ja siten vaara haitallisten aineiden kulkeutumisesta rakenteiden vuotokohdista sisäilmastoon on pienempi kuin suuremman alipaineen aiheuttavissa koneellisen ilmanvaihdon järjestelmissä.

Suurin heikkous painovoimaisessa ilmanvaihdossa on kuitenkin ilmavirran riittävyys erityisesti sisä- ja ulkoilman lämpötilaeron ollessa pieni ja poistohormin ollessa lyhyt. Ilmämäärien riittävyys suurempien henkilömäärien ollessa kyseessä on erittäin haasteellista. Painovoimaisen ilmanvaihdon käyttö vaatii käyttäjältä ymmärrystä ja aktiivista huolenpitoa ja säätöä.

Selvityksen perusteella voidaan todeta, että painovoimaisen ilmanvaihdon toteuttaminen Tehtaankadun ala-asteelle on teknisesti ja taloudellisesti kannattamatonta. Painovoimaisen ilmanvaihdon toteuttaminen sisältää merkittäviä epävarmuustekijöitä ja riskejä toimivuuden ja laadukkaiden sisäilmasto-olosuhteiden takaamiseksi. Lisäksi sen toteutta-

minen edellyttäisi mittavia rakennustoimenpiteitä poistoilmahormien ja korvausilma-aukkojen osalta mikä vähentää käytössä olevaa huoneistoalaa, muuttaa oleellisesti rakennuksen julkisivua ja on myös kallis toteuttaa.

Mikäli koulurakennuksen ilmanvaihto halutaan toteuttaa nykyisten ilmanvaihtovaatimusten mukaisesti painovoimaisena, tulisi se ottaa huomioon rakennuksen suunnittelussa alusta alkaen. Käyttö tulisi suunnitella painovoimaisen ilmanvaihdon ehdoilla, ei toisinpäin. Tämä onnistuu parhaiten uudisrakennuksessa. Vaikutus alhaisempiin oppilasmääriin erityisesti ylempien kerrosten osalta on huomioitava.

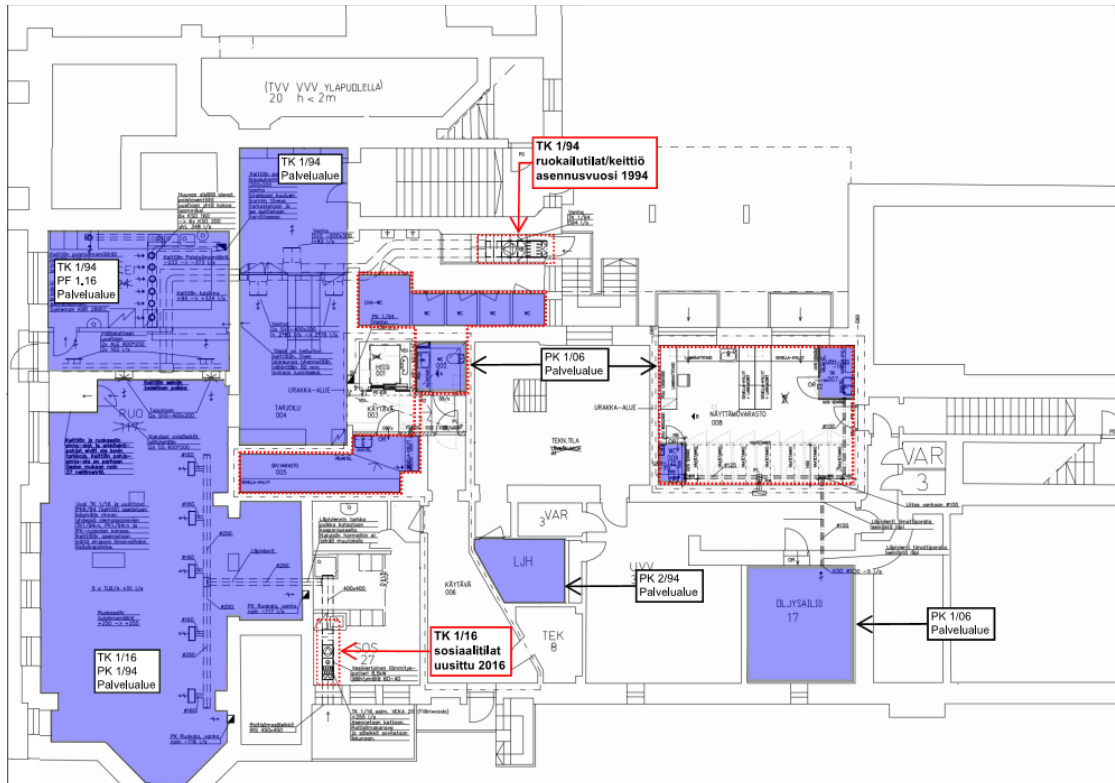
Hyvin suunniteltuna ja toteutettuna sopivilla, mahdollisesti kohteeseen suunnitelluilla, laitteilla (venttiilit, suodattimet, äänenvaimentimet) ei painovoimaisen ilmanvaihdon soveltuminen ole täysin mahdotonta. Sen käyttäminen suuren henkilömäärän kohteissa on kuitenkin erittäin haasteellista ja edellyttää käyttäjiltä jatkuvaa omatoimista huolenpitoa ja säätämistä. Rakennusta suunniteltaessa tulisi ottaa mallia termiiteistä, heidän kekon-sahan ovat painovoimaisen ilmanvaihdon mestariteoksia.

Lähteet

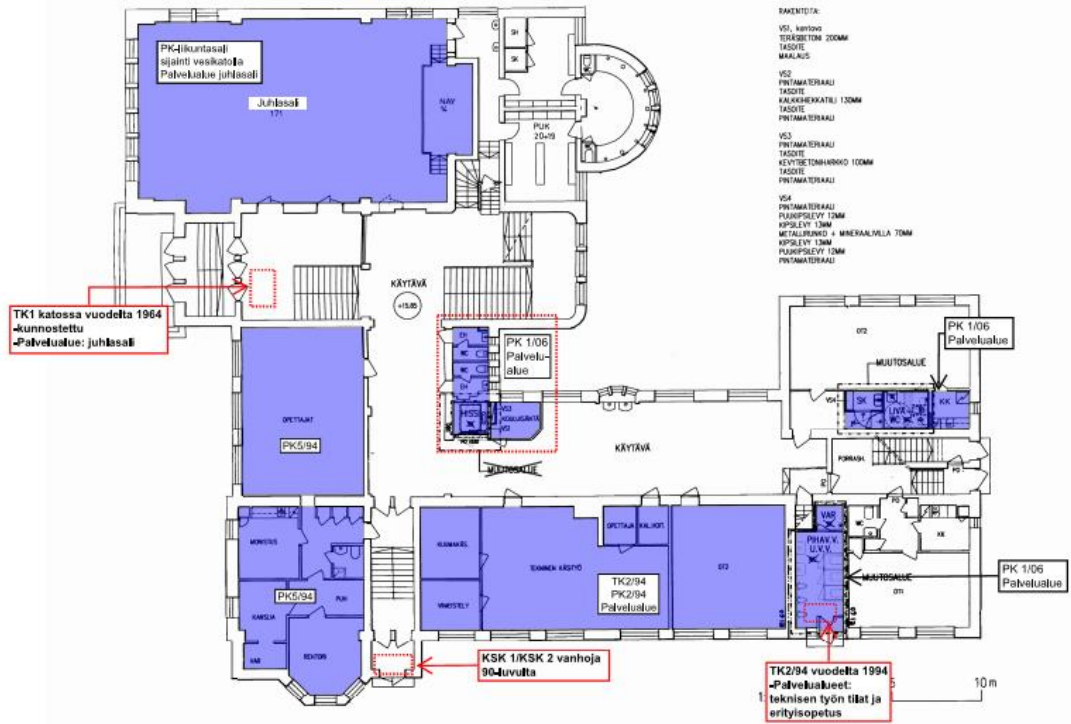
- 1 Luonnollinen hybridi ilmanvaihto, 2010, LVI-kortti 30-40080, Rakennustieto Oy, Rakennustietosäätiö RTS
- 2 Sainio Jukka, 2018, Painovoimaisen ilmanvaihdon suunnitteluopas, <julkaisema-
ton>
- 3 Revel A., Huynh B.P., 2007, Characterising Roof Ventilators, The University of
Sydney, Australia, 15th Australasian Fluid Mechanics Conference.
- 4 Ismail M., Rahman A.M.A., 2012, Rooftop Turbine Ventilator: A Review and Up-
date, School of Housing, Building & Planning, University Sains Malaysia, Penang
Malaysia. Journal of Sustainable Development Vol.5, No.5, May 2012
- 5 Hormi-imurilla vetoapua poistohormille, artikkeli, www.terveysilma.fi, luettu
3.3.2018
- 6 EcoPower® Data Catalogue, Edmonds, www.edmonds.com.au, luettu 3.3.2018
- 7 Rakennushistoriaselvitys Tehtaankadun Ala-aste, 2017, Arkkitehtitoimisto ark-by-
roo Oy, Helsinki
- 8 Oker-Blom Max, 1910, Kouluhygieniä –oppikirja lääkäreille ja koulumiehille, kus-
tannusosakeyhtiö Otavan kirjapaino.
- 9 Painovoimaisen ilmanvaihdon mitoitusohjelma®, 2018, Insinööritoimisto Leo
Maaskola Oy
- 10 Kurnitski, J., Palonen J., Ruotsalainen R., 1996, Koulujen sisäilmasto –rehtoriky-
sely ja sisäilmastomittaukset, Teknillinen korkeakoulu, LVI-tekniikan laboratorio
- 11 Karjalainen Kalle, Kimari Pirjo, 1999, Koulujen sisäilma ja energiatalous, TAKE
- 12 Herkkien kohteiden ilmanlaatu ja melutilanne, päiväkodit, leikki puistot ja –kentät,
koulut, vanhainkodit ja sairaalat, Helsingin kaupungin ympäristökeskuksen julkai-
suja, 2009 <http://www.hel.fi/static/ymk/julkaisut/julkaisu-11-09.pdf>
- 13 Tehtaankadun ala-asteen liikennemäärä, ilmanlaatu ja melutilanne, Helsingin
kaupungin kaupunkimittausosasto, 2009
- 14 Ilmalaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2016, Helsingin seudun ympäristöpalve-
lut –kuntayhtymä
- 15 Helsingin kaupungin meluselvitys 2017, Sito Oy, Kaupunkiympäristön julkaisuja
2017:4
- 16 Halme Alpo, Seppänen Olli, 2002, Ilmastoinnin äänitekniikka, Suomen LVI-liitto
- 17 Vornanen-Winqvist Camilla, Toomla Sander, 2016, Tutkimusraportti Latokarta-
non koulun sisäilmatutkimus, ensimmäinen vaihe, Aalto-yliopisto,

- 18 Ilmastointilaitoksen mitoitus, ilmastointitekniikka osa 2, 2014, Sandberg Esa, Talotekniikka-Julkaisut Oy
- 19 Sähkösuodattimien mahdollisuudet sisäilman parantajana, 2016, Anssi Tapanen, diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto
- 20 Keinänen Mikko, 2018, erikoisasiantuntija, Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy, Helsinki. Keskustelu 4.4.2018
- 21 A Brief Introduction to Fluid Mechanics 2nd edition, D.F. Young, B.R. Munson, T.H. Okiishi, 2000
- 22 Purmon internetsivut, verkkodokumentti, www.purmo.fi, luettu 10.4.2018
- 23 Maajärvi Sami, Insinööritoimisto Leo Maaskola Oy, keskustelu 15.5.2018
- 24 A Study on Ventilation Efficiency with Installing the Inner Fan into the Rooftop Turbine Ventilator, T-H. Shieh, C-M. Lai, C-M Chiang, Energy and Buildings, 2006, https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC25564.pdf, luettu 5.11.2018

Liite 1: Ilmanvaihdon alueet



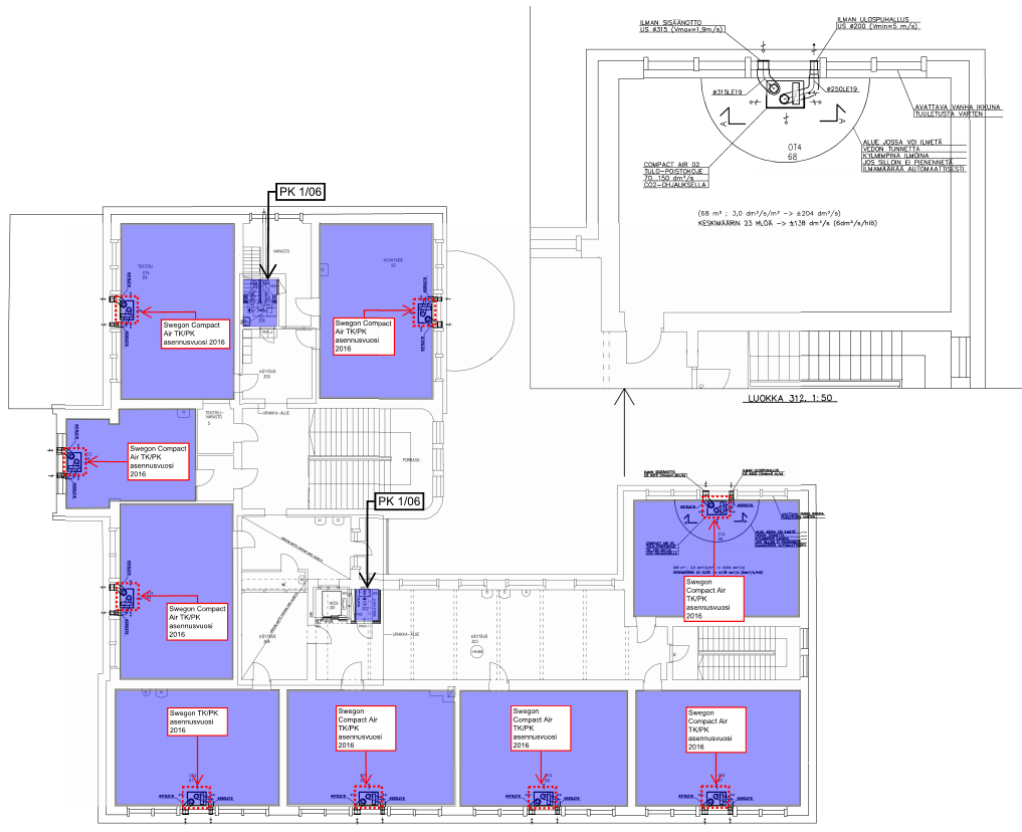
LUISIN MC-TILOIHIN, SIIVOUSKÖRÖÖRIN JA HISSIN RAKENNETAAN KONEellinen ILMANPÖSTÖ, KORVAUSLMA DETAAN ULKOSEKÄÄN ASENNETTAVEN VENTTIILIN KAUITTA.



TEHTAANKADUN A-A

TEHTAANKATU 15-17 00140 HELSINKI

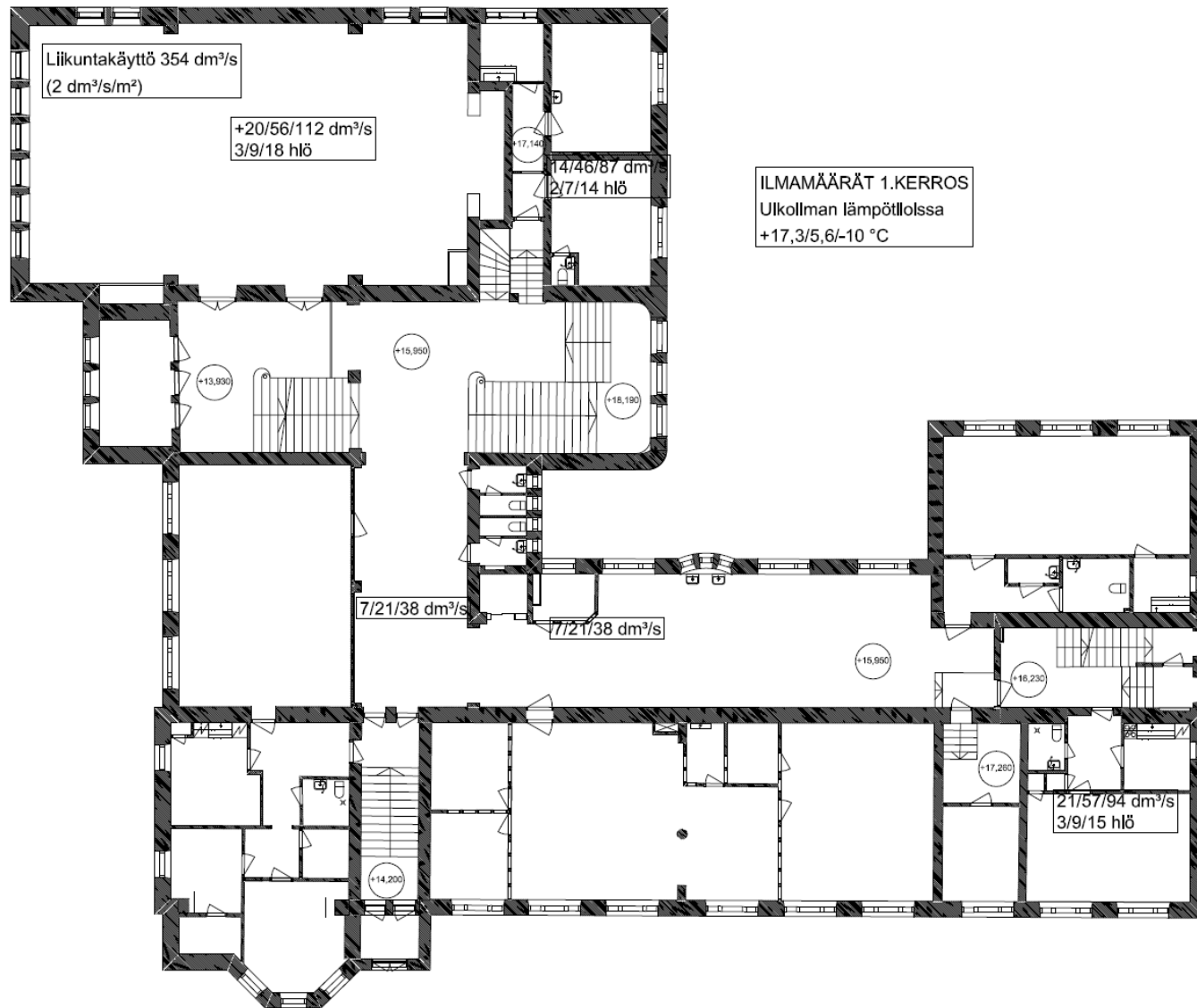
PDHJAPIIRROS; 1. KRS



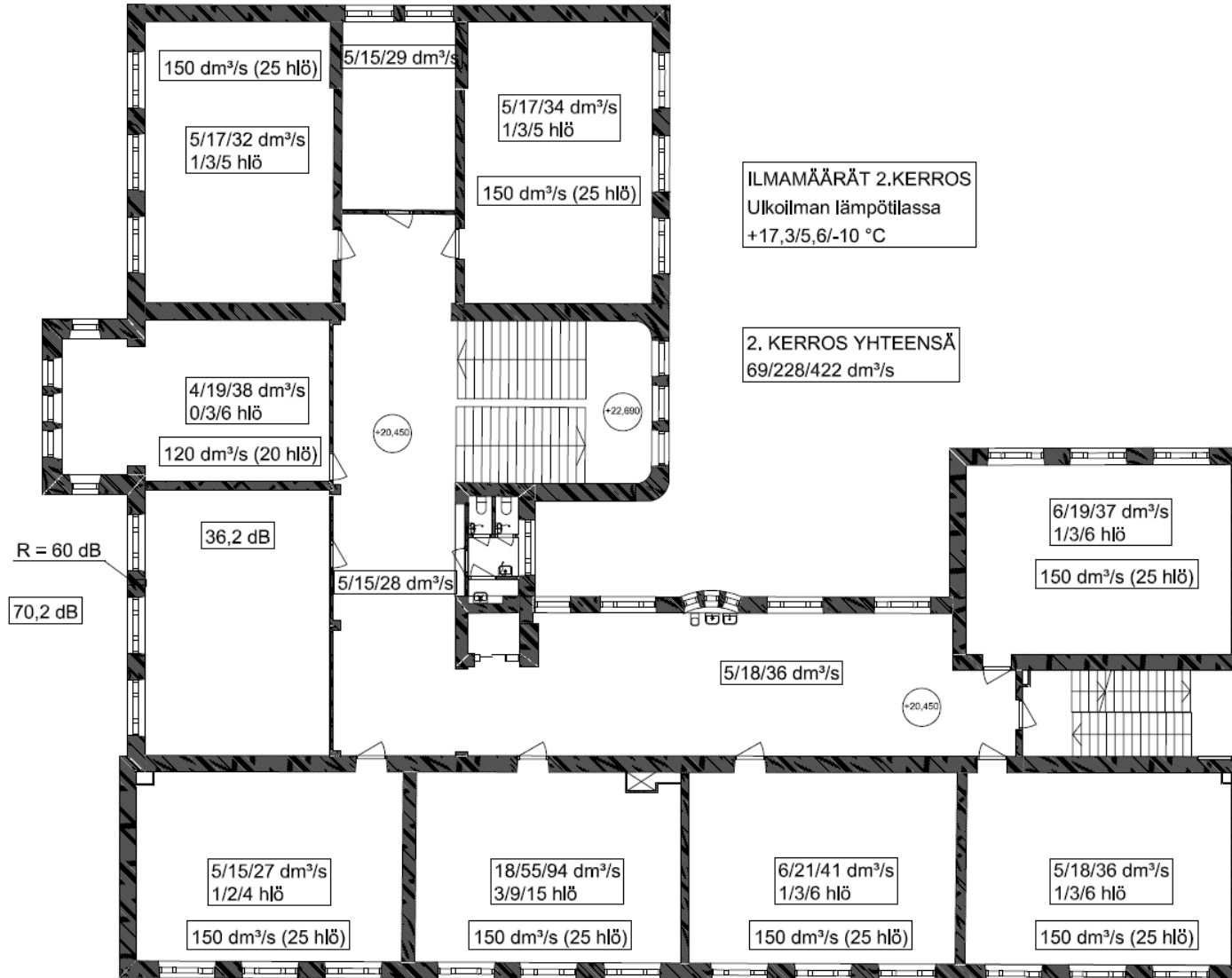
Liite 2: Ilmamäärät

Kerros, johon vaikuttaa	Piiipun nro vesikatolla	Hormin nro vesikatolla	Tila johon vaikuttaa	Ilmavirta, vanhat hormit			Ilmavirta, FuranFlex		
				17,3 °C dm³/s	5,6 °C dm³/s	-10,0 °C dm³/s	17,3 °C dm³/s	5,6 °C dm³/s	-10,0 °C dm³/s
1.krs	1	1	-						
3.krs		2	Kuvataidevarasto	2,8	9,6	18,8	3,3	11,1	21,7
3.krs		3	Luokka xxx (ent tekstyö)	3,2	11	21,5			
2.krs		4	2.krs käytävä?	4,6	15,2	28,7			
2.krs	1	-							
1.krs	2	2	Tervh.lepohuone	6,79	20,6	37	6,81	21,2	37,4
3.krs		3	Kuvataide	3,7	12,4	24			
2.krs	3	1	Luokka xxx (ent kuvataid.	5,1	17,4	34			
1.krs		2	Koulupsykologin WC	7,9	26,4	50,2			
1.krs		3	Pukuhuone						
1.krs		4	Koulupsykologi	6,13	19,9	36,4			
-	4 (kattokuvassa P19)	1	-				6,14	20	36,6
3.krs		2	Huone 317	14	7,1	2			
3.krs		3	Aulatala 3.krs	2	7,1	14,5			
3.krs		4	Käytävä 3.krs	4	14	27,7			
1.krs		5	WC 1.krs						
3.krs	5	1	Tekst.varasto (ent ?)	3	11,2	22	9,54	31,5	58,8
2.krs		2	Entinen ATK-luokka	3,7	19,4	38			
3.krs		3	Tekstilityö (ent ?)	3,2	11	21,5			
2.krs		4	Musiikkiluokka	5,1	16,9	32,2			
kellari		5	Liikuntasali ?	9,52	31,3	58,4			
2.krs	6	1	Käytävä 2.krs	4,6	15,1	28,4			
kellari		2	Ruokalan aula						
1.krs		3	1.krs käytävä	6,7	21,2	38,2			
-		4	-						
3.krs		5	Käytävä 3.krs	2,9	10,1	20,4			
3.krs		6	Siivouskomero 3.krs	2,9	10	20,2			
1.krs	7	1	-						
1.krs		2	-						
1.krs		3	Kouluisäntä	6,7	21	37,8			
kellari		4	-						
3.krs		5	3.krs käytävä	2,3	8,0	16			
kellari		6	-						
2.krs	8	1	huone 8 2.krs						
3.krs		2	luokka 3.krs	1	3,5	6,9			
kellari		3	-						
1.krs		4	-						
1.krs		5	-						
2.krs		6	huone 9 2.krs	5,1	15,3	26,7			
kellari	9	1	Sos.tilat käytävä, WC						
kellari	10	Ruokalan ulos	Ruokala						
2.krs	11	1	Huone 7	18	55,3	93,9			
-		2	-						
3.krs		3	huone 315	2,8	9,6	18,8			
2.krs		4	Huone 6	6,2	21,1	40,8			
kellari		5	-						
-		6	-						
kellari	12	uippumurin ul	Lämmönjakohuone						
kellari	13	1	Jäätämövarasto/öljysäiliö						
kellari	14	1	-						
-		2	-						
-		3	-						
3.krs	15	1	Käytävä 5	3	9,4	16,7			
1.krs		2	-						
1.krs		3	-						
3.krs		4	Tekstilityö eteinen						
1.krs		5	-	7,5	20,7	34,4			
-		6	-	6,7	17,8	29,1			
-		7	-						
-		8	-						
3.krs		9	Huone 13	2,6	8,1	14,7			
2.krs		10	Huone 5	5,1	15,3	26,7			
2.krs		11	-						
2.krs	16	1	Käytävä 2.krs	5,4	18,4	36			
3.krs		2	Käytävä 3.krs	2,6	9,0	18,1			
-		3	-						
3.krs	17	1	Huone 12	3,4	11,9	23,9			
2.krs		2	Huone 4	5,7	19	37			
1.krs		3	KK, inva WC, SK						

1 (3)



2 (3)



3 (3)

