

Jouni Vallinen

# Ilmanvaihtosuunnittelun perusteita

Metropolia Ammattikorkeakoulu  
Insinööri (AMK)  
Talotekniikan koulutusohjelma  
Insinöörityö  
21.5.2012

Tekijä(t) Otsikko	Jouni Vallinen Ilmanvaihtosuunnittelun perusteita
Sivumäärä Aika	42 sivua + 7 liitettä 21.5.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-tekniikka, suunnittelupainotteinen
Ohjaaja(t)	yliopettaja Olli Jalonen
<p>Insinööriyön tavoitteena oli selvittää ja selventää itselleni ilmanvaihtosuunnittelussa tarvittavien fysikaalisten tekijöiden perusteita, joita voitiin pitää yleispätevinä tapauksessa kuin tapauksessa, sekä aikaansaada suppea suunnitteluopas ilmanvaihdon suunnitteluperusteista tulevaisuudessa tehtäväksi annettavia suunnitteluprojekteja varten.</p> <p>Selvitystyö tehtiin ns. kirjallisuustutkimuksena, jossa eri lähteistä etsittiin tietoa esitetyistä aiheista ja ne referoitiin yhtenäisiksi kokonaisuuksiksi insinööriyöhön. Lisäksi asioita pyrittiin havainnollistamaan kuvioilla ja taulukoilla, laskentakaavoilla, sekä useilla liitteillä.</p> <p>Lisäksi insinööriyön osaksi kartoitettiin erilaisia lähtökohtamahdollisuuksia ja vaihtoehtoja erään pientalokohteen ilmanvaihdon perusparannuksen hankesuunnittelua varten, jonka sisäilmaston tavoitetasoksi asetettiin sisäilmastoluokka S2 ilmanvaihdon osalta. Varsinaisen työn tutkimustietoa pyrittiin soveltuvilta osin soveltamaan esimerkkikohteen hankesuunnittelun esitutkimuksessa.</p> <p>Kootun tietomateriaalin perusteella voitiin todeta ilmanvaihtosuunnittelun olevan monialainen ja kattavat tiedot vaativa talotekniikan suunnitteluosa-alue, jolla on erittäin suuri merkitys rakennuksen asuinviihtyvyyden kannalta.</p>	
Avainsanat	ilmanvaihto, sisäilmasto, virtaustekniikka, ilmanjako, äänitekniikka

Author(s) Title	Jouni Vallinen Basics proportion of ventilation planning
Number of Pages Date	42 pages + 7 appendices 21 May 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Design Orientation
Instructor(s)	Olli Jalonen, Principal lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to study and illuminate the fundamental, universal laws of physics which are needed in ventilation planning. The objective was also to create a brief planning guide about the basics of ventilation planning for future planning project assignments.</p> <p>The final year project was done as a literary research. Knowledge was searched in many different sources and summarized in the Bachelor's thesis as a consistent unit. The topic was also illuminated with figures, tables and many appendices.</p> <p>Furthermore, the final year project consisted of plotting various pre-requisites and alternatives for the planning of a ventilation project of a one-family house. The information gathered for the Bachelor's thesis was applied to the project planning.</p> <p>As a result, it was established that ventilation design is a diverse and demanding field of planning in building services engineering. It also has a major importance for residential comfort in a building.</p>	
Keywords	ventilation, microclimate of room, flow technology, air distribution, sound engineering

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Rakennuksen sisäilmastosta	2
2.1	Sisäilmaston muodostumisesta	2
2.2	Sisäilmaston vaikutuksista	2
2.3	Lämpöoloista	4
2.3.1	Operatiivisesta lämpötilasta	5
2.3.2	Ilman liikkeestä	6
2.3.3	Ilman kosteudesta	6
2.3.4	Rakenneteknisten ratkaisujen vaikutuksista rakennuksen lämpöoloihin	8
3	Ilmanvaihdon virtaustekniikasta	9
3.1	Kanavistovirtauksesta	9
3.2	Kanavistomitoituksesta	11
3.3	Kanaviston suunnittelusta ja -painetasosta	13
4	Ilmanjaosta	15
4.1	Ilmanvaihdon hyötysuhteesta	15
4.2	Sekoittavasta ilmanjaosta	16
4.2.1	Päätelaitteiden sijoittelusta	16
4.2.2	Ilman virtauksesta huonetilassa	18
5	Ilmanvaihdon äänitekniikasta	21
5.1	Äänen syntyemisestä ilmanvaihtolaitoksissa	21
5.2	Äänen vaimennuksesta ilmanvaihtolaitoksissa	24
5.2.1	Kanavavaimennuksesta	24
5.2.2	Kanaviston suunnanmuutosten ja poikkipinta-alan muutoksen aiheuttamasta vaimennuksesta	25
5.2.3	Äänen jakaantumisesta kanavistossa	27
5.2.4	Pääteheijastumisesta	27
5.2.5	Huonevaimennuksesta	28
5.3	Ääniteknisestä mitoituksesta ilmanvaihtolaitoksissa	29
5.4	Äänilaskennasta	29

6	Esimerkkikohde	30
6.1	Vaihtoehtoiset suunnitteluratkaisut kohteeseen	30
6.1.1	Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia ei tehdä	31
6.1.2	Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia tehdään	31
6.2	Kesäaikainen lämpötilan hallinta kohteessa	32
6.3	Rakennuksen nykyinen ilmanvaihto	33
6.4	Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia ei tehdä	34
6.5	Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia tehdään	35
6.5.1	Ikkunoiden uusinta tavallisiksi kolmilasisiksi ikkunoiksi	35
6.5.2	Ikkunoiden uusinta auringonsuojalaseiksi	38
6.6	Ilmanvaihdon palvelualueet	38
6.6.1	Alakerran ilmanvaihto omalla koneella	38
6.6.2	Ala- ja vinttikerros samalla koneella	39
6.7	Vaihtoehtojen vertailu	39
7	Yhteenveto	40
7.1	Tutkimusosuus	40
7.2	Esimerkkikohteen osuus	40
	Lähteet	42

## Liitteet

- Liite 1. Keskimääräiset näkyvyyskertoimet
- Liite 2. Kääntyvät ilmavirrat
- Liite 3. Kanava nomogrammit
- Liite 4. Kanavaosien kertavastuksia
- Liite 5. Ilmasuihkun laskennan parametreja
- Liite 6. Esimerkkirakennuksen pohja ja julkisivut
- Liite 7. Vertailut ilmanvaihtokoneet

## 1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on perehtyä ilmanvaihtosuunnittelun perusteisiin, jotka kaikki pätevät yleishyödyllisesti kohteesta riippumatta. Ilmanvaihdon suunnittelu koostuu suuresta joukosta fysikaalisia tekijöitä, jotka usein ovat keskinäisessä vaikutussuhteessa ja ovat osaltaan vaikuttamassa sisäilmaston laadun syntyyn. Nykyaikana laadun merkityksen korostumisen vuoksi tarvitaan enenevässä määrin perustietoutta hyvän ilmanvaihtolaitoksen suunnittelussa, sillä ilmanvaihdon merkitys hyvän sisäympäristön luomisessa korostuu.

Selvitystyö tehdään ns. kirjallisuustutkimuksena, jossa eri lähteistä etsitään tietoa tutkittavista aiheista ja ne referoidaan yhtenäisiksi kokonaisuuksiksi insinööriyöhön. Lisäksi asioita pyritään havainnollistamaan kuvioilla ja taulukoilla, laskentakaavoilla, sekä useilla liitteillä.

Työssä tutkitaan keskeisimpiä ilmanvaihtosuunnittelussa huomioonotettavia tekijöitä. Näitä ovat ilmanvaihdon virtaustekniikka, ilmanjaon muodostuminen ja äänen syntyminen ilmanvaihtolaitoksissa. Lisäksi alussa tutkitaan yleisesti sisäilmaston vaikutuksia henkilöiden viihtyvyydelle ja terveydelle.

Työssä ei tutkita muita sisäilmastoa muodostavia tekijöitä, sillä sisäilmasto on niin monialainen kokonaisuus, että sen kokonaistarkastelu vaatisi jo erillisen monialaisen työryhmän.

Lisäksi saatuja esitietoja sovelletaan erään esimerkkirakennuksen ilmanvaihdon perusparannuksen hankesuunnittelua varten. Siinä uuden sisäilmaston tavoitetasona pidetään *sisäilmastoluokitus 2008:n (LVI05-10440)* mukaista tasoa S2, joka rinnastetaan hyvään sisäilmastoon. Joistakin tasoluokituksen mukaisista arvoista voidaan kuitenkin poiketa, jos jonkin tavoitteen saavuttaminen muuten vaatii kohtuuttomia toimenpiteitä tai on taloudellisesti kannattamatonta. Kiinteistön lämmityskustannusten pienentäminen ja hyvän viihtyisän sisäilmaston luominen ovat hankkeen kulmakiviä.

## 2 Rakennuksen sisäilmastosta

### 2.1 Sisäilmaston muodostumisesta

Sisäilmastoon vaikuttavat tärkeimmät tekijät ovat ilman lämpötila ja -liikenoisuus, pintojen lämpötilat, pysty- ja vaakasuora lämpötilaero, lämpötilan muutosnoisuus, kemialliset ja biologiset epäpuhtaudet, kosteus ja pölyt (1, s. 11; 2, s. 13). Sisäilmasto on merkittävä tekijä hyvinvoinnin kannalta, sillä nykyihminen oleskelee sisätiloissa noin 90 % ajastaan. Hyvinvointi ilmenee mm. viihtyvyydessä, terveysvaikutuksissa ja työtehosta. Sisäilmastotekijöiden vaikutus muodostuu monesta tekijästä: henkilön terveydentilasta, iästä, aikaisemmasta herkistymisestä, ja altistusajasta jne. Erityisesti tiloissa, joissa oleskelee sairaita, lapsia tai vanhuksia, tulee sisäilmasto-olosuhteet pitää hyvinä. (1, s. 11.) Epäpuhtauslähteiden poistaminen ja vähentäminen ovat ensisijaisia epäpuhtauksien torjuntakeinoja. Muiden epäpuhtauslähteiden (ulkoilma, rakenteet, kalusteet, sisustus, ihmiset jne.) vaikutus eliminoidaan riittäväällä ilmanvaihdolla ja tuulilman suodatuksella. (3, s. 5.)

### 2.2 Sisäilmaston vaikutuksista

Sisäilmaston vaikutukset ilmenevät yleisimmin limakalvoilla ja hengityselimissä. Sisäilmaston vaikutukset riippuvat sen tekijästä. Esimerkiksi liiallinen lämpötilapoikkeama aiheuttaa epäviihtyvyyttä, joka kasvaa poikkeaman funktiona. Tämä voi rasittaa elimistöä niin, että terveyshaitta voi ilmetä suorasti esimerkiksi kehon kuumenemisena tai päinvastoin vilustumisena, tai epäsuorasti esimerkiksi vilustumisena.

Epäviihtyvyystekijät havaitaan usein epämiellyttävänä hajuna tai vetona. Näin ei kuitenkaan aina ole, sillä monet tekijät eivät ole aistinvaraisesti havaittavissa, kuten radioaktiivinen uraanista syntyvä radonkaasu. Sisäilmaongelmien kokeminen on hyvin henkilökohtaista. Siksi sisäilmasto-olosuhteiden henkilökohtainen säätömahdollisuus olisikin tärkeää. Viime vuosina esiintynyttä sairas rakennus -ongelmaa pidetään sisäilmaston aiheuttamana. Ongelman on todettu olevan yhteydessä mm. alhaiseen ilmanvaihdon määrään, tiettyjen orgaanisten yhdisteiden korkeaan pitoisuuteen, pölyiseen huoneeseen ja korkeaan huonelämpötilaan (4, s. 35). Ongelman tyypilliset oireet voivat olla hyvinkin epämääräisiä. Yleensä oireilu lisääntyy rakennuksessa ollessa ja vähenee siitä

poistuttaessa. Oireilu voi tällöin hävitä jopa kokonaan. Terveystieteiden vaikutusten ero voi olla hyvinkin suuri. Esimerkiksi atoopikot voivat reagoida hyvinkin voimakkaasti olosuhteissa, joissa terveelle ihmiselle ei aiheudu ongelmia. Atoopikoita on väestöstämme noin kolmasosa, joten ongelma tulisi tiedostaa yleisesti suunnittelussa.

Sairas rakennus -oireet ovat WHO:n (World Health Organization) määrittelyn mukaan seuraavat:

- nenän, kurkun ja silmien ärsytys
- kuivat limakalvot ja iho
- ihon punaläikkäisyys
- henkinen väsymys ja päänsärky
- hengitystietulehdukset ja yskä
- käheä ääni
- yliherkkyysoireet
- pahoinvointi ja huimaus.

Haitalliseksi tunnettujen pitoisuuksien (HTP) raja-arvot löytyvät asuinrakennusten osalta Suomen rakentamismääräyskokoelman osasta D2. Tämänkaltaista sisäilmastoa voidaan pitää tyydyttävänä. Tällöin terveydellinen vaara on vältetty ja enemmistö pitää olosuhteita viihtyisinä. On kuitenkin muistettava, että määritettyjen epäpuhtauksien raja-arvojen alittamisella ei välttämättä täysin vältetä terveyshaittoja, sillä pienemmätkin pitoisuudet voivat aiheuttaa oireita herkille ihmisille. Sisäilmastosuunnittelun lähtökohdan tulisi olla, ettei raja-arvoista poiketa kuin poikkeustilanteissa (taulukko 1). (1, s. 11-13.)

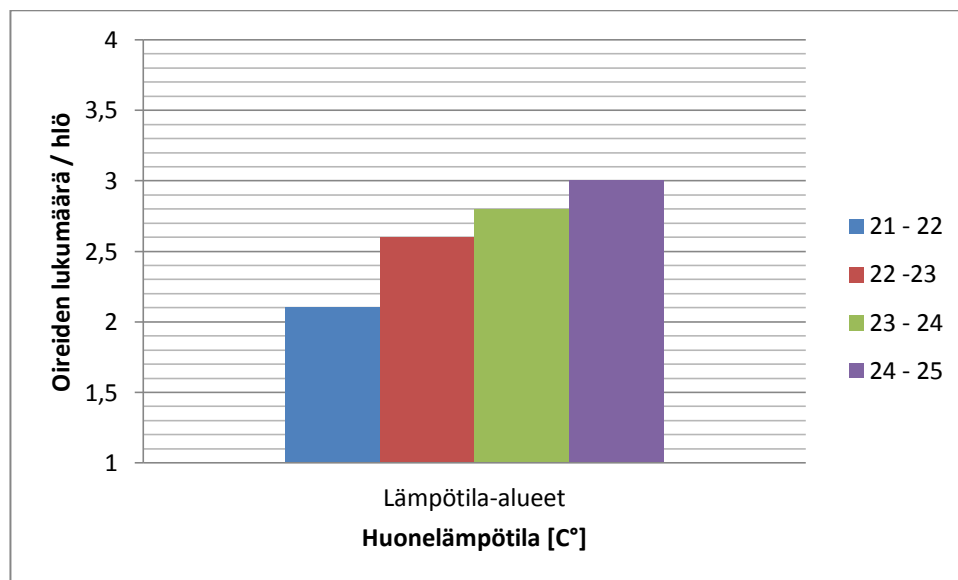
Taulukko 1. Sisäilmastoluokitus 2008:n mukaiset ilman laadun tavoitearvot.

		Sisäilmastoluokka		
		S1	S2	S3
Hiilidioksidipitoisuus	[ppm]	<750	<900	<1200
Radonpitoisuus	[Bq/m <sup>3</sup> ]	<100	<100	<200
Olosuhteiden pysyvyys	[% käyttöajasta]			
toimi- ja opetustilat		95	90	
asunnot		90	80	



### 2.3 Lämpöoloista

Elimistöä voimakkaasti kuormittavat lämpöolot aiheuttavat terveydellistä haittaa. Korkea lämpötila vähentää henkistä ja fyysistä suorituskykyä, sydänkohtausten määrän lisääntymistä hellejaksojen aikana, sekä lämpöuupumista ja –halvausta. Korkea lämpötila lisää myös rakennusmateriaalien epäpuhtaustuottoa ja alentaa ilman suhteellista kosteutta. Kaavio 1 havainnollistaa lämpötilan vaikutusta erilaisiin ärsytysoireisiin. Taulukosta on todettu lähdetekstissä: ”Korkean huonelämpötilan on todettu toimistorakennuksessakin (Pasilan virastokeskus) lisäävän monia ärsytysoireita” ,joten tulosta voitane pitää pätevänä myös asuinrakennuksissa (1, s. 15). Myös nopeat lämpötilanvaihtelut koetaan epämiellyttävinä vaikka huonelämpötila olisikin optimaalisten raja-arvojen sisällä (2, s. 13). Lämpötilan vaihtelun ei tulisi olla enempää kuin 1,1 °C tunnissa (2, s. 13). Matala lämpötila taas voi aiheuttaa kehon alijäähtymistä, etenkin sairaille ja vanhuksilla. Lisäksi siitä seuraa vedon tunnetta huonetilassa. (1, s. 15; 3, s. 2 - 3.)



Kaavio 1. Huonelämpötilan vaikutus ärsytysoireiden syntyyn (1, s.16).

Lisäksi voi yleisesti muistaa, että jokainen lämmitystilanteessa alennettu aste vähentää energiakustannuksia noin viisi prosenttia (4, s. 1).

### 2.3.1 Operatiivisesta lämpötilasta

Operatiivinen lämpötila kuvaa säteilyn ja konvektion yhteisvaikutusta ihmisen tuntemaan kehon lämpötilaan. Lämpö poistuu kehosta konvektiona ilmaan ja säteilynä ympäristön pintoihin. Konvektiotehoon vaikuttaa ilman lämpötila ja –nopeus. Säteilyyntä vaikuttavat pintojen lämpötilat. Pintojen vaikutus operatiiviseen lämpötilaan on jotta-kuinkin seinä- ja ikkunapinta-aloilla painotettu keskilämpötila. (1, s. 17; 2, s. 13–14.)

$$t_o = \frac{h_k * t_i + h_s * t_s}{h_k + h_s} \quad (1)$$

$t_o$  on operatiivinen lämpötila [°C]

$h_k$  on konvektion lämmönsiirtymiskerroin [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ]

$t_i$  on ilman lämpötila [°C]

$h_s$  on säteilyn lämmönsiirtymiskerroin [ $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ]

$t_s$  on keskimääräinen säteilylämpötila [°C]

Ulkopinnan lämmönsiirtymiskerroin vapaassa konvektiossa saadaan kaavasta kaksi. Muutos vapaasta pakotettuun konvektioon tapahtuu likimain ilman nopeudella 0,2 m/s (5, s. 9).

$$h_k = 2,38 * \Delta t^{0,25} \quad (2)$$

$\Delta t$  on ilman ja lämmönsiirtopinnan välinen lämpötilaero

$$h_s = \frac{\sigma * \epsilon * (T_{cl}^4 - T_s^4)}{t_{cl} - t_s} \quad (3)$$

$\sigma$  on Stefan-Boltzmannin säteilyvakio [ $5,6705 * 10^{-8} \text{ } W/m^2 K^4$ ]

$\epsilon$  on pinnan säteilyominaisuuksia kuvaava suure, emissiivisyys

$T_{cl}$  on kehon ulkopinnan lämpötila [K]

Vaattetun ihmisen keskiarvoinen pinnan emissiivisyys on 0,97 (5, s. 9).

Keskimääräinen säteilylämpötila ( $t_s$ ) voidaan laskea näkyvyyskertoimilla (liite 1) painotettujen pintojen keskilämpötilana kaavan 4 avulla.

$$t_s = F_1 * t_1 + F_2 * t_2 + \dots + F_n * t_n \quad (4)$$

Operatiivinen lämpötila voidaan myös laskea kaavalla 5, kun ilman nopeus on alle 2 m/s ja säteilylämpötila ei poikkea yli 4 °C:tta ilman lämpötilasta (5, s.13).

$$t_o = A * t_i + (1 - A) * t_s \quad (5)$$

A saadaan taulukosta 2.

Taulukko 2. Parametrin A -arvot ilman nopeuden funktiona.

Ilman nopeus [m/s]	0,05	0,15	0,2
A	0,42	0,42	0,46

### 2.3.2 Ilman liikkeestä

Vedon tunne syntyy ihon voimakkaasta jäähtymisestä. Sen syntymiseen vaikuttavat ilman nopeus ja -lämpötila, huonelämpötila, ilman liikkeen vaihtelu (katso liite 2) sekä säteilylämmönsiirto. Säteilylämmönsiirron osuus nousee huoneen pintojen lämpötilojen poiketessa huonelämpötilasta, kuten kylmän ikkunan vieressä. Tällöin kehoon voi syntyä lämpöepätasapaino, jolloin toinen puoli kehosta on ”kylmällä” ja toinen ”lämpimällä” puolella. Yli 2 °C:n lämpötilaero aistitaan vetona.

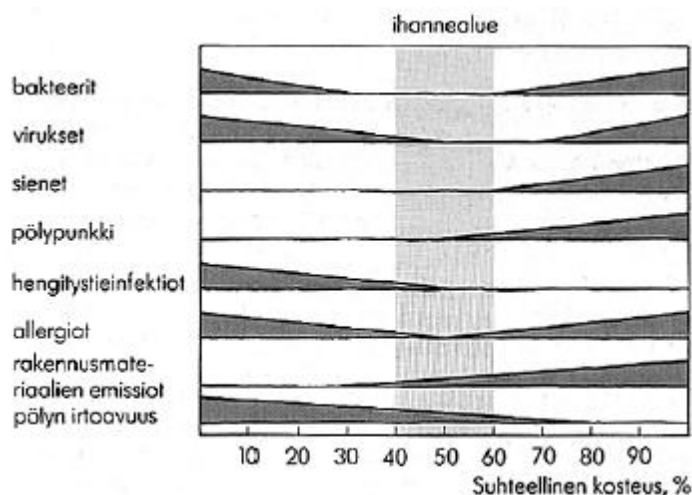
Normaali viihtyvyyttä lämpötila on 21-24 °C. Viihtyvyyden alueen yläpäässä keho sietää huomattavasti suurempia ilman nopeuksia, kun taas viihtyvyyden alueen alapuolella herkkyys vedon tunteelle kasvaa olennaisesti. (1, s. 20–22; 2, s. 15; 4, s. 9–10; 5, s. 25.)

### 2.3.3 Ilman kosteudesta

Suhteellinen ilman kosteus on suuri Suomessa lähes aina. Kuitenkin talvisin sisäilman suhteellinen kosteus sisätiloissa on hyvinkin matala, 10–20 %. Alhainen suhteellinen kosteus luo edellytykset limakalvojen kuivumiselle ja sen mukana tuomalle ärsytysoireille. Etenkin hengitystieallergikot reagoivat tähän voimakkaasti. On kuitenkin todettu, että puhtaan ilman alhainen kosteus ei vaikuta oireilua terveille henkilöille. Ilman epä-

puhtauksilla oletetaan olevan suurempi vaikutus kuivassa kuin kosteammassa ilmassa. Esimerkiksi ilman pölypitoisuus kasvaa alhaisemman ilman kosteuden vallitessa. Tällöin myös paperi- ja tekstiilikuitujen lujuus heikkenee, sekä staattinen sähköisyys lisääntyy. Ilman kostuttamiseen on aina suhtauduttava varauksella, sillä tällöin riski mikrobien ja homeitiöiden pääsystä huoneilmaan kasvaa. Tämä voi aiheutua kostutusvedestä, kostutuksen aiheuttamasta veden tiivistymisestä ja homeen kasvusta kanavien seinämiin. Kuitenkin kosteassa ( $RH > 45\%$ ) ilmassa pölypunteilla, sienillä ja muilla mikrobeilla on paremmat elinmahdollisuudet sekä joidenkin materiaalien (esim. lastulevy) epäpuhtauspäästöt kasvavat.

Suuri kosteus ilmassa ja rakenteissa aiheuttavat aina terveysriskejä ja rakennusvaurioita. Kosteuskuormaa rakennukseen aiheuttavat mm. ruuanlaitto, tiskaus, pyykinpesu, saunominen ja ihmiset. Esimerkiksi nelihenkinen perhe tuottaa kosteutta 10–12 litraa/vrk. Ilman suhteellisen kosteuden optimialue on 25–45 %. Kuviosta 1 voi nähdä erilaisia kosteuden vaikutuksia. (1, s. 22–25; 2, s. 14; 5, s. 24.)



Kuvio 1. Ilman kosteuden vaikutuksia. Viivan leveys on verrannollinen tekijän suuruuteen. (6, s. 5.)

### 2.3.4 Rakenneteknisten ratkaisujen vaikutuksista rakennuksen lämpöoloihin

Rakennussuunnittelun merkitys rakennuksen lämpöoloihin on suuri. Kylmänä vuoden aikana ulkoseinien pintalämpötila on huonelämpötilaa alhaisempi, joka saattaa aiheuttaa vedon tunnetta, etenkin jos seinien eristys on puutteellinen. Sitäkin merkittävämpi kohta vedon syntymiselle on ikkuna. Siksi suurten ikkunoiden alle on syytä sijoittaa jokin lämmityslaite. (1, s. 19.)

Lämpiminä vuoden aikoina rakennussuunnittelun merkitys rakennuksen lämpöoloihin korostuu. Huonelämpötila voi kohota auringon säteilyn vaikutuksesta liikaa. Auringon säteilyteho ikkunasta on yli  $1 \text{ kW/m}^2$ , jonka tuottaman lämmön poistaminen on vaikeaa. Huonelämpötiloihin voidaan vaikuttaa merkittävästi tilojen sijoittamisella ja suuntauksella, auringon suojauksella, ikkunoiden koolla ja lasivalinnoilla. Taulukko 3 havainnollistaa, että esimerkiksi erilaisilla auringonsuojalaseilla auringonsäteilyn aiheuttamaa lämpökuormaa voidaan pienentää merkittävästikin (7, s. 2). Rakenteiden eristämällä ja niiden lämpökapasiteetin hyväksikäytöllä on merkitystä, vaikkei kovin merkittävästi. Esimerkiksi raskasrakenteella kevyeen rakenteeseen verrattuna voidaan lämpötilaa laskea vain noin kaksi astetta, mikä on vaikutukseltaan muihin lämpötilan hallintakeinoihin nähden verratenkin pieni. (1, s. 19 – 20.)

Taulukko 3. Auringonsäteilyn huipputeho ja vuorokauden säteilyenergia ikkunan läpi kirkaana kesäpäivänä (7, s. 2).

Ikkunarakenne	Etelä		Itä		Länsi	
	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>
Kirkas lasi	317	2070	416	2163	439	2890
Absorboiva lasi	187	1274	235	1263	248	1671
Säleet ulk välissä	97	659	119	647	125	852
Heijastava lasi	66	457	80	441	85	581

### 3 Ilmanvaihdon virtaustekniikasta

#### 3.1 Kanavistovirtauksesta

Ilman virtaukseen voidaan soveltaa Bernoullin yhtälöä, jonka mukaan kitkattomassa virtauksessa paine-, asema- ja nopeusenergian summa pysyy samana eri kohdissa virtausta. Tällöin yhtälö saa yksinkertaisimmillaan muodon: (5, s. 93).

$$p_t = p_s + \frac{1}{2} * \rho * v^2 = p_s + p_{dyn} \quad (6)$$

$p_t$  on kokonaispaine [Pa]

$p_s$  on staattinen paine [Pa]

$p_{dyn}$  on dynaaminen paine [Pa]

$\rho$  on ilman tiheys [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  on ilman nopeus [m/s]

Todellisuudessa ilman virratessa aiheutuu kanavistosta ja sen muotokappaleista kitkaa. Tällöin painehäviötä vastaava energiamäärä muuttuu lämmöksi. Suorissa kanavissa ja putkissa syntyvä painehäviö saadaan kaavasta 7. (5, s. 95.)

$$\Delta p_{kanava} = \lambda * \frac{L}{d} * \frac{1}{2} * \rho * v^2 = R * L * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (7)$$

$\Delta p_{kanava}$  on kanavaosalla syntyvä painehäviö [Pa]

$\lambda$  on kitkakerroin

$L$  on kanavan pituus [m]

$d$  on kanavan halkaisija [m]

$R$  on kitkapainehäviö [Pa/m]

Kitkakertoimen määrittämiseksi peltikanaville käytetään likimääräistä kaavaa 8 (5, s. 96).

$$\lambda = 0,0072 + \frac{0,61}{Re^{0,35}} \quad (8)$$

Re on Reynoldsin luku (kaava 9)

$$Re = \frac{dv}{\nu} \quad (9)$$

$\nu$  on ilman kinemaattinen viskositeetti ( $T_{\text{ilma}} = 20 \text{ °C}$ )  $15,7 * 10^{-6} \text{ [m}^2/\text{s]}$

Käytännössä kanavan kitkapainehäviö (R) saadaan valmiista nomogrammista (katso liite 3.)

Suorien kanavaosien lisäksi erilaiset muotovastukset ja kanavistovarusteet aiheuttavat painehäviöitä kanavistoon. Muotovastuksen aiheuttama painehäviö saadaan kaavasta 10 verrannollisena virtauksen dynaamiseen paineeseen. Muuntoliittimissä muotovastus lasketaan yleensä suurimman nopeuden mukaan. (5, s. 99.)

$$\Delta p_{mv} = \zeta * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (10)$$

$\Delta p_{mv}$  on muotovastuksesta syntyvä painehäviö [Pa]

$\zeta$  on kanavaosan kertavastuskerroin

Liitteestä 4 saadaan erilaisia kanavaosien kertavastuskertoimia. Erilaisten kanavistovarusteiden aiheuttamat painehäviöt saadaan valmistajien tuotedokumenteista.

Edellisten perusteella yksittäisen kanavisto-osan kokonaispainehäviö saadaan laskemalla (kaava 11) suoran kanava kitkahäviöt ja muotovastukset yhteen (5, s. 101).

$$\Delta p_n = \left( \lambda * \frac{L}{d} + \sum \zeta \right) * \frac{1}{2} * \rho * v^2 = R * L + \sum \zeta * \frac{1}{2} * \rho * v^2 = R * L + \sum \zeta * p_{dyn} \quad (11)$$

$\Delta p_n$  on osasta n syntyvä painehäviö [Pa]

Yksi kanavistovirtauksen perusyhtälöistä on virtauksen jatkuvuusyhtälö (kaava 12), jonka mukaan massavirran tulee pysyä samana kanavan virtausalasta riippumatta (5, s. 94).

$$q_m = \rho_1 * v_1 * A_1 = \rho_2 * v_2 * A_2 \quad (12)$$

$q_m$  on ilman massavirta [kg/s]

$\rho_1$  ja

$\rho_2$  on vastaava ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$v_1$  ja

$v_2$  on vastaava ilman nopeus [m/s]

$A_1$  ja

$A_2$  on ilman virtausala [m<sup>2</sup>]

Tavanomaisissa matalapainelaitoksissa virtaus ei ole kokoonpuristuvaa, jolloin tiheys pysyy vakiona (5, s. 94). Tällöin

$$q_v = v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad (13)$$

$q_v$  on ilman tilavuusvirta [m<sup>3</sup>/s]

### 3.2 Kanavistomitoituksesta

Ilmanvaihtokanaviston mitoituksella on merkittävä osa luotaessa hyviä toimintaedellytyksiä päätelaitteille ja virtaussäätimille. Käytettyjä mitoitusmenetelmiä ovat: kokemusperäisten nopeuksien-, vakio kitkapainehäviön- ja staattisen paineen takaisin saamiseen perustuvan menetelmän käyttö. Kanaviston "väljä" mitoitus antaa parhaat edellytykset ilmavirtojen tasapainottamiselle ja hallitulle äänenkehitykselle. Kanaviston mitoitussuosituksista voidaan tarkastella liitteestä 3.



Kokemusperäisten nopeuksien käyttö merkitsee virtausnopeuden tasaista alentamista virtaussuunnassa edetessä kohti päätelaitetta. Menettely on pätevä vain yksinkertaisien kanavistojen mitoituksessa. Virtausnopeuksien arvoja nähdään taulukosta 4. (4, s. 116-117; 5, s. 102 – 103.)

Taulukko 4. Virtausnopeuksia kanaviston eri osissa (5, s. 102).

<b>Matalapainekanavat</b>	<b>Asunnot</b>
Pääkanavat	4* - 6**
Kokoojakanavat	3 - 5
Liitäntäkanavat	2,5 - 4
Puhallinaukko	5 - 8,5

\*Suositeltu

\*\*Suurin

Kokemusperäisten nopeuksien käytöstä todetaan eräässä lähteessä seuraavaa:

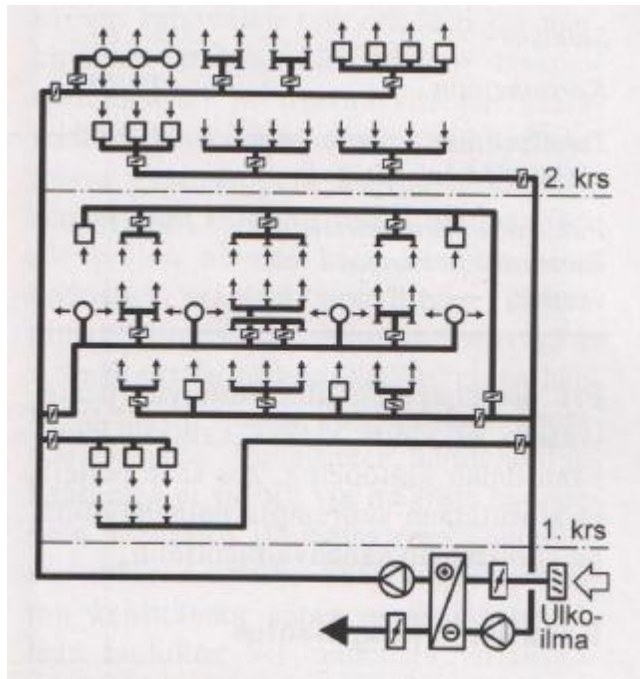
Kokemusperäisten kanavanopeuksiin perustuvat mitoitusmenetelmät johtavat liian suuriin kanavanopeuksiin ja painehäviöihin, vaikeasti perussäädettäviin ja ääniteknisesti hallitsemattomiin ilmakehävaihteluihin, sekä poikkileikkaukseltaan vähän väliä muuttuviin vuotoalttiisiin ja arkkitehtonisesti rumiin ilmakehävaihteluihin (8, s. 1).

Vakio kitkapainehäviö menetelmässä nimensä mukaisesti pidetään painehäviö koko ajan vakiona. Painehäviön suuruus on yleensä 1 Pa/m. Menetelmä on pätevämpi kuin kokemusperäisten nopeuksien käyttö vaikkei johdakaan hyvään tulokseen epäsymmetrisissä kanavistoissa. Kanaviston tasapainottaminen voi olla vaikeaa painehäviön vaihdeltaessa haarakanavissa ja siksi että menetelmä ei ota huomioon staattista painetta. (5, s. 103.)

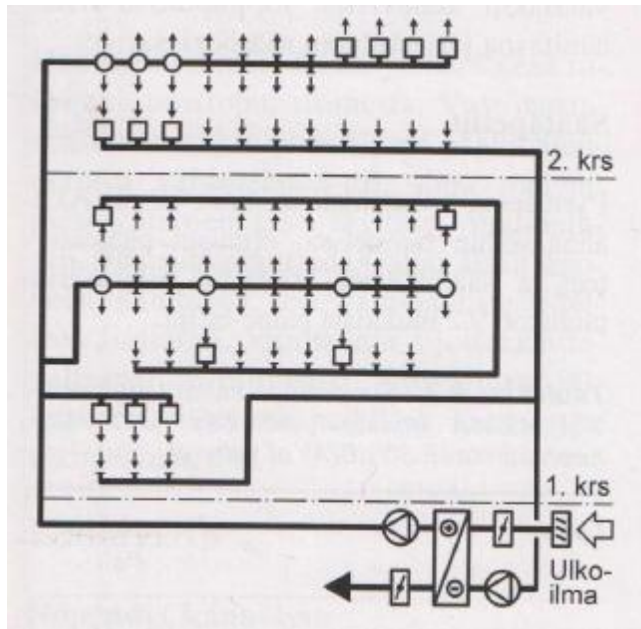
Staattisen paineentasaamiseen perustuvassa menetelmässä ilman virtausnopeutta pienennetään sen verran, että staattisen paineen nousu on vastaava kuin painehäviö seuraavaan haaraan. Tämä helpottaa kanaviston tasapainotusta. Menetelmä johtaa helposti kalliiseen kanavistoon. (5, s. 103.)

### 3.3 Kanaviston suunnittelusta ja -painetasosta

Ilmanvaihtokanaviston suunnittelun perustana tulee olla, että kanavisto on: energia- ja säätötekniisesti suorituskykyinen, tiivis, äänitekniisesti hallittu, virtaustekniisesti tasapainoinen, muuttuvilla ilmavirroilla toimiva, itsestään perussäätävä ja helposti säädettävä. Kuviot 2 ja 3 havainnollistavat virtaustekniisesti toimivan kanaviston periaatetta.



Kuvio 2. Perussäädettävä kanavisto (4, s. 204).



Kuvio 3. Kanavisto, jota ei voida perussäätää (4, s. 204).

#### Kanaviston painetasosta

Ilmanvaihtokanaviston painetason tulisi olla noin kolminkertainen termiseen painetasoon (kaava 14) nähden sallittujen ilmavirtapoikkeamien ollessa 5–10 %.

$$\Delta p = \left( \frac{T_s - T_u}{T_u} \right) * \rho_s * g * h \quad (14)$$

$\Delta p$  on hormivaikutuksesta syntyvä paine-ero [Pa]

$T_s$  on sisäilman absol. lämpötila [K]

$T_u$  on ulkoilman absol. lämpötila [K]

$\rho_s$  on sisäilman tiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$g$  on maan vetovoiman kiihtyvyyys [ $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ ]

$h$  on hormin korkeus [m]

Termiset paine-erot muuttavat ilmanvaihtoa rakennukseen ja rakennuksen ilmavirtoja. Muutoksiin vaikuttavat lisäksi ilmekanaviston painetaso ja -tiiviyys, sekä rakennuksen sisäinen- ja ulkoinen tiiviyys. (4, s. 120.)

## 4 Ilmanjaosta

Ilmanjaolla on suuri merkitys huonetilan termiseen viihtyvyyteen. Ilmanvaihto voikin olla tasoltaan vain niin hyvä kuin ilmanjako. Ilmanjaon tulee toimia niin, että epäpuhtaudet eivät leviä laajasti, epäpuhtaudet poistuvat nopeasti, oleskeluvyöhykkeen ilma vaihtuu nopeasti ja ilmavirtaus epäpuhtauslähteistä on poistoilmalaitteita kohti. Ilmanjako luokitellaan neljään tapaukseen: sekoittava -, syrjäyttävä -, vyöhyke - ja mäntävirtaus ilmanjako.

Tässä työssä perehdytään vain sekoittavaan ilmanjakoon, sillä se on pientaloissa käytännössä ainoa vaihtoehto ja näin ollen yleisin.

### 4.1 Ilmanvaihdon hyötysuhteesta

Ilmanvaihdon hyötysuhteella kuvataan ilman lyhyimmän mahdollisen- ja keski-ikä suhdetta samalla ilmavirralla (kaava 15). Ilman keski-ikä on aika, joka kuluu ilman kulkies- sa pääte-elimestä tarkastelukohtaan. Hyötysuhteeseen vaikuttavat päätelaitteiden sijoi- tus ja tuloilman lämpötila. Ylilämpöinen tuloilma voi kerrostua huoneen yläosaan, jol- loin sekoittuminen jää puutteelliseksi ja hyötysuhde heikkenee. Lisäksi heikkenee koko järjestelmän energiatehokkuus.

$$\epsilon_a = \left( \frac{\tau_n/2}{\langle \tau \rangle} \right) \quad (15)$$

$\epsilon_a$  = ilmanvaihdon hyötysuhde

$\tau_n = V/q_v =$  ilmanvaihdon nimellisaikavakio [h] (huonetilavuus [m<sup>3</sup>] / ilmavirta [m<sup>3</sup>/h])

$\langle \tau \rangle =$  ilman keski-ikä huonetilassa [h]

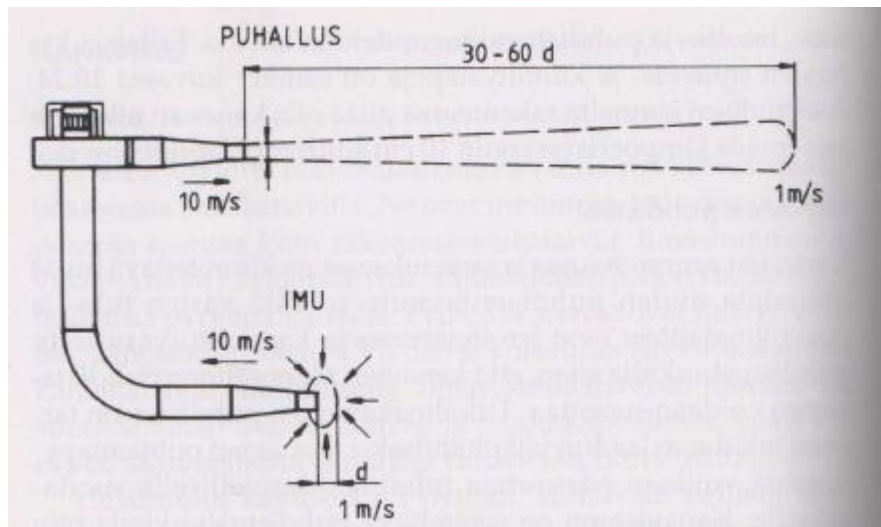
Sekoittavassa ilmanjaossa hyötysuhde on 50 % tuloilman sekoittuessa täydellisesti huoneilmaan. Jos tilassa syntyy oikosulkuvirtausta (osa tuloilmasta kulkeutuu suoraan poistoilmalaitteeseen), jää hyötysuhde pienemmäksi. Ilmanvaihdon hyötysuhde kuvaa riittävästi ilmanvaihdon tehokkuutta, jos tilassa ei ole merkittäviä epäpuhtauslähteitä. Näin on yleensä pientaloissa. (4, s. 137-138.)

## 4.2 Sekoittavasta ilmanjaosta

Sekoittava ilmanjako perustuu huonetilaan suurella nopeudella puhallettavaan ilmasuihkuun, jolloin huoneilma imeytyy suihkuun ja sekoittuu tehokkaasti tuloilmaan. Ilmasuihkun lähtönopeus voi olla jopa 10 m/s. Tällä tavoin epäpuhtauksien haittavaikutukset eliminoidaan laimentamalla niiden pitoisuutta huoneilmassa ja huonetilassa valitsee joka puolella jotakuinkin samanlainen ilman tila. Suuri lähtönopeus voi kuitenkin helposti aiheuttaa ääniongelmia huonetilaan. Tuloilma voi olla isothermistä (tasalämpöistä), yli -, tai alilämpöistä. Sekoittavalla ilmanjaolla voidaan erityisesti myös jäähdyttää huonetilaa (katso 6.2), eikä se ole kovin herkkä häiriövirtauksille. (1, s. 194; 3, s. 16; 4, s. 139; 5, s. 153.)

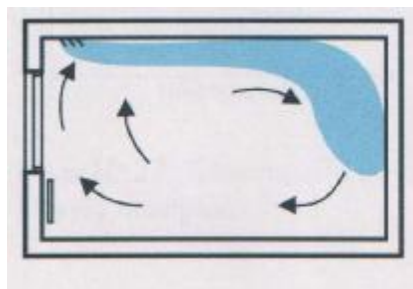
### 4.2.1 Päätelaitteiden sijoittelusta

Käytännössä tuloilmalaitteiden sijoittelulla ja niiden puhallussuunnalla muodostetaan huoneen virtauskenttä, sillä poistoilmavirtauksen nopeus pienenee kymmenesosaan noin halkaisijan etäisyydellä pääte-laitteesta (kuvio 4). Sijoittelua mietittäessä on otettava huomioon ikkunapintojen - ja lämmityslaitteiden -, erilaisten esteiden aiheuttamat häiriöt virtauskenttään, poistoilmalaitteen sijoittaminen oikosulkuvirtausten välttämiseksi, tuloilmalaitteen asennuskorkeus, tuloilman lämpötila, sekä usean tuloilmalaitteen yhteisvaikutus virtauskenttään. Pientaloiloihin erityisesti soveltuvat sijoituspaikat ovat ulkoseinälle- ja käytäväseinälle sijoittaminen. (1, s. 194–195; 4, s. 140.)



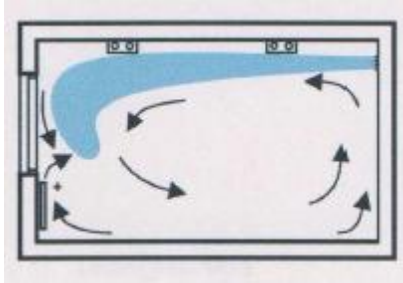
Kuvio 4. Tuloilmasuihkun vaikutus (1, s 194).

Ulkoseinältä tuloilman puhaltaminen (kuvio 5) soveltuu huonetilan lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen, ja sillä saadaan tasainen virtaus koko huonetilaan. Heittopituuden tulee ylittää sisäseinään asti, jotta ilman sekoittuminen olisi riittävä myös lämmitystilanteessa. (1, s. 196.)



Kuvio 5. Puhallus ulkoseinältä (1, s. 196).

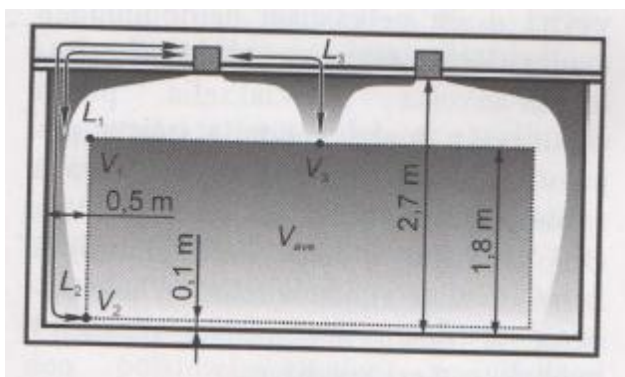
Käytäväseinältä tuloilman puhaltaminen (kuvio 6) voi aikaansaada vetohaittoja huonetilaan. Lämmityskaudella tuloilmasuihku saattaa aiheuttaa vetoa lattianrajaan vahvistamalla kylmää ilmavirtausta ikkunapintaa pitkin. Jäähdytyskaudella taas vetoa voi aiheutua tuloilmasuihkun törmätessä lämpimän ikkunapinnan synnyttämään konvektiovirtaukseen, jolloin molemmat virtaukset kääntyvät alaspäin kohti lattiaa. (1, s. 196.)



Kuvio 6. Puhallus käytäväseinältä (1, s. 196).

#### 4.2.2 Ilman virtauksesta huonetilassa

Ilmanvirtauksen hallinta oleskeluvyöhykkeellä on ilmanjaon suunnittelun perusta. Oleskeluvyöhyke alkaa 0,5 m:n etäisyydeltä seinistä ja rajoittuu 1,8 m:n korkeuteen lattias-ta. Ilmavirtauksen nopeus tulee tarkastella "kriittisissä pisteissä"  $V_1 - V_3$ , jotka ilmenevät kuvioista 7. Kohdassa:  $V_1$  suihku tulee oleskeluvyöhykkeelle (kuvio 7),  $V_2$  suihku vaikuttaa lattianrajassa (kuvio 7) ja  $V_3$  erilliset suihkut törmäävät keskenään (kuvio 7).



Kuvio 7. Ilmavirtausten kriittiset pisteet (4, s. 140).

Ilmavirtausten hallinnan suunnittelussa on otettava huomioon useita tekijöitä (katso 4.2.1), joiden vaikutukset käytännössä kannattaa suorittaa laitetoimittajien ja erilaisten laitevalintaohjelmien avulla.

Ei -isotermisen suihkun heittopituutta tai ilmasuihkun nopeutta valitussa pisteessä voidaan tarkastella kaavojen 16 (aksoalisymmetriselle ja radiaalisuihkulle) ja 17 (tasomaiselle suihkulle) avulla ilmasuihkun vyöhykkeellä 3, joka on tärkein ja suunnittelussa tarkasteltava vyöhyke. (4, s. 140 - 141.)

$$\frac{v_x}{v_0} = \frac{m \cdot \sqrt{A_0} \cdot k_{sf} \cdot k_{ji} \cdot k_{cf} \cdot k_n}{x} \quad (16)$$

$$\frac{v_x}{v_0} = m \cdot \sqrt{\frac{h}{x}} \cdot k_{sf} \cdot k_{ji} \cdot k_{cf} \cdot k_n \quad (17)$$

$v_v$  on suihkun liikeratanopeus tarkastelukohdassa suihkun keskiakselilla [m/s]

$v_0$  on suihkun lähtönopeus [m/s]

$m$  on heittopituuskerroin (liite 5)

$x$  on tarkastelupisteen etäisyys [m]

$A_0$  on laitteen otsapinta-ala [m<sup>2</sup>]

$h$  on raon korkeus [m]

$k_{sf}$  on seinä- tai kattopinnan vaikutuskerroin (tasossa kiinni olevassa suihkussa 1,4; vapaalla suihkulla 1,0)

$k_{ji}$  on samaan suuntaan puhaltavien samanlaisten tuloilmasuihkujen yhteisvaikutuskerroin (liite 5)

$k_{cf}$  on ahtaan tilan vaikutuskerroin (liite 5)

$k_n$  on lämpötilakerroin (liite 5) (Alilämpöisen vapaan suihkun horisontaaliselle etenemiselle  $k_{n,x}$  ja liikeratanopeudelle  $k_{n,v}$ . Vastaavat kiinnittyneen suihkun kertoimet ovat  $(k_n + k_{sf})_x$  ja  $(k_n + k_{sf})_v$ , joissa on huomioitu alilämpöisyyden ja pinnan vaikutus.)



Ilmasuihkun taipumisesta

Noste- ja hitausvoimat aiheuttavat ilmasuihkun taipumista. Näiden suhdetta kuvataan Arkimeden luvulla, joka saadaan kaavasta 18.

$$Ar = \frac{g * \Delta T * d_e}{v_0^2 * T_h} \quad (18)$$

$g$  on maan vetovoiman kiihtyvyys [9,81 m/s<sup>2</sup>]

$\Delta T$  on tulo- ja huoneilman lämpötilaero [K]

$d_e$  on tuloilmalaitteen ekvivalenttinen halkaisija [m]

$v_0$  on suihkun lähtönopeus [m/s]

$T_h$  on huonelämpötila [K]

Arkimeden luvun avulla voidaan laskea suihkun taipuma keskiakseliinsa nähden vaakasuoralle aksiaalisymmetriselle suihkulle kaavalla 19 ja tasosuihkulle kaavalla 20.

$$\frac{y}{d_e} = 0,065 * Ar * \left(\frac{x}{d_e}\right)^3 \quad (19)$$

$$\frac{y}{h} = 0,18 * Ar * \left(\frac{x}{h}\right)^{2,5} \quad (20)$$

$h$  on tasosuihkulla puhallusraon korkeus [m]

Kiinnittynyt ilmasuihku irtoaa pinnastaan kun kriittinen Arkimeden luku ( $Ar_{cr}$ ) alittuu. Nämä ovat: aksiaalisuihkulla 0,30; tasosuihkulla 0,23; ja radiaalisuihkulla 0,18. Irtoamiskohta voidaan määrittää paikallisen Arkimeden luvun avulla ( $Ar_s$ ) aksiaali- ja radiaalisuihkulle kaavalla 21 ja tasomaiselle suihkulle kaavalla 22. (4, s. 145-147.)

$$Ar_s = \frac{n}{m^2} * Ar_0 * \left(\frac{x}{\sqrt{A_0}}\right)^2 \quad (21)$$

$$Ar_s = \frac{n}{m^2} * Ar_0 * \left(\frac{x}{h}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (22)$$

$Ar_0$  on Arkimeden luku suihkun lähtöpisteessä

$n$  on lämpötilakerroin (riittävällä tarkkuudella  $0,75 * m$ )

## 5 Ilmanvaihdon äänitekniikasta

Tässä luvussa käsitellään äänitekniikkaa vain pientalon ilmanvaihdon suunnittelua silmällä pitäen, sillä ilmanvaihdon äänitekniikka yleisesti on niin laaja-alainen käsite, että sen käsittely olisi täysin itsenäinen teoksensa. Lisäksi käsiteltävät äänitekniset asiat tässä luvussa pätevät pyöreille kierresaumakanaville, sillä pientaloissa ei käytetä kantti-kanavia muutoin kuin saunakanavana, jonka osuus koko kanavistosta on häviävän pieni.

Ilmastointilaitoksessa ääni etenee runko- ja ilmaääninä. Ilmaääni etenee nimensä mukaisesti ilmassa, kun taas runkoääni on kanavistoa pitkin kulkevaa värähtelyä, josta syntyy myös ilmaääntä. Äänit siirtyvät useita eri reittejä: kanavien ilmatilaa pitkin, aukkojen kautta ympäristöön, kanavien seinämien lävitse tai niitä pitkin ja rakenteiden lävitse. Kaikkien äänilähteiden ja äänen etenemistä edesauttavat tekijät on otettava suunnittelussa huomioon, jotta päästään hyvään lopputulokseen. (8, s. 3; 4, s. 197.)

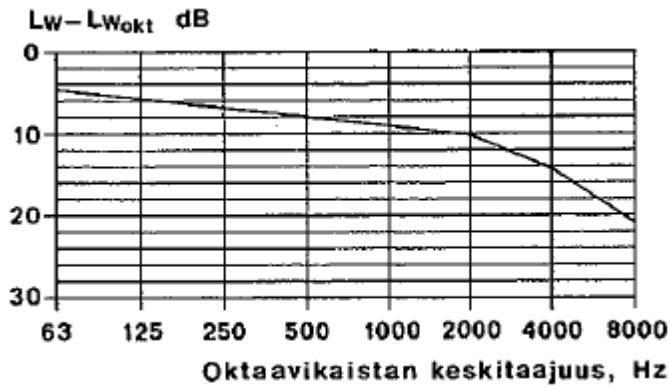
### 5.1 Äänen syntymisestä ilmanvaihtolaitoksissa

Ilmanvaihtolaitoksen äänilähteet voidaan jakaa kahteen osaan: erilaisten koneiden- (1) ja virtaavan ilman (2) aiheuttama ääni. Puhallinten ja kanavistovarusteiden äänenkehitys saadaan valmistajien tuotetiedoista ja kanaviston synnyttämä äänen tehotaso [dB] voidaan laskea kaavalla 23, johon virtausmelun taajuusspektri saadaan kuviosta 8. (9, s. 75–76; 10, s. 41.)

$$L_W = 10 + 50 * \log v + 10 * \log A \quad (23)$$

$v$  on virtausnopeus [m/s]

$A$  on kanavan poikkipinta-ala [m<sup>2</sup>]



Kuvio 8. Virtausmelun taajuusspektri (9, s. 75).

Käyrien ja haarojen äänenkehitys voidaan laskea kaavalla 24.

$$L_W = L_{Wp} + 10 * \log \Delta f + 30 * \log d_h + 50 * \log v_h \quad (23)$$

$L_{Wp}$  on Strouhal -luvusta ( $Str$ ) riippuva perustehotaso, kuvio 9 [dB]

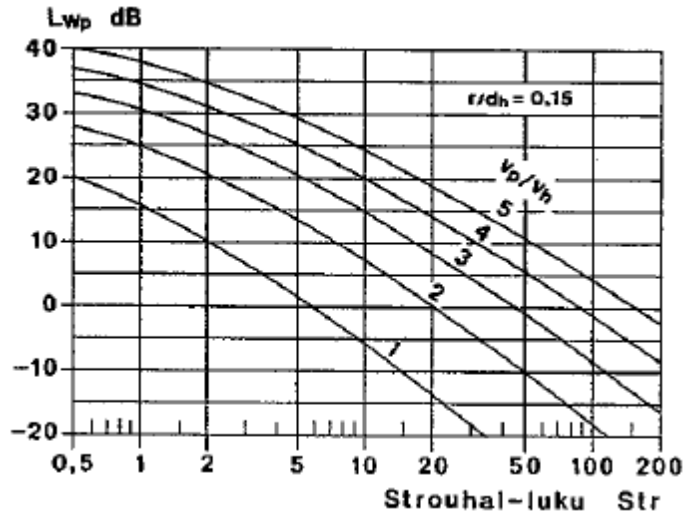
$Str$  on  $f_m * d / v$

$v_h$  on virtausnopeus haarassa [m/s]

$d_h$  on haarakanavan halkaisija [m]

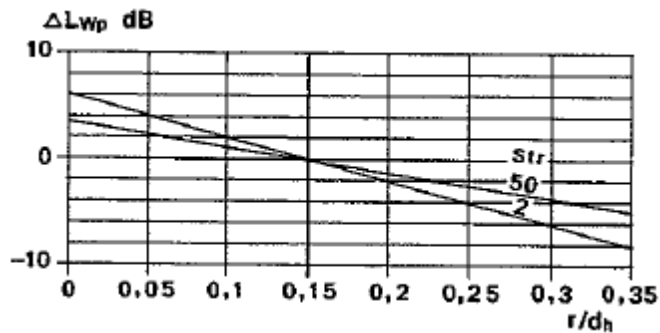
$f_m$  on oktaavikaistan keskitaajuus (taulukon 5 mukaan) [Hz]

$\Delta f$  on oktaavikaistan leveys (taulukon 5 mukaan) [Hz]



Kuvio 9. Käyrän tai haaran aiheuttama virtausmelu (9, s. 76).

Kuvion 9 arvot pätevät kun  $r / d_h$  on 0,15, muutoin arvoa korjataan kuvion 10 mukaan.



Kuvio 10. Pyöristyssäteen vaikutus äänen tehotasoon (9, s. 76).

Taulukko 5. Laskenta-arvo  $10 * \log \Delta f$  (9, s. 75).

	Oktaavikaistan keskitaajuus [Hz]							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\Delta f$	44	88	176	352	704	1408	2786	5600
$10 * \log \Delta f$	16	19	22	25	28	31	34	37

## 5.2 Äänen vaimennuksesta ilmanvaihtolaitoksissa

Kanavistossa syntyy ”luonnollista” äänenvaimenemista monen tekijän vaikutuksesta. Värähtelystä syntyvä runkoääni vaimenee värähtelyn heiketessä, kun taas ilmaääni vaimenee pääte- ja huonevaimennuksen, kanaviston poikkipinta-alojen muutosten ja äänitehon hajaantumisen vaikutuksesta. (8, s. 3.)

### 5.2.1 Kanavavaimennuksesta

Pyöreiden peltikanavien aikaansaama vaimennus on niin vähäinen (taulukko 6), että se jätetään varmuusvaraksi.

Taulukko 6. Suoran pyöreän peltikanavan vaimennus (9, s. 77).

<b>d [mm]</b>	Vaimennus taajuudesta riippuvana [dB/m]				
	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>&gt; / = 1000</b>
75 - 200	0,1	0,1	0,15	0,15	0,3
200 - 400	0,06	0,1	0,1	0,15	0,2
400 - 800	0,03	0,06	0,06	0,1	0,15
800 - 1600	0,03	0,03	0,03	0,06	0,06

Kanavavaimennusta voidaan parantaa verhoamalla kanavan sisäpinta absorboivalla materiaalilla. Tähän perustuu myös erillisten absorptio äänenvaimentimien toiminta. Taulukosta 7 nähdään verhotun kanavan vaimennuskyky, joka heikkenee kanavakoon kasvaessa. Tämä johtuu ääniaaltojen taipuman heikentymisestä kohti absorptiomateriaalia, eli ääniaallot taipuvat sitä paremmin mitä suurempi ääniaallonpituus on verrattuna kanavan kokoon. Siksi suuremmissa lieriöäänenvaimentimissa on keskelle absorptiomateriaalista tehty lieriö, joka oleellisesti parantaa äänenvaimennuskykyä yksittäisen virtaustien pinta-alan pienentyessä. (10, s. 65–66, 76.)

Taulukko 7. 50 mm:n absorptioverhouksella varustetun kanavan vaimennus [dB/m] (10, s. 66).

<b>d</b> <b>[mm]</b>	<b>Taajuus [Hz]</b>						
	<b>63</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>100</b>	6	9	16	30	39	39	24
<b>125</b>	5	7	13	25	31	31	24
<b>160</b>	4	5	19	19	24	24	16
<b>200</b>	3	4	8	13	14	13	6
<b>250</b>	3	4	7	11	12	10	4
<b>315</b>	2	3	6	9	9	7	1
<b>400</b>	2	2	5	7	6	4	1
<b>500</b>	2	2	5	6	5	3	1
<b>630</b>	1	1	4	5	4	1	0
<b>800</b>	1	1	3	3	2	1	0
<b>1000</b>	1	1	2	2	1	0	0

Eräissä lähteissä mainitaan ilmiöstä seuraavaa:

Suoran kanavan vuorausta ei ole syytä jatkaa yli matkan 5 s (s on kanavan sisähalkaisija), sillä varsinkin korkeammilla taajuuksilla ääniaallot pyrkivät etenemään vaimentumatta kanavan suuntaisina. Kulman, mutkan tai muun häiriökohdan jälkeen on vuoraus taas tehokas. (9, s. 79)

### 5.2.2 Kanaviston suunnanmuutosten ja poikkipinta-alan muutoksen aiheuttamasta vaimennuksesta

#### Suunnanmuutoksista

Suunnanmuutoksen aikaansaamaan äänenvaimennukseen vaikuttavat: kanavan koko, mutkan muoto ja -absorptioverhoukset sekä mutkaan kohdistuvan äänikentän laatu. Taulukosta 8 nähdään vaimennukset pyöreälle kanavaosalle.

Taulukko 8. Pyöreän käyrän aikaansaama vaimennus (9, s. 79).

d [mm]	Taajuus [Hz]						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
125 - 250	0	0	0	1	2	3	3
280 - 500	0	0	1	2	3	3	3
530 - 1000	0	1	2	3	3	3	3
1050 - 2000	1	2	3	3	3	3	3

Suunnanmuutoksen aiheuttama vaimennus syntyy ääniaaltojen takaisinheijastumisesta. Lisäksi osan ollessa absorptioverhottu, taipumattomat korkeataajuiset ääniaallot vaimenevat kohdatessaan absorptiopinnan. (10, s. 68.)

Poikkipinta-alan muutoksista

Kanavan poikkipinta-alan supistuessa syntyy äänenvaimentumista, johon vaikuttaa myös pinta-alamuutoksen kulma. Vaimennus [dB] voidaan laskea kaavalla 24, joka on pätevä taajuusalueilla  $f < c/d$  (c on äänen nopeus [m/s], d on kanavan halkaisija [m]), sekä pinta-alamuutoksen ollessa suorakulmainen.

$$D = 10 \lg \left( \frac{(m + 1)^2}{4m} \right) \quad (24)$$

m on kanavien poikkipinta-alojen suhde ( $m > 1$ )

Poikkeavat pinta-alamuutoskulmat huomioidaan korjauskertoimilla (taulukko 9).

Taulukko 9. Korjauskertoimia eri kulmamuutoksille (10, s. 71).

Supistuskulma	Kerroin
90	1
75	0,4
60	0,25
45	0,15
30	0,12

### 5.2.3 Äänen jakaantumisesta kanavistossa

Ääniteho jakaantuu kanavistohaarojen pinta-alojen suhteessa. Tällöin äänen jakaantuminen noudattaa kaavaa 26.

$$L_{w1} = L_w - 10 \lg ((A_1 + A_2) / A_{1+2}) \quad (26)$$

$L_{w1}$  on haarautuvaan kanavaan siirtyvä äänen tehotaso [dB]

$L_w$  on kokonaisäänien tehotaso [dB]

$A_1$  on haarautuvan kanavan pinta-ala [ $m^2$ ]

$A_2$  on haaran jälkeen jatkuvan kanavan pinta-ala [ $m^2$ ]

Yleensä äänen jakaantuminen voidaan kuitenkin laskea jakaantuvien ilmavirtojen suhteessa olettaen, että haaran jälkeisten osien alat ovat jotakuinkin ilmavirtojen suhteessa. Tällöin äänen jakaantuminen noudattaa kaavaa 27.

$$L_{w1} = L_w - 10 \lg (q_v + q_{v1}) \quad (27)$$

$q_v$  on puhaltimen kokonaisilmavirta [l/s]

$q_{v1}$  on haarautuvaan kanavaan siirtyvä ilmavirta [l/s]

### 5.2.4 Pääteheijastumisesta

Ääniaaltojen kohdatessa kanavan pään, aiheutuu pääteheijastuminen takaisin kanavaan. Sen suuruuteen vaikuttavat kanavan poikkipinta-ala, äänen taajuus, sekä päätteen kohdan sijoittuminen tilan rajapintoihin nähden. Pääteheijastumista syntyy enemmän matalilla taajuuksilla ja pienemmällä kanava-aukon alalla. Pääteheijastumisen aikaansaama vaimennus saadaan kaavasta 28. (9, s. 81; 10, s. 83.)



$$D = 10 \lg (1 + (c/4f\pi)^2 Q / S) \quad (28)$$

D on päätevaimennus [dB]

c on äänen nopeus [m/s]

f on äänen taajuus [Hz]

S on pääteaukon ala [m<sup>2</sup>]

Q on avaruuskulma, johon ääni hajaantuu [taulukko 10]

Taulukko 10. Avaruuskulma pääteaukon sijainnin mukaan (10, s. 83).

<b>Aukon sijainti</b>	<b>Q</b>
Vapaasti tilassa	4π
Tasopinnalla (seinä, katto)	2π
Kulmassa	π
Nurkassa	π/2

### 5.2.5 Huonevaimennuksesta

Ilmanvaihdosta syntyvää tilakohtaista äänenpainetasoa alentaa myös ns. huonevaimennus, joka on riippuvainen huoneen absorptioalasta. Absorptioala kuvaa huoneen pintojen kykyä vaimentaa äänitehoa. Huonevaimennus voidaan laskea äänentaajuuskaistoittain kaavalla 29.

$$L_W - L_p = D = 10 \lg \frac{A'}{4} \quad (29)$$

L<sub>W</sub> on äänilähteen äänitehotaso [dB]

L<sub>p</sub> on äänenpainetaso tarkasteltavassa pisteessä [dB]

D on huonetilan aikaansaama vaimennus [dB]

A' on huoneen absorptioala tarkasteltavalla taajuudella [m<sup>2</sup>]

Huoneen absorptioala saadaan kaavalla 30.

$$\hat{A} = \alpha_1 * S_1 + \alpha_2 * S_2 + \dots + \alpha_n * S_n = D = 10 \lg \frac{\hat{A}}{4} \quad (30)$$

$\alpha_x$  on osapinnan absorptiokerroin

$S_x$  on osapinnan ala [m<sup>2</sup>]

Absorptiota aiheuttavat pintojen lisäksi tilassa olevat henkilöt ja kalusteet. (9, s. 65; 10, s. 21.)

### 5.3 Ääniteknisestä mitoituksesta ilmanvaihtolaitoksissa

Ilmastointijärjestelmä tulee suunnitella niin, että se ei aiheuta ääniongelmia. Äänitekniiset seikat tulee huomioida jo suunnittelun alussa tiedostamalla järjestelmän pyörivät laitteet sekä kanaviston osat, joissa virtausnopeus tai paineen alenema on suuri. Yleensä hiljainen ääni ja hyvä hyötysuhde kulkevatkin käsi kädessä. Tästä seuraakin, että kanavakoot tulisi mitoittaa niin, että virtausnopeudet olisivat alhaiset ja itse kanaviston tulisi olla mahdollisimman virtaviivainen (mahd. loivat suunnanmuutokset).

Kanaviston tiiviydellä on olennainen vaikutus järjestelmän äänitasoon, sillä kanaviston vuodoista voi syntyä selkeästi havaittavaa kapeakaistaista ääntä. Pientaloissa merkittävin äänilähde on ilmastointilaitoksen puhallin, jota valitessa kannattaakin tutkia sen tuottamaa äänentaajuusjakaumaa. Tämä perustuu siihen, että korkeiden taajuuksien vaimentaminen on helpompaa kuin matalien. Lisäksi itse kone kannattaa sijoittaa toisarvoiseen tilaan, sillä koneen vaipan kautta siirtyy melua ympäristöön. (10, s. 115-116.)

### 5.4 Äänilaskennasta

Ääniteknisessä mitoituksessa laskelmat tehdään oktaavikaistoittain, jonka lopputulos muutetaan A-painotetuksi äänitasoksi (10, s. 116).

### Perusmenetelmästä

Perusmenetelmässä puhaltimen äänestä vähennetään kaikkien vaimennusten summa, jolloin erotus on huoneen äänenpainetaso. Tällöin kanaviston osien aiheuttaman virtausmelun tulee olla tarkasteltavassa kohdassa ainakin 10 dB alempi kuin puhallinään. Vaatimusten ollessa tiukat on laskelma syytä suorittaa niin, että kunkin kanavaosan mahdollinen lisä-äänentuotto tarkastellaan erikseen. (9, s. 81-82.)

### Nopeasta menetelmästä

Usein saadaan suuntaa antava tulos tilan äänenpainetasosta laskemalla vain 250 Hz:n kaista, joka on käytännössä osoittautunut määrävääksi oktaavikaistaksi. Menetelmä ei kuitenkaan kerro mitään melun taajuusjakaumasta ja näin ollen myöskään sen häiritsevyydestä. (9, s. 81-82.)

## 6 Esimerkkikohte

Kohde on tällä hetkellä yhdessä kerroksessa asuttu hirsirunkoinen pientalo, jonka kerrosala on noin 170 m<sup>2</sup>. Rakennuksen ullakko on tarkoitus tulevaisuudessa saneerata asuinkelpoiseksi, joka otetaan huomioon hankkeen tässä vaiheessa erilaisin mahdollisuuksin. Rakennus on nykyisellään varustettu koneellisella poistoilmanvaihdolla, jota pyritään mahdollisuuksien mukaan hyödyntämään uudessa ilmanvaihtojärjestelmässä. Rakennuksessa on puukeskuslämmitys, jolla hoidetaan myös käyttöveden tuotanto. Kiinteistöön on tulossa lähitulevaisuudessa maalämmitys, jonka merkitys valintoihin otetaan huomioon.

### 6.1 Vaihtoehtoiset suunnitteluratkaisut kohteeseen

Tarkasteltavia suunnitteluratkaisuja kohteeseen ovat: tilanne, jolloin rakennusteknisiä muutoksia ei olla valmiita tekemään asetetun (S2) sisäilmastotason saavuttamiseksi taloudellisten seikkojen asettaessa rajoja ja tilanne, jolloin rakennusteknisiä muutoksia tai uudistuksia ollaan valmiita tekemään rajoitetusti asetetun sisäilmastotason saavuttamiseksi ainakin ilmastonoinnin osalta. Jokaisessa vaihtoehdossa tarkastellaan, miltä osin asetettu sisäilmastotavoite olisi saavutettavissa ottaen huomioon saavutetut hyödyt ja

niiden kustannustehokkuus hyötyjen toteuttamiseksi. Varsinaisesti ei oteta kantaa mikä olisi ainoa paras vaihtoehto, sillä se on erillisen hankesuunnittelun osa-alue. Absoluuttisesti ei asetettua sisäilmastotavoitetta kuitenkaan ole olemassa olevassa tilanteessa mahdollista saavuttaa, sillä sen saavuttaminen vaatisi paljon erilaisia muutoksia myös rakennuksen pintamateriaaleissa sekä valaistuksessa.

Toinen tarkasteltava osuus tämän jälkeen on se, että missä laajuudessa nykyisen ullakkotilan ilmanvaihdon tuleva tarve on järkevää ottaa huomioon. Tältä osin vaihtoehdot ovat: rakennukseen hankitaan ilmastointikone, joka tulee hoitamaan koko rakennuksen ilmanvaihdon; tai tässä vaiheessa hankitaan ilmastointikone, jolla hoidetaan vain alakerran ilmanvaihto. Tällöin yläkerros voitaisiin tulevaisuudessa käsitellä omana itsenäisenä osionaan.

#### 6.1.1 Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia ei tehdä

Tilanteessa, jossa rakennusteknisiin muutoksiin ei olla halukkaita, rajoittuu sisäilmaston taso pelkällä uudistetulla ilmastointijärjestelmällä saavutettavaan tasoon. Tällöin tarkasteltavana tekijänä on vain ilmanvaihdon lämmön talteenotolla (LTO) saavutettavat energiasäästöt.

#### 6.1.2 Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia tehdään

Tilanteessa, jossa rakennusteknisiä muutoksia ollaan valmiita tekemään paremman sisäilmaston saavuttamiseksi, tarkasteltavat tekijät rajoittunevat ikkunoiden uusintaan ja kesäaikaisen lämpötilan hallintaan. Aikaisemmin todetaankin ikkunoilla olevan suuri merkitys lämpötilan hallinnan kannalta etenkin kesäaikana, jolloin auringon säteilyteho rakennukseen on suuri. Toisaalta rakennusmateriaaleilla on suuri merkitys sisäilmaston laadulle, mutta varsinaista rakennusteknistä saneerausta ei ole järkevää pelkästään sen vuoksi tehdä.

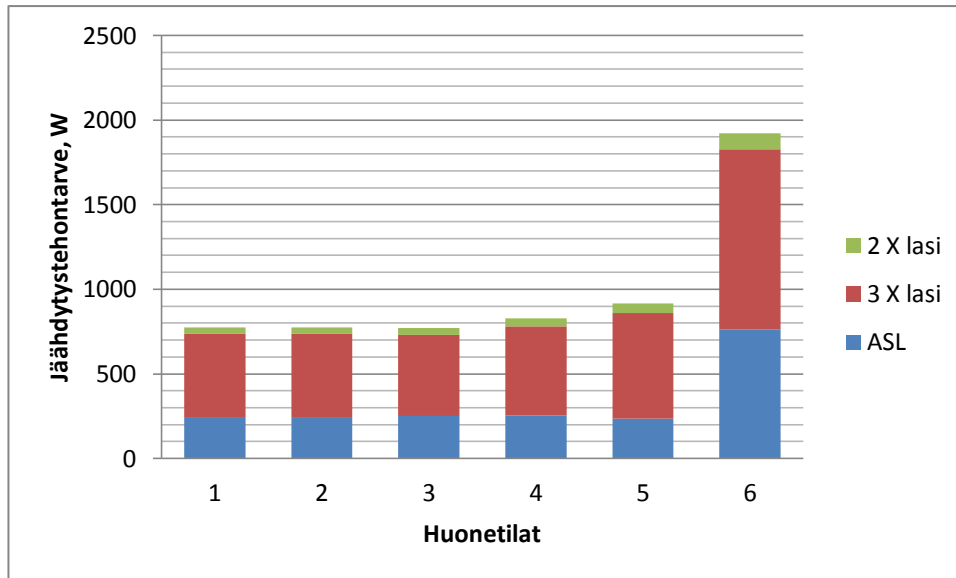
## 6.2 Kesäaikainen lämpötilan hallinta kohteessa

Jäähdytettävät tilat rajoittuvat tiloihin, joihin tuodaan normaalistikin tuloilmaa. Näitä ovat kohteessa makuuhuoneet ja olohuone. Sekoittavalla ilmanjaolla saatavan jäähdytystehon ollessa suhteellisen pieni 30–40 W/m<sup>2</sup> riippuen puhalluspaikasta (4, s. 150). Tämän vuoksi vuoksi luokan S2 mukaiseen sisälämpötilaan ei kesäaikana päästä ilman rakenteellisia muutoksia. Tässä tapauksessa tarvittaisiin auringonsuojalasien asentaminen vanhojen ikkunoiden tilalle. Tarvittavia jäähdytystehoja voidaan tarkastella taulukosta 11, jossa tulokset on koottu erilaisilla ikkunavaihtoehdoilla. Laskelmat on suoritettu IDA Room -ilmaislaskentaohjelmaa käyttäen. Huonelämpötilan asetusarvona on käytetty 25 °C:ta, jolloin operatiivinen lämpötila jää alle sallitun 27 °C:n. Jäähdytystehontarpeen laskentaa ei tässä sen enempää käsitellä, sillä se vaatisi jo erillisen insinöörityön aiheesta.

Taulukko 11. Tarvittavat jäähdytystehot huonetiloissa eri ikkunavaihtoehdoilla [W].

<b>Tila</b>	<b>2 X lasi</b>	<b>3 X lasi</b>	<b>ASL</b>
MH1	775	737	244
MH2	775	737	244
MH3	770	730	250
MH4	827	780	255
MH5	917	860	236
TUPA	1921	1827	763

Kaavio 2 havainnollistaa selkeästi auringonsuojalasin (Saint-Gobain COOL-LITE SS 114) tehokkaan suojausominaisuuden auringon lämpösäteilyä vastaan. Esimerkiksi auringonsuojalaseja käytettäessä verrattuna kolmi lasi-ikkunoihin on jäähdytystehontarve keskimäärin noin 30 prosenttia. Kaksi- ja kolmi lasi-ikkunoilla on vastaava suhde vain noin 5 prosenttia kolmilasisten eduksi.



Kaavio 2. Tarvittavat jäähdytystehot huonetiloissa eri ikkunavaihtoehdoilla graafisesti esitettynä [W].

Kaavion pylväät on numeroitu huonenumeroinnin mukaisesti (liite 6).

### 6.3 Rakennuksen nykyinen ilmanvaihto

Rakennuksen nykyinen ilmanvaihtojärjestelmä on koneellinen poistoilmanvaihto, joka kytketään pois käytöstä ulkolämpötilan alittaessa  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tällöin rakennukseen on oletettu muodostuvan painovoimainen ilmanvaihto hormivaikutuksesta. Hormivaikutuksen aiheuttama alipaine tulisijan ja piipun pään välillä on kaavan 14 mukaan noin 300 pascalia. Nykyinen poistoilmavirta on ollut noin 200 l/s. Tästä tulee rakennuksen ilmanvaihtuvuudeksi n. 1,37 1/h.

#### Järjestelmän energian kulutus

Nykyisen koneellisen poistoilmanvaihdon lämmitysenergian kulutusta voidaan karkeasti arvioida kuukausittaisten keskilämpötilojen perusteella puhaltimen käyntiaikana kaavalla 29 käyttäen vuotuista lämpötilan keskiarvoa (11, liite 1 taulukko 3).

$$\begin{aligned}
 Q_{iv} &= \Sigma H_{iv}(T_s - T_u)\Delta t/1000 & (29) \\
 &= 240 \text{ W/K} * (21-4,92)^\circ\text{C} * 7920 \text{ h}/1000 \\
 &\approx 30500 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_{iv} &= \rho_i * c_i * q_{v,\text{poisto}} * t_d * r * t_v * (1 - \eta_a) \\
 &= 1,2 \text{ kg/m}^3 * 1000 \text{ Ws/(kgK)} * 0,2 \text{ m}^3/\text{s} * 1 * 1 * 1 * (1-0) \\
 &= 240 \text{ W/K}
 \end{aligned}$$

$Q_{iv}$  on ilmanvaihdon lämmityksen tarvitsema energia [kWh]

$H_{iv}$  on ilmanvaihdon ominaislämpöhäviö [W/K]

on ilman tiheys [ $1,2 \text{ kg/m}^3$ ]

$c_{pi}$  on ilman ominaislämpökapasiteetti [ $1000 \text{ Ws/(kgK)}$ ]

$q_{v,\text{poisto}}$  on poistoilmavirta [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$t_d$  on ilmanvaihtolaitoksen keskimääräinen vuorokautinen käyntiaikasuhse [ $\text{h}/24\text{h}$ ]

$t_v$  on ilmanvaihtolaitoksen viikoittainen käyntiaikasuhse [ $\text{vrk}/7 \text{ vrk}$ ]

$r$  on muuntokerroin, joka ottaa huomioon ilmanvaihtolaitoksen vuorokautisen käyntiaajan

$T_s$  on sisäilman lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_u$  on ulkoilman lämpötila [ $^\circ\text{C}$ ]

$\Delta t$  on ajanjakson pituus [h]

1000 on kerroin, jolla suoritetaan laatumuunnos kilowattitunneiksi

$\eta_a$  on ilmanvaihdon poistoilman lämmöntalteenoton (LTO) vuosihyötysuhde tai keskimääräinen hyötysuhde laskentajaksolta

#### 6.4 Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia ei tehdä

Rakennuksen nykyiset ikkunat ovat kaksilasiset, joiden lämmöneristävyys on melko heikko. Vanhojen kaksilasisten ikkunoiden U-arvo on vain noin  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Vielä heikommin niistä on hyötyä rakennuksen kesänaikaisessa lämpötilanhallinnassa. Tällä on suuri merkitys tarvittavan jäähdytystehontarpeen syntymiseen. Tarvittavat jäähdytystehot huoneissa ovat niin suuret, että pelkällä jäähdyttävällä ilmastointijärjestelmällä ei päästä lähellekään tavoitteelliseen operatiivisen sisälämpötilan arvoon. Tällä ratkaisulla

saavutetaan rakennukseen parempi ilmanvaihdon energiatehokkuus sekä hyvä ilmanvaihtuvuus. Ilmanvaihtuvuudeksi muodostuisi suurimmillaan n. 1,25 1/h.

Ilmanvaihdon vuotuista energiankulutusta voidaan arvioida tällöin (kaava 29):

$$Q_{iv} = 125 \text{ W/K} * (21 - 3,72)^\circ\text{C} * 8760 \text{ h} / 1000$$

$$\approx 18900 \text{ kWh}$$

$$H_{iv} = 1,2 \text{ kg/m}^3 * 1000 \text{ Ws/(kgK)} * 0,185 \text{ m}^3/\text{s} * 1 * 1 * 1 * (1 - (0,6 * 0,75))$$

$$\approx 125 \text{ W/K}$$

Ilmanvaihtokoneen vuosihyötysuhde ( $n_a$ ) on  $0,6 * n_t$  kun muuta ei tunneta (11, s. 25).

$n_t$  on ilmanvaihto lämmöntalteenoto tuloilman lämpötilasuhde, kun tulo- ja poistoilmavirta ovat yhtä suuret

## 6.5 Tilanne, jossa rakennusteknisiä muutoksia tehdään

Kuten aikaisemmin todetaan, rajoittuu kyseinen vaihtoehto lähinnä siihen, että ikkunat uusittaisiin ilmanvaihdon lisäksi. Tästä voidaan kuitenkin erotella kaksi vaihtoehtoa: ikkunat uusitaan tavallisiksi kolmilasisiksi ikkunoiksi, joka ei palvele kesäaikaisen lämpötilan hallintaa käytännössä ollenkaan (kaavio 2) tai ikkunat uusitaan auringonsuojalaseiksi, jolloin kesäaikaisen lämpötilan hallinnan toteutuminen on mahdollista.

### 6.5.1 Ikkunoiden uusinta tavallisiksi kolmilasisiksi ikkunoiksi

Uusittaessa ikkunat nyky määräkset täyttäväksi ( $U = 1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ) kolmilasisiksi, palvelisi se lähinnä lämmitysenergian kulutusta vähentämällä sitä. Ikkuna pinta-ala koko rakennuksessa on n.  $24 \text{ m}^2$ , josta voidaan laskevikkunoiden kautta syntyvä lämpöhäviö mitoitussulkolämpötilassa kaavalla 30.



$$\phi_{joht} = \Sigma H_{joht} (T_s - T_{u,mit}) \quad (30)$$

$$\Sigma H_{joht} = \Sigma (U_{ikkuna} * A_{ikkuna})$$

$\Phi_{joht}$  on johtumislämmitysteho [W]

$\Sigma H_{joht}$  on rakennusosien yhteenlaskettu lämpöhäviö [W/K]

U on rakennusosan lämmönläpäisykerroin [W/(m<sup>2</sup>K)]

A on rakennusosan pinta-ala [m<sup>2</sup>]

T<sub>s</sub> on sisäilman lämpötila [°C]

T<sub>u,mit</sub> on mitoittava ulkoilman lämpötila [°C]

vanhojen 2 -lasisten ikkunoiden lämpöhäviöt:

$$(3\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) * 24\text{m}^2) * (21 - (-29))^\circ\text{C}$$

$$\approx 3600 \text{ W}$$

uusien 3 -lasisten ikkunoiden lämpöhäviöt:

$$(1\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) * 24\text{m}^2) * (21 - (-29))^\circ\text{C}$$

$$\approx 1185 \text{ W}$$

Näiden perusteella lämmitysenergian kulutusta voidaan karkeasti arvioida vuotuisen keskilämpötilan perusteella kaavalla 31.

$$Q_{joht} = \Sigma H_{joht} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (31)$$

Q<sub>joht</sub> on rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia [kWh]

vanhojen 2 -lasisten ikkunoiden läpi johtuva vuotuinen lämpöenergia:

$$(3\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) * 24\text{m}^2) * (21 - 3,72)^\circ\text{C} * 8760 \text{ h/v} / 1000$$

$$\approx 10900 \text{ kWh}$$

uusien 3 -lasisten ikkunoiden läpi johtuva vuotuinen lämpöenergia:

$$(1\text{W}/(\text{m}^2\text{K}) * 24\text{m}^2) * (21 - 3,72)^\circ\text{C} * 8760 \text{ h/v} / 1000$$

$$\approx 3635 \text{ kWh}$$

Ikkunoiden uusinnan taloudellista kannattavuutta voidaan arvioida korottoman takaisinmaksuajan perusteella, kaava 32:

$$TMA = \frac{\text{hankintakustannus}}{\text{vuotuinen säästö}} = \frac{\text{€}}{\text{€/v}} = n \text{ vuotta} \quad (32)$$

Lämmitysenergian hinta voidaan laskea tilanteessa, jossa rakennus lämmitetään maalämmöllä. Tällöin energian hinta muodostuu lämpöpumpun sähkönkulutuksesta. Maalämpöpumpun lämpökerroin on keskimäärin n. 3, eli tarvittavan lämpöenergian määrästä noin kolmannes tarvitaan sen tuottamiseen sähköenergialla. Sähköenergian hintana käytetään lukua 12,37 c/kWh, joka sisältää siirron ja sähköveron (Lahti Energia yleissähkö 12.5.2012).

vuotuinen säästö

$$(10900 - 3635) \text{ kWh/v} * 0,1237 \text{ €/kWh} \approx 900 \text{ €/v}$$

Meidän Talo -lehti 16.6.2010 kertoo ikkunanvaihdosta seuraavaa:

Keskikokoisen pientalon yhden ikkuna hinta vaihtelee noin 400 – 600 euron välillä. Vaihtotyö lisää hintaa noin 200–350 euroa ikkuna-aukolta.

Tästä voitaneen ainakin suuntaa antavasti päätellä ikkunoiden uusimisen hintahaarukkaa. Tarkka arvio edellyttäisi tarjouspyyntöjä asennusyryyksiltä. Hintoihin vaikuttaa voimakkaasti kulloinkin alalla vallitseva työtilanne. Kotitalouksilla verovähennysoikeus työn osuudesta on 45 % vuonna 2012, kuitenkin enintään 2 ,000 €. Puolisot voivat saada yhteensä 4 ,000 €.

$$TMA = \frac{13*(500+(0,55*275))\text{€}}{900\text{€/v}}$$

≈ 9,5 vuotta

### 6.5.2 Ikkunoiden uusinta auringonsuojalaseiksi

Auringonsuojalasienn hinnan ollessa noin nelinkertainen tavallisiin kirkaslasi-ikkunoihin nähden tulee niiden taloudellinen kannattavuus kyseenalaiseksi. Asentamalla kohteeseen kyseiset lasit saadaan kesänaikaiset lämpötilat hallittua jäähdyttävällä ilmanvaihdolla. Kyseisillä lasilla lämmöneristävyys on yhtä hyvä kuin kirkkailla kolmilasisilla ikkunoilla, joten talviaikainen energiansäästö on samaa luokkaa kuin edellä on esitetty. Tällöin:

$$TMA = \frac{13 \cdot (2000 + (0,55 \cdot 275)) \text{€}}{900 \text{€}/v}$$

≈ 31 vuotta

Lähdetiedon mukaan puu-alumiini-ikkunan elinkaari on noin 60 vuotta huolto- ja kunnossapitajaksojen ollessa sopivat (12, s. 7). Täten voidaan olettaa ikkunoiden maksavan itsensä takaisin noin puolivälissä elinkaartaan.

## 6.6 Ilmanvaihdon palvelualueet

Aikaisemmin on puhuttu siitä, että rakennuksen ullakkokerros on tarkoitus tulevaisuudessa saneerata asuintiloiksi. Täten tulisi tarkastella ilmanvaihdolle asetettavia palvelualueita.

Vaihtoehtojen vertailu perustuu kahden eri kyseeseen tulevan konevalinnan tuloksiin. Tulokset liitteessä 7.

### 6.6.1 Alakerran ilmanvaihto omalla koneella

Tässä vaihtoehdossa konesijoitus olisi vintttilassa. Saavutettava kanavistopaine riittäväällä jäähdytystehon aikaansaavilla ilmavirroilla jää melko alhaiseksi, joskin ovat tilanteeseen nähden kuitenkin täysin realistisesti saavutettavissa sopivalla kanavistomitoituksella. Tällöin kuitenkin tuloilman suodatusluokka jää F5:een. F5 -suodatusluokka on hienosuodatusluokista alhaisin. Se suodattaa 40 % yli 0,4 mikrometrin kokoisista hiukkasista (13). Laitteen (Enervent Pelican eco EDX-E) hinta on ≈ 8 ,500 euroa (alv. 0 %).

### 6.6.2 Ala- ja vinttikerros samalla koneella

Tässä vaihtoehdossa konesijoitus olisi vinttitilassa. Saavutettava kanavistopaine riittävästi jäähdytystehon aikaansaavilla ilmavirroilla on kanavistosuunnittelua varten erittäinkin varman päälle. Tällöin tuloilman suodatusluokka voitaisiin nostaa F7:ään. F7-suodatusluokka on hienosuodatusluokista keskimmäisin. Se suodattaa 80 % yli 0,4 mikrometrin kokoisista hiukkasista, joten ero luokkaan F5 on merkittävä (13). Lisäksi tässä laitteistossa ei ole lämpöpumpulle erillistä ulos asennettavaa lauhdutinta. Epävarmuustekijänä laitevalinnassa on, onko rakennuksesta saatavissa laitteessa tarvittavaa 400V/50Hz -3-vaihevirtaa. Laitteen (Enervent Pegasos eco Greenair HP) hinta on  $\approx 14\,000$  euroa (alv. 0%).

### 6.7 Vaihtoehtojen vertailu

Kohteen ikkunoiden ollessa jo likimain elinkaarensa päässä tulisi niiden uusinta joka tapauksessa pian ajankohtaiseksi. Täten ikkunoiden uusimatta jättäminen ei ainakaan ole ollenkaan perusteltua. Toisaalta tavoiteltaessa kesänaikaista lämpötilanhallintaa jäähdyttävällä ilmanvaihdolla tulisi auringonsuojalasi-ikkunoiden hankinnasta taloudellisesti erittäin raskas ja kannattamatonkin vaihtoehto takaisinmaksuajan ollessa 31 vuotta.

Kesänaikaisen lämpötilan hallinnan aikaansaamiseksi rakennukseen auringosuojalasi sijasta voisi olla hyvä vaihtoehto tutkia mahdollisuutta lisjäähdytykselle kompressorijäähdytin sovelteisella kiertoilmakoneistolla, jolla kiertoilmaa tuotaisiin omassa kanavistossaan lisjäähdytettäviin tiloihin. Tätä sovellusta voitaisiin käyttää lähinnä makuuhuoneissa niiden ollessa lähekkäin toisiinsa nähden ja olohuoneeseen voitaisiin asentaa ilmalämpöpumppu länsiseinän ikkunan yläpuolelle. Sijoitus olisi optimaalisin vetohaittojen estämiseksi lämmitys- ja jäähdytyskaudella (katso 4.2.1).

Ilmanvaihdon palvelualueääritysten osalta vertailujen perusteella näyttäisi olevan perusteltua hankkia yksi isompi, koko rakennusta palveleva ilmanvaihtokone, jos tarvittavat sähkötekniset vaatimukset täyttyvät. Kertahankintahinta on suurempi kuin yhdessä pienemmässä, mutta ryhdyttäessä toteuttamaan vintin ilmanvaihtohanketta, maksaa

vaihtoehto itsensä takaisin. Lisäksi saavutettavat tekniset ominaisuudet ovat paremmat (suodatus, paineenkorotus, ääniominaisuudet, tilantarve, energiatehokkuus).

## **7 Yhteenveto**

### 7.1 Tutkimusosuus

Tässä insinööriyössä tutkittiin erilaisia yleispäteviä fysikaalisia tekijöitä, joita ilmanvaihtosuunnittelussa tulisi tuntea. Näitä tekijöitä olivat ilmanvaihdon virtaustekniikka, ilmanjaon muodostuminen ja äänen syntyminen ilmanvaihtolaitoksissa. Näiden lisäksi tutkittiin yleisellä tasolla sisäilmaston vaikutuksia henkilöiden viihtyvyyteen ja terveyteen.

Työssä esitettiin erilaisia havainnollistavia kuvioita ja taulukoita, joista voitiin havainnollistaa helposti erilaisten asioiden vaikutussuhteita. Lisäksi esiteltiin erilaisia laskenta-kaavoja, joista voitiin päätellä ja havainnoida erilaisten muuttujien keskinäisiä riippuvuussuhteita.

Tutkimuksen avulla saatiin kasaan suppea teos ilmavaihdon suunnitteluperusteista, sekä tarkennettua ja selvitettyä syvällisemmin tutkintokoulutuksessa opiskeltuja asioita. Toki opittiin myös paljon uutta asiaa ja saatiin uutta rutiinia ilmanvaihtosuunnittelun perusteiden hallintaan.

### 7.2 Esimerkkikohteen osuus

Lisäksi insinööriyössä tutkittiin ja kartoitettiin eri vaihtoehtoja sekä tehtiin pohjatyötä esimerkkikohteen ilmanvaihdon perusparannuksen hankesuunnittelua varten. Siinä selvitettiin mahdollisuudet saavuttaa asetettu sisäilmaston taso ilmanvaihtoteknisestä näkökulmasta, joka oli taloudellisesti melko raskas vaihtoehto.

Lisäksi esiteltiin kaksi taloudellisesti kevyempää vaihtoehtoa, joilla kesänäikaista lämpötilanhallintaa ei saada aikaan mutta kuitenkin todettiin saavutettavan merkittäviä säästöjä lämmitysenergian kulutuksessa.

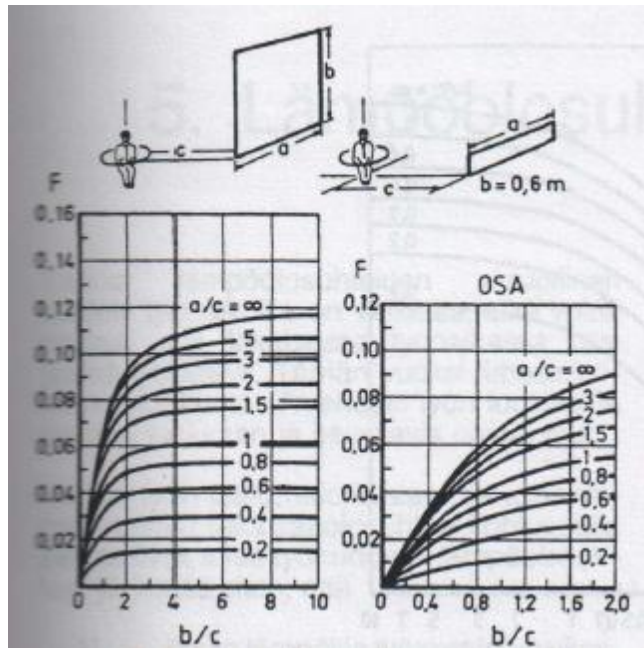
Lopuksi pohdittiin vaihtoehtoa, jota kannattaisi hankesuunnittelussa selvittää. Tässä vaihtoehdossa olisi mahdollisuudet aikaansaada kesäaikainen lämpötilanhallinta taloudellisesti paljon kannattavammin kuin hankkimalla auringonsuojalasit.

Näiltä osin saatiin kasaan hyvät edellytykset perusteelliselle ilmanvaihdon peruseräparannuksen hankesuunnittelulle.

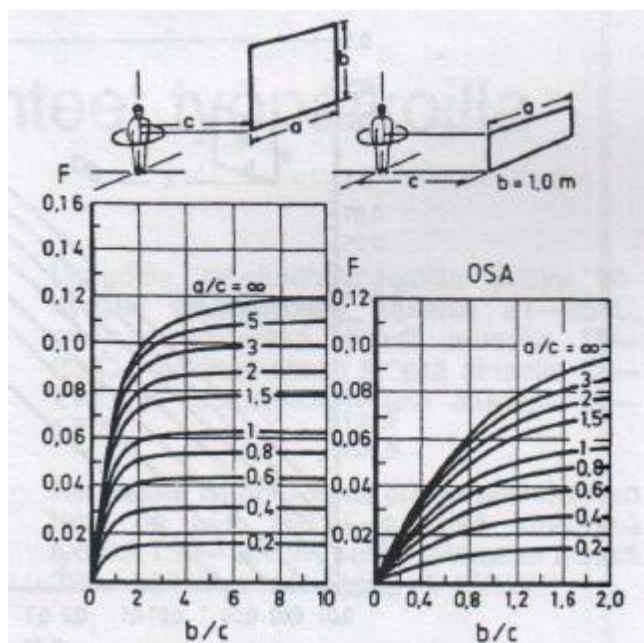
## Lähteet

- 1 Seppänen, Olli. Seppänen, Matti. 1996. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-tekniikka. Espoo: Sisäilmätieto Oy.
- 2 Harju, Pentti. Matilainen, Veijo. 2001. LVI-tekniikka, Korjausrakentaminen. Helsinki: Opetushallitus, Suomen LVI-liitto.
- 3 LVI 05-10417 -ohjekortti. 2007. Rakennusten sisäilmaston suunnitteluperusteet. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto ry.
- 4 Seppänen, Olli. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
- 5 Seppänen, Olli. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki: Suomen LVI-yhdistysten Liitto.
- 6 RT07-10564 -ohjekortti. 1995. Rakennuksen sisäilmasto. Rakennustietosäätiö.
- 7 LVI 73-40016 -ohjekortti. 1991. Auringon säteilykuorman pienentämismahdollisuudet rakennuksissa. Rakennustietosäätiö.
- 8 LVI 30-10333 -ohjekortti. 2002. Ilmanvaihtolaitteiden äänitekniinen suunnittelu ja äänenvaimennus rakennuksissa. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto.
- 9 Puhallintekniinen käsikirja 2007. Fläkt Woods Oy.
- 10 Halme, Alpo. Seppänen, Olli. 2002. Ilmastoinnin äänitekniikka. Helsinki: Suomen LVI-liitto.
- 11 Ympäristöministeriö. 2007. SRMK D5: Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta.
- 12 Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajakset. 2008. Rakennustietosäätiö RTS ja LVI-Keskusliitto.
- 13 Rakennusten suodattimet. 2012. Verkkodokumentti. Hengityслиitto.  
<<http://www.heli.fi/Hengitysilma/Sisailma/Rakennusten-suodattimet>>  
Luettu 17.5.2012

## Keskimääräiset näkyvyyserkertoimet

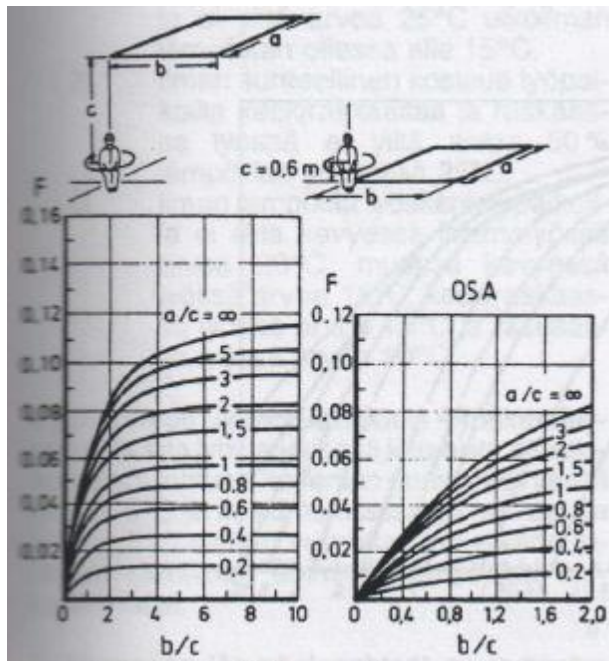


Kuvio 1. Näkyvyyserroin istuvan henkilön ja pystypinnan välillä (5, s. 15).

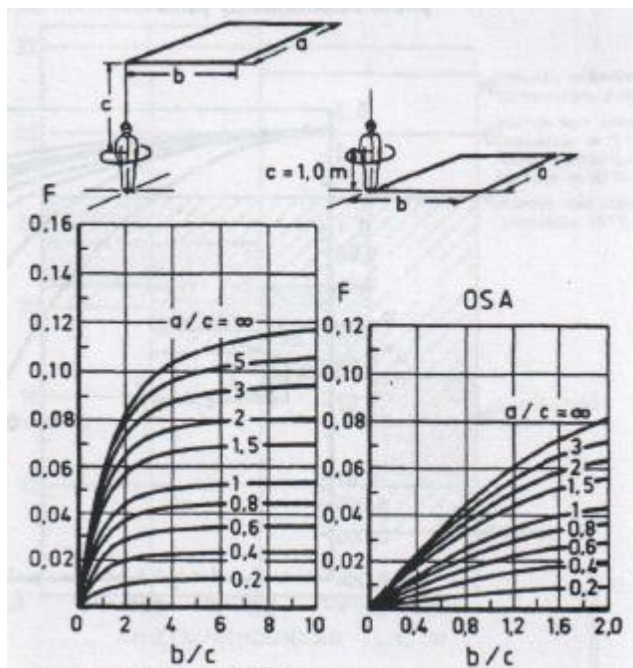


Kuvio 2. Näkyvyyserroin seisovan henkilön ja pystypinnan välillä (5, s. 15).



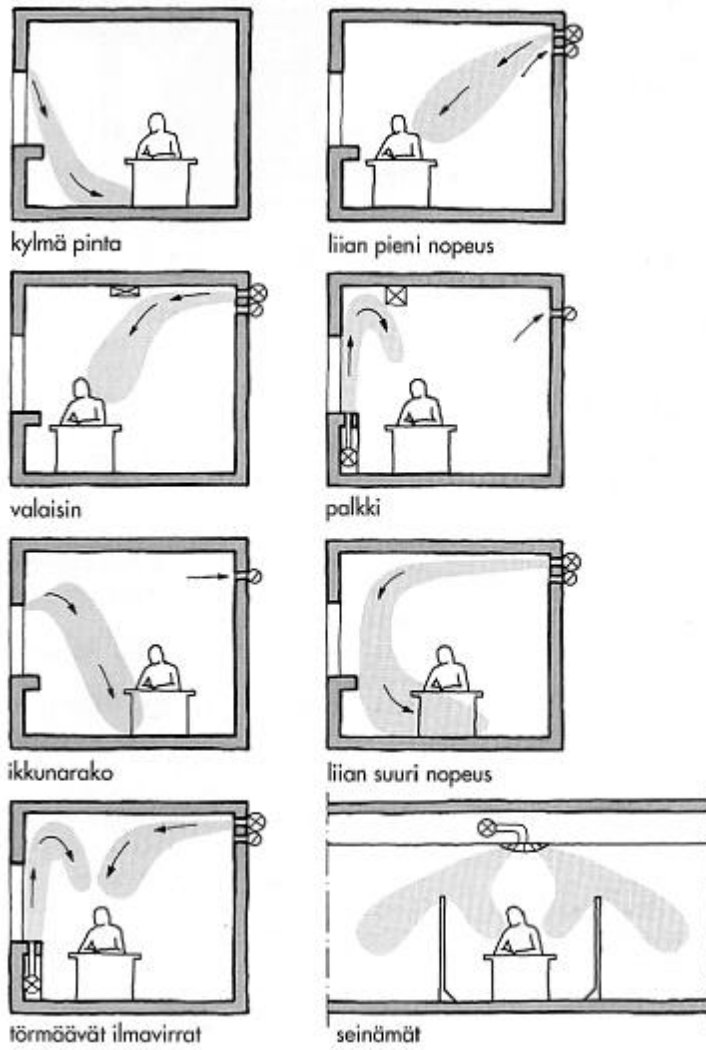


Kuvio 3. Näkyvyyskerroin istuvan henkilön ja vaakapinnan välillä (5, s. 15).



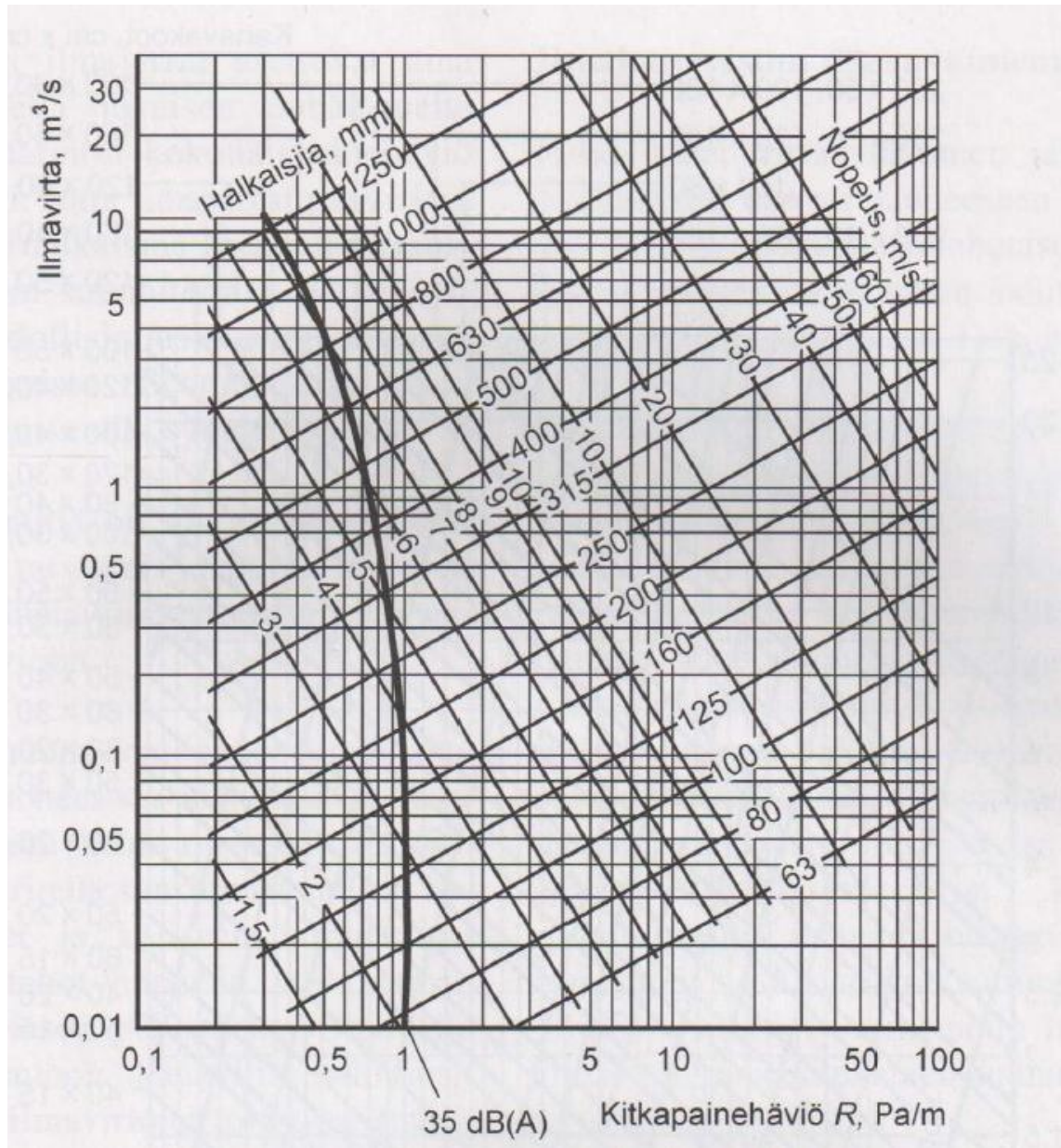
Kuvio 4. Näkyvyyskerroin seisovan henkilön ja vaakapinnan välillä (5, s. 15).

## Kääntyvät ilmavirrat



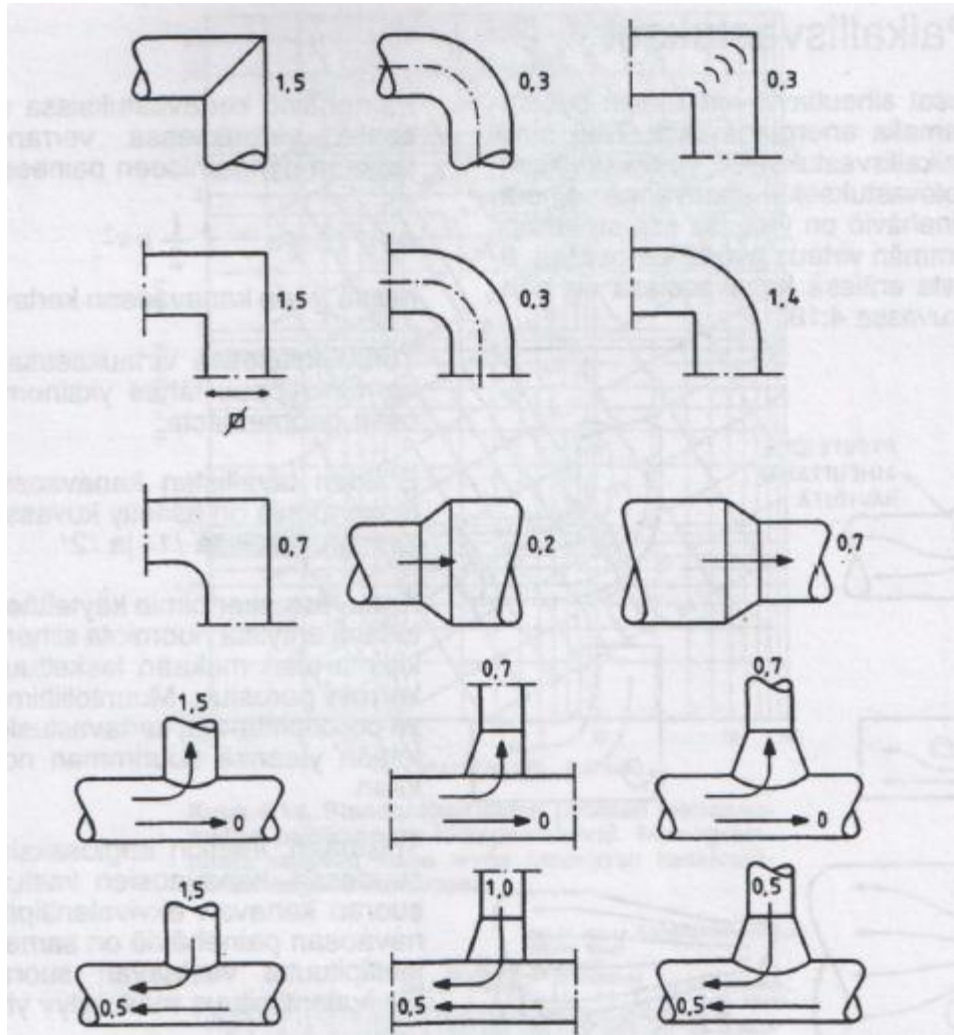
Kuvio 1. Tilanteita, joissa ilmavirtaus tai ilmanjako voi aiheuttaa vetoa (6, s.5).

### Kanava nomogrammit



Kuvio 1. Pyöreän kanavan painehäviökäyrästä ja mitoitusuusitus. Suositus paksummalla viivalla. (4, s. 117.)

### Kanavaosien kertavastuksia

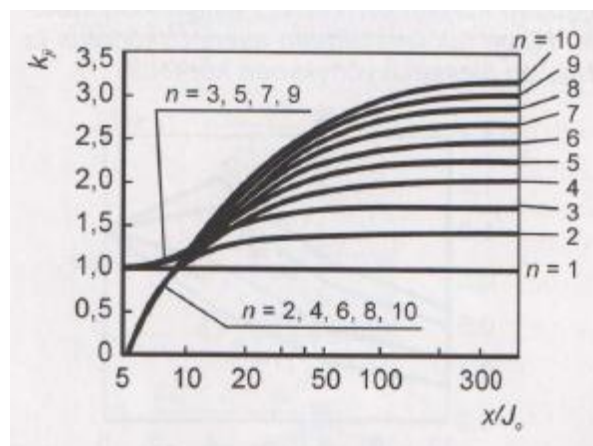


Kuvio 1. Tavallisten kanavaosien likimääräisiä kertavastuskertoimia (5, s.100).

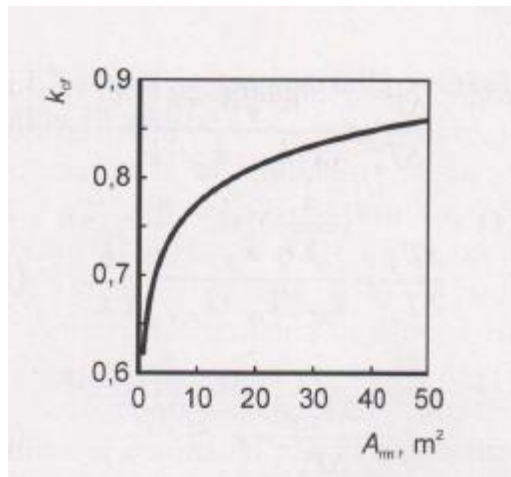
## Ilmasuihkun laskennan parametreja.

Kuvio 2. Tuloilmalaitteiden heittopituuskertoimia (4, s. 145).

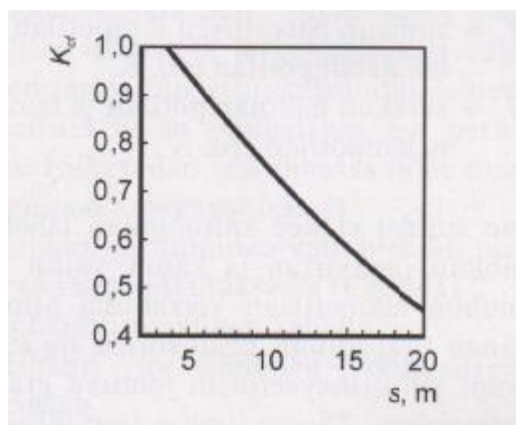
Hajottaja- tyyppi	Suihku- tyyppi	Heittopituus- kerroin, m
Säleikkö	Tasomainen	3,5 - 5
Rakohajottaja	Tasomainen	2,5 - 4
Rei`itetty hajottaja	Radiaalinen	2 - 3
Monisuutinhajottaja	Radiaalinen	1 - 2,5
Kartiohajottaja	Kartiomainen	2 - 3
Pyörrevirtahajottaja	Kartiomainen	1 - 2
Suutin	Aksiaalinen	4 - 6



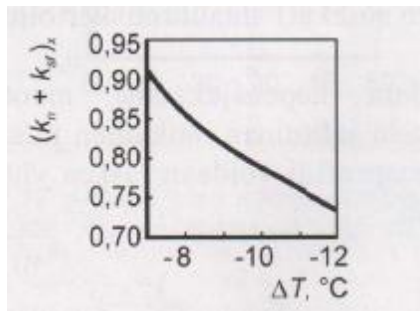
Kuvio 1. Lähekkäisten suihkujen yhteisvaikutus tuloilmalaitteiden keskikohdassa olevaan nopeuteen.  $X$  on kohtisuora etäisyys tuloilmalaitteesta ja  $J_0$  on tuloilmalaitteiden keskinäinen etäisyys. (4, s.144.)



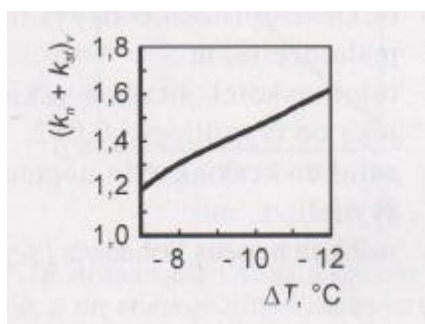
Kuvio 2. Ahtaan tilan korjauskerroin kartiosuihkulle.  $A_m$  on huoneala yhtä suihkua kohden. (4, s.145.)



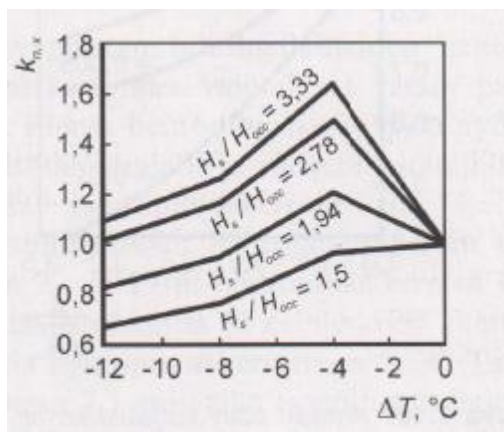
Kuvio 3. Ahtaan tilan korjauskerroin tasosuihkulle.  $S$  on suihkun radan etäisyys tuloilmalaitteesta. (4, s.145.)



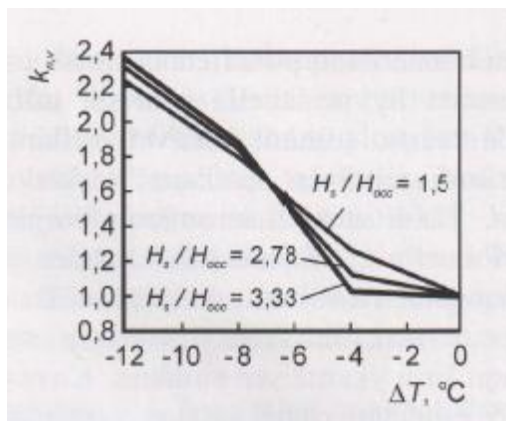
Kuvio 4. Horisontaalisen etenemisen korjauskerroin kiinnittyneellä alilämpoisellä suihkulla.  $\Delta T$  on tulo- ja huoneilman lämpötilaero. (4, s.143.)



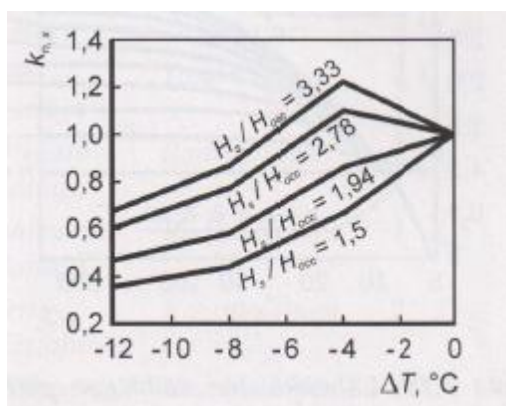
Kuvio 5. Liikeratanopeuden korjauskerroin kiinnittyneellä alilämpoisellä suihkulla eri liikeradan pisteissä (4, s.143).



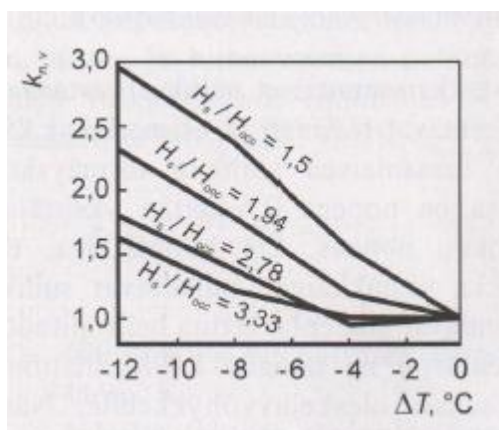
Kuvio 6. Horisontaalisen etenemisen korjauskerroin alilämpoisellä radiaalisuihkulla.  $H_s$  on tuolimalaitteen asennuskorkeus ja  $H_{occ}$  on oleskeluvyöhykkeen korkeus. (4, s.143.)



Kuvio 7. Ratanopeuden korjauskertoim alilämpöisellä tasosuuhkulla.  $H_s$  on tuloilmalaitteen asennuskorkeus ja  $H_{occ}$  on oleskeluvyöhykkeen korkeus. (4, s.143.)



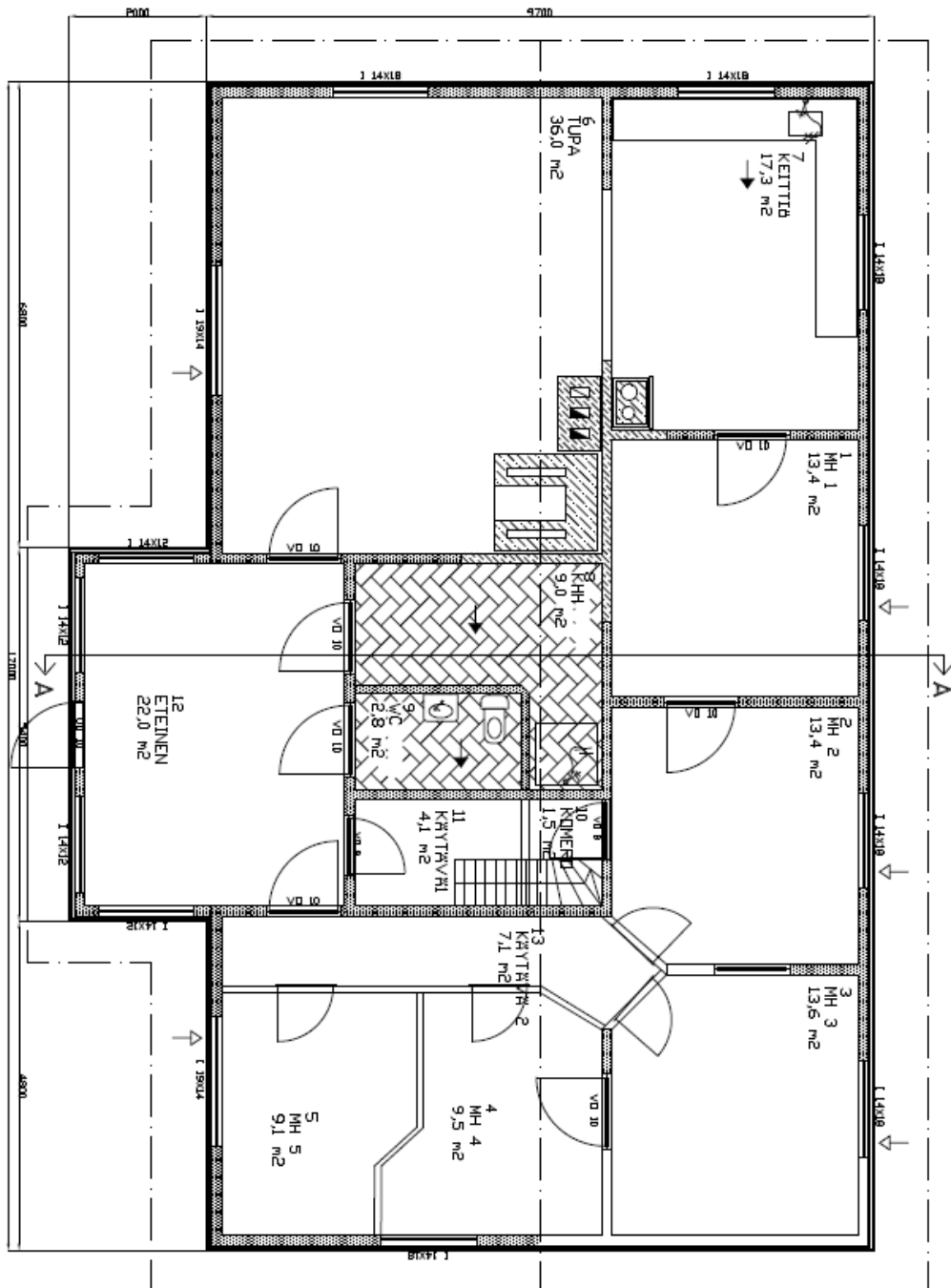
Kuvio 8. Horisontaalisen etenemisen korjauskertoim alilämpöisellä aksiaalisuuhkulla.  $H_s$  on tuloilmalaitteen asennuskorkeus ja  $H_{occ}$  on oleskeluvyöhykkeen korkeus. (4, s.143.)



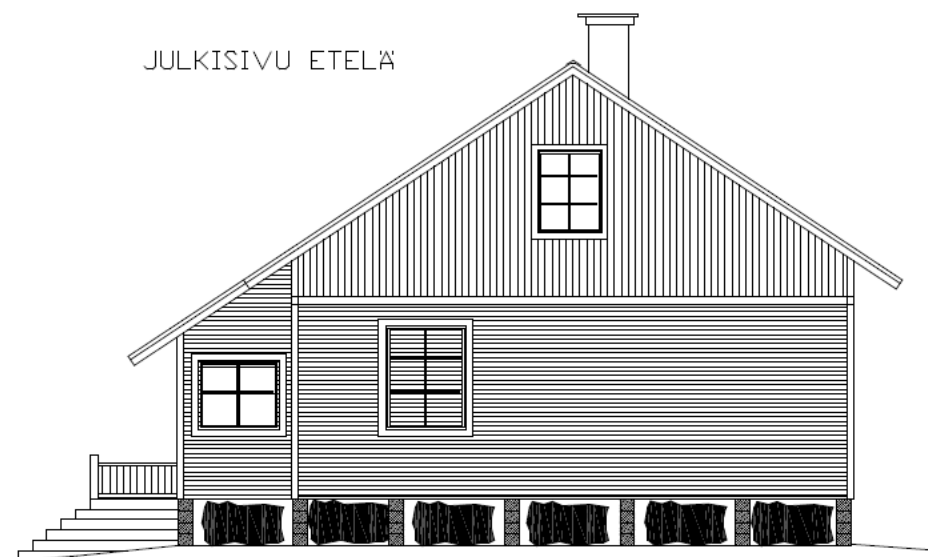
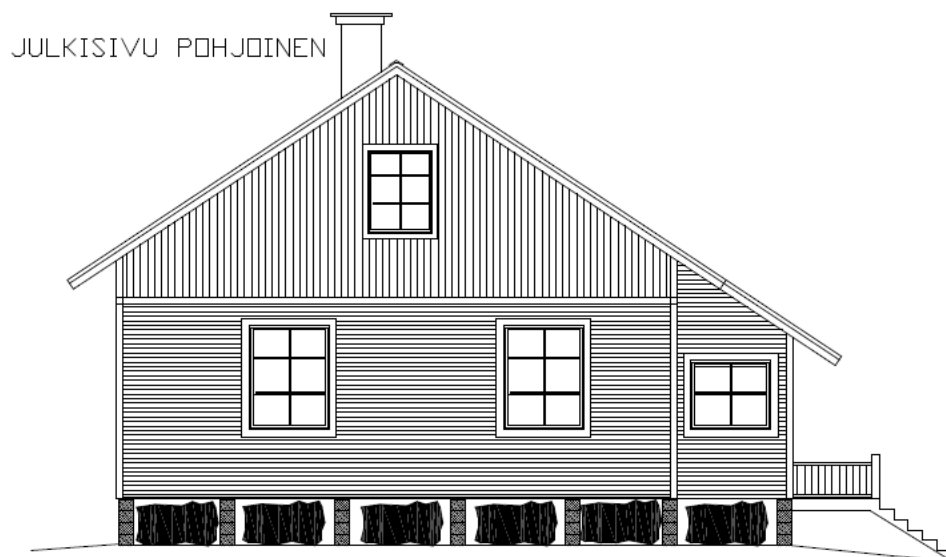
Kuvio 9. Ratanopeuden korjauskertoim alilämpöisellä aksiaalisuuhkulla.  $H_s$  on tuloilmalaitteen asennuskorkeus ja  $H_{occ}$  on oleskeluvyöhykkeen korkeus. (4, s.143)



### Esimerkkirakennuksen pohja ja julkisivut.

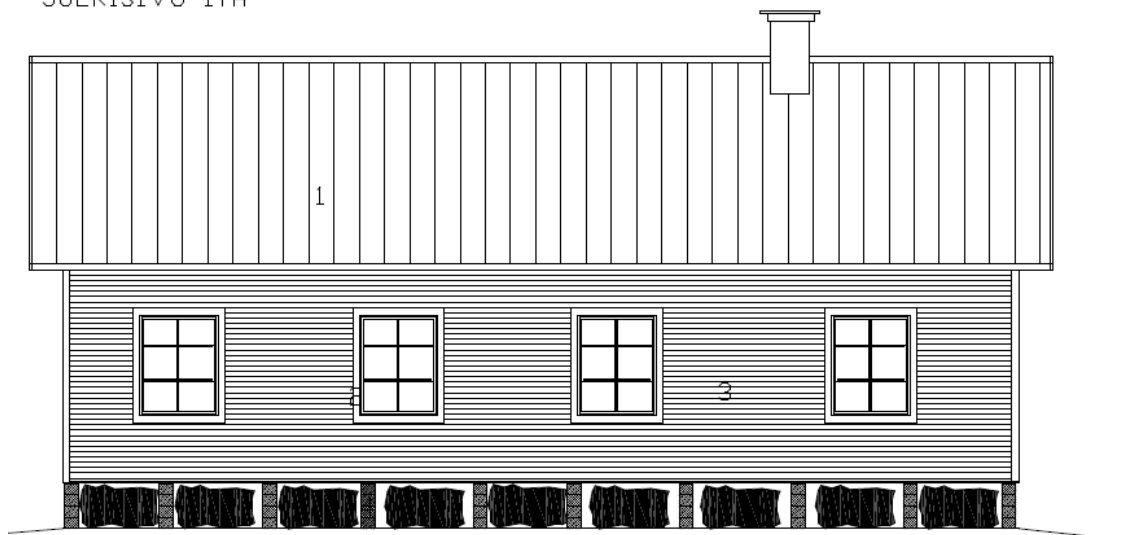


Kuvio 1. Rakennuksen pohjapiirustus (ei mittakaavassa).



Kuvio 2. Rakennuksen pohjois- ja etelä julkisivu (ei mittakaavassa).

JULKISIVU ITÄ



JULKISIVU LÄNSI



Kuvio 3. Rakennuksen itä- ja länsi julkisivu (ei mittakaavassa)

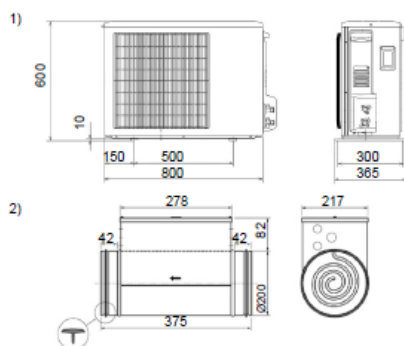
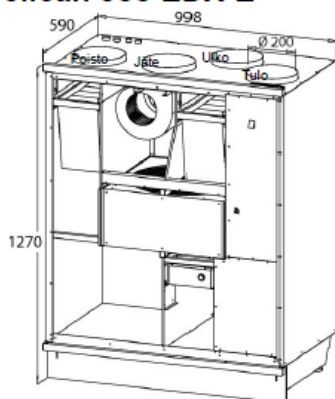
## Vertailut ilmanvaihtokoneet.

### enervent® Energy Optimizer

Kohde: Talo esimerkki  
Käsittelijä: Jouni Vallinen

Sivu 1  
17.05.2012

#### Pelican eco EDX-E



Huomi! Patterit asennetaan tulolimakanaan. Patterin saa asentaa myös pystyyn.

Laitetiedot: Pelican eco EDX-E	
Kanavalähdöt	Ø 200 mm
Leveys	998 mm
Korkeus	1270 mm
Syvyys	590 mm
Paino	125 kg
Puhaltimen teho	170 W
1) EDX: Ulkoyksikkö (paino: 45 kg)	
2) EDX: E - Sähkölämmityspatteri (kanava-asenteinen)	
EDX: CX - Suorahöyrysteinen (sisäinen)	
Asennus lämpimään tilaan	
Tuotenumero	P05 111 0011
LVI-numero	7935597
Sähköliedot: 230 V/50 Hz, 1~, 10 A; E: 230 V/50 Hz, 1~, 10 A; EDX: 230 V/50 Hz, 1~, 16 A (COMP 1 & 2); EDX: 230 V/50 Hz, 1~, 20 A (COMP 3 & 4)	

Mitoitusarvot:	Tulo	Poisto
Ilmavirta:	165 l/s	180 l/s
Kanavapaine:	95 Pa	115 Pa
Suodatustaso:	F5	F5

Tulokset:	Tulo:	Poisto:
<b>Mitoituspisteessä:</b>		
Puhallinnopeus:	99 %	94 %
Ilmavirta:	165 l/s	180 l/s
Kanavapaine:	95 Pa	115 Pa
Ottoteho:	173 W	168 W
SFP:	1,89 kW/(m3/s)	

<b>Huipputeho:</b>		
Ilmavirta:	166 l/s	186 l/s
Kanavapaine:	97 Pa	122 Pa
Tehostusvara:	1 %	3 %

<b>Otsapintanopeuksia:</b>		
Kanavalähtö (Ø200 mm):	5,25 m/s	5,73 m/s
LTO (Ø465 mm):	1,98 m/s	2,16 m/s

<b>Patterit:</b>		
Lämmityspatteri: Sähkö EDX-E Ø200mm kanava-asenteinen		
Otsapintanopeus:	5,25 m/s	
Painehäviö:	6 Pa	
Jäähdytyspatteri: Suorahöyrysteinen 200 x 375 mm sisäinen		
Otsapintanopeus:	2,20 m/s	
Painehäviö:	45 Pa	

<b>Pyörivä lämmönsiirrin:</b>		
Painehäviö:	89 Pa	98 Pa
Hyötysuhde mitoitusasteessa:	78,8 %	
Tuloilma jälkeen LTO:n:	10,4 °C	
Jälkilämmitystarve mitoituslämpötilassa:	1725 W	

<b>Vuosilaskenta: Helsinki, Suomi (ilman lämpöpumppua)</b>	
Poistoilmasta talteenotettu lämpöenergia:	20660 kWh
Mitoituslämpötila:	-29 °C
Vuotuinen jälkilämmitystarve:	2642 kWh
Tuloilman tavoitelämpötila:	19 °C
Lämpökerroin:	1 kWh sähköä = 7,1 kWh lämpöä
<b>Vuosihyötysuhde: Moniste 122:n mukaisesti</b>	<b>72,1 %</b>

<b>Äänit:</b>										
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	dB	dB(A)
Tila	66	57	52	48	46	41	31	30	67,2	51,2
Tila: 10 m2 absorptio LpA:										47,2
Tulo	61	64	64	67	66	65	56	48	72,6	70,4
Poisto	57	57	49	53	44	40	33	23	61,5	52,1
Ulko	58	56	56	56	44	41	34	24	63,2	55,1
Jäte	64	66	67	67	66	67	62	55	74,5	72,1

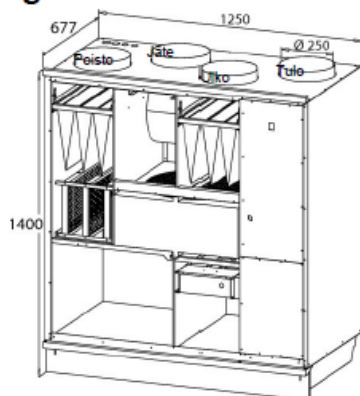
Yllä mainitut arvot koskevat ilmanvaihtolaitetta, ei ilmanvaihtojärjestelmää.

## enervent® Energy Optimizer

Kohde: Talon esimerkki  
Käsittelijä: Jouni Vallinen

Sivu 1  
17.05.2012

### Pegasos eco Greenair HP



Laitetiedot: Pegasos eco Greenair HP	
Kanavalähdöt	Ø 250 mm
Leveys	1250 mm
Korkeus	1400 mm
Syvyys	677 mm
Paino	203 kg
Puhaltimen teho	565 W
Pyörivä lämmönsiirrin	
Greenair HP -lämpöpumppu	
Greenair HP -lämpöpumppu	
Asennus lämpimään tilaan	
Tuotenumero	P06 012 0002
Sähkö tiedot: 400 V/50 Hz, 3-vaihe, sulakkeet 3 x 16 A hidas	

Äänet: (ilman lämpöpumppua)										
	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	dB	dB(A)
Tulo	58	65	65	63	46	40	47	43	69,5	62,0
Poisto	55	57	53	50	46	39	31	24	60,6	51,4
Ulko	53	56	57	54	48	42	36	29	61,7	54,7
Jäte	61	66	66	69	69	66	63	57	75,1	73,2

Mitoitusarvot:	Tulo	Poisto
Ilmavirta:	290 l/s	320 l/s
Kanavapaine:	95 Pa	115 Pa
Suodatustaso:	F5	F5

Tulokset:	Tulo:	Poisto:
<b>Mitoituspisteessä:</b>		
Puhallinnopeus:	69 %	73 %
Ilmavirta:	290 l/s	320 l/s
Kanavapaine:	95 Pa	115 Pa
Ottoteho:	249 W	314 W
<b>SFP:</b>	<b>1,76 kW/(m3/s)</b>	
<b>Huipputeho:</b>		
Ilmavirta:	367 l/s	382 l/s
Kanavapaine:	153 Pa	164 Pa
Tehostusvara:	27 %	19 %

Otsapintanopeuksia:		
Kanavalähtö (Ø250 mm):	5,91 m/s	6,52 m/s
Mitoituslämpötila:	-29 °C	
LTO (Ø520 mm):	2,86 m/s	3,15 m/s
Tuloilman tavoitelämpötila:	19 °C	

**Greenair HP:**  
Pegasos eco Greenair HP:n tarkempia teknisiä tietoja löytyy tuotevalintasivulta ja Enerventin myynnistä.  
Yllä mainitut arvot koskevat ilmanvaihtolaitetta, ei ilmanvaihtojärjestelmää.