



**ILMANVAIHDON TEHOSTUS ON/OFF-PELLEIN JA TEHOSTUSTILANTEIDEN
VAIKUTUS KANAVISTON TASAPAINOTUKSEEN**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Tekijä VILLE RATILAINEN

Tarkastajat: DOSENTTI AHTI JAATINEN-VÄRRI

DI VALLE RAATIKAINEN

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Ville Ratilainen

Ilmanvaihdon tehostus on/off-pellein ja tehostustilanteiden vaikutus kanaviston tasapainotukseen

Diplomityö 2023

71 sivua, 43 kuvaa, 9 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Dosentti Ahti Jaatinen-Värri ja DI Valle Raatikainen

Avainsanat: ilmanvaihto, on/off-pelti, talotekniikka

Diplomityön tavoitteena oli tutkia kuinka ilmanvaihtokanaviston tasapainotus käyttäytyy eri käyttötilanteissa, kun ilmanvaihdon tehostus on toteutettu on/off- pellein. Näiden tulosten perusteella tavoitteena oli löytää kanavistovariaatioiden välillä toimivat ja ei toimivat toteutusratkaisut.

Työssä simuloitiin MagiCad-ohjelmistolla viiden eri huoneen välissä olevaa ilmanvaihtokanavistoa kuudella eri tavalla kanavistovariaatiolla toteutettuna ja jokaista kanavistovariaatiota simuloitiin seitsemällä erilaisella tehostustilanne variaatiolla. Tuloksissa vertailtiin haluttujen ilmavirtojen pysyvyyttä ja kanavistopaineiden käyttäytymistä, joiden perusteella tulkittiin kanavistovariaation toimivuus. Tuloksista tulkittiin myös painesäätöisen järjestelmän paineenmittauksen sijaintia kammiopainemittauksen ja kanavapainemittauksen välillä ja näiden vaikutusta tuloksiin.

Runkokanavistolla toteutetut järjestelmät tarvitsevat pääsääntöisesti jonkin aktiivisen säätölaitteen jokaiseen kanavahaaraan toimiakseen luotettavasti, kuten vakiopainepellin tai vakiovirtaussäätimen. Pelkkiä on/off-peltejä voi käyttää, jos kaikki kanavahaarat liitetään kammioon asti. Paineenmittaus toimii luotettavimmin pääsääntöisesti runkokanavistossa kanaviston loppupäässä, riippuen kanavistovariaatiosta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Ville Ratilainen

Ventilation enhancement with on/off-dampers and its effects on balancing of the ventilation system

Master's thesis 2023

71 pages, 43 figures, 9 tables and 1 appendices

Examiners: Docent Ahti Jaatinen-Värri and M.Sc Valle Raatikainen

Keywords: ventilation, on/off-damper, hvac

The aim of this thesis was to study how the balancing of the ventilation ductwork behaves in different operating situations when the ventilation enhancement has been implemented with on/off-damper. The goal was to find which ductwork variation is the most efficient solution and which does'nt work at all.

In this thesis was studied the ventilation ductwork between five different rooms which was simulated with MagiCad software. In this study there was six different ductwork variations, and each ductwork variation was simulated with seven different ventilation enhancement situations. The results were compared to the persistence of the simulated air flows and the behaviour of airpressures, based on which the functionality of the ductwork was interpreted. The results also interpreted the location of the pressure measurement of the pressure-controlled system between the chamber pressure measurement and the duct pressure measurement and the effect between these on the results.

Systems implemented with distributing duct require some kind of active control device for each ductbranch in order to operate reliably, such as a constant pressure damper or a Constant airflow regulator. on/off-dampers can only be used if all duct branches are connected to the airchamber. Pressure measurement works most reliably at the very end of the system, depending on the ductwork variation.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	7
1.1	Tausta	7
1.2	Tavoite ja menetelmä	8
2	Rakennuksen ilmanvaihto	9
2.1	Ilmanvaihtokone ja kanavisto osineen	9
2.2	Ilmamäärät huonetiloissa ja mitoitusperiaatteet.....	12
2.3	Päätelaitteen valinta ja kanaviston mitoitus	15
2.4	Ilmanvaihtojärjestelmän toiminta ja säätö	22
2.4.1	Kanaviston tasapainotus ja muuttuva ilmavirtainen kanavisto.....	22
2.4.2	Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tehostustarpeen mittaaminen ja ohjaus.....	23
2.4.3	Ilmanvaihtokoneen puhaltimen tehostustarpeen mittaaminen ja ohjaus.....	24
2.5	Rakennusten kokonaisenergiankulutus ja ilmanvaihdon osuus	26
3	Ilmanvaihdon tehostus.....	32
3.1	Ilmamääräsäätimillä toteutettu tehostus.....	32
3.2	On/off-pelleillä toteutettu tehostus.....	35
4	Simuloitavat kanavistot	38
4.1	Kanavistovariaatiot	38
4.1.1	Laskentatapaus 1.....	38
4.1.2	Laskentatapaus 2.....	40
4.1.3	Laskentatapaus 3.....	42
4.1.4	Laskentatapaus 4.....	44
4.1.5	Laskentatapaus 5.....	46
4.1.6	Laskentatapaus 6.....	47
4.1.7	Simuloinnit.....	48
5	Simuloinnit ja tulokset.....	51
5.1	Laskentatapaus 1. Tulokset	51
5.2	Laskentatapaus 2. Tulokset	54

5.3	Laskentatapaus 3. Tulokset	57
5.4	Laskentatapaus 4. Tulokset	59
5.5	Laskentatapaus 5. Tulokset	61
5.6	Laskentatapaus 6. Tulokset	62
6	Päätelmät ja yhteenveto laskentatuloksista	64
7	Yhteenveto.....	67

Lähteet

Liite 1. Laskentatapauksien 2. – 7. Simulointitulokset.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

Φ	Lämpöteho	[W]
q_v	Ilmavirta	[dm ³ /s]
c	Ominaislämpökapasiteetti	[kJ/kg*k]
m	Ilman tiheys	[kg/m ³]
ΔT	Lämpötilaero	[°C, K]
$q_{v,set}$	Suunniteltu ilmavirta	[dm ³ /s]
q_v	Todellinen ilmavirta	[dm ³ /s]
P_t	Kokonaispaine kanavassa	[Pa]
P_{st}	Kanavan staattinen paine	[Pa]

Lyhenteet

IMS	Ilmamääräsäädin ilmanvaihtokanavassa
On/off-pelti	Moottoriohjattu sulkupelti
ppm	Hiilidioksidipitoisuus ilmassa (Parts per million)
SFP	Puhaltimen tai ilmanvaihtokoneen ominaissähköteho
MagiCad	Autocad pohjainen talotekniikan suunnitteluohjelma
CFD-mallinnus	Fluidien virtauksien matemaattinen mallintaminen (Computational fluid dynamics)

1 Johdanto

1.1 Tausta

Nykypäivän rakennuksien ilmanvaihdon yksi yleisimmistä ongelmakohdista löytyy muuttuvailmavirtaisen järjestelmän säätötekniikasta. Alalla on huomattu jo pitkään, että modernit ilmamääräsäätimet eivät välttämättä toimi luotettavasti esimerkiksi niiden likaantumisista johtuvien mittausvirheiden takia. Nämä ongelmat aiheuttavat jatkuvasti huoltotoimenpiteitä, jonka takia ilmamääräsäätimien käyttöä on joissain tapauksissa aloitettu välttämään.

Tähän jatkuvaan huoltotoimenpiteiden lisääntymiseen ratkaisuna on alettu toteuttamaan ilmanvaihdon tehostus ilmamääräsäätimien sijasta erillisellä tehostuskanavistolla ja moottoroiduilla on/off-sulkupelleillä. Tällaisessa ratkaisussa ajatuksena on se, että ilmavirrat mitataan ja säädetään rakennusvaiheessa huonetilaan esimerkiksi 30% maksimista normaaliajan kanavistolle ja tehostuskanavistolle 70%, jolloin huoneen ilmanvaihto on joko 30% tai 100%. Tehostus tapahtuu siten, että tehostuskanaviston sulkupellin avautuessa ilmanvaihtokoneen automaation painesäätöjärjestelmä alkaa pyörittämään puhallinta nopeammin, jolloin saadaan tehostuskanaviston kautta enemmän ilmavirtaa huonetilaan. Tällöin järjestelmässä ei ole minkäänlaista aktiivista ilmamäärien mittausta ja säätöä, ja ilmamäärien säätö tapahtuu niin sanotusti portaallisena säätönä, kun taas ilmamääräsäätimillä toteutettuna saataisiin portaaton ilmamäärien säätö.

Tällaisen järjestelmän heikkous on, että järjestelmästä ei saada tarkkoja mittaustuloksia jatkuvasti, vaan asetusravot ovat määritelty ilmanvaihdon säätötyön aikana valmiiksi, usein vain pelkästään siten, että kaikissa huoneissa on normaaliajan 30% ilmanvaihto ja seuraava mittaus siten, että kaikki huoneet ovat 100% käyttöasteella. Kuitenkin normaalisti isossa ilmanvaihtojärjestelmässä eri toimintavariaatioita tehostettavista ja tehostamattomista huoneista on lukematon määrä, jolloin näitä eri tilanteiden variaatioita ei olla mitattu ja säädetty, eikä näin ollen tarkkaan tiedetä, miten nämä eri variaatiot vaikuttavat todellisuudessa ilmanvaihtokoneen painesäätöön, kanavistopaineisiin ja sitä kautta ilmanvaihdon tehostukseen.

1.2 Tavoite ja menetelmä

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia laskennallisesti eri käyttötilannevariaatioiden vaikutusta ilmanvaihtokanaviston kokonaiskäyttäytymiseen ja löytää mahdollisia ongelmakohtia näiden eri toimintavariaatioiden välillä ja pyrkiä löytämään ratkaisua näiden ongelmien ratkaisemiseksi ja välttämiseksi. Aiheen tutkimiseen käytetään AutoCad-ohjelman MagiCad-lisäosaa.

Simuloitavia kanavistoja on kuusi erilaista variaatiota, joiden kanavistorakenne edustaa mahdollisimman kattavasti niin toteutettuja kohteita, kuin olemassa olevien ohjeistuksien mukaisia toteutustapoja, sekä näiden yhdistelmiä. Kanavisto mallinnetaan viiden huoneen välille ja huoneiden eri käyttöasteita jokaisella kanavistovariaatioilla simuloidaan seitsemän erilaista huoneiden käyttöastetapausta. Käyttöasteiden vaihdellessa huoneiden välillä saadaan kattava käsitys ilman liikkeistä kanaviston sisällä.

Simulointitulosten perusteella voidaan päätellä millä kanavistovariaatiolla suunnitellut tai halutut ilmavirrat pysyvät kanavahaaroissa eri käyttötilanteissa. Myöskin kanavistopaineiden pysyvyyden perusteella voidaan tuloksista tulkita, missä kanaviston sijainnissa on parhain painesäätoisen ilmanvaihtokoneen paineenmittauksen sijainti.

Näiden avulla voidaan tutkia mitkä suunnittelu ja toteutusratkaisut toimivat toteutettaessa järjestelmä on/off-pellein. Työn lopputuloksena saadaan käsitys tällaisten järjestelmien toiminnasta LVI-suunnittelun ja toteutuksen tueksi. Diplomityön toimeksiantajana toimii Granlund Kuopio Oy.

2 Rakennuksen ilmanvaihto

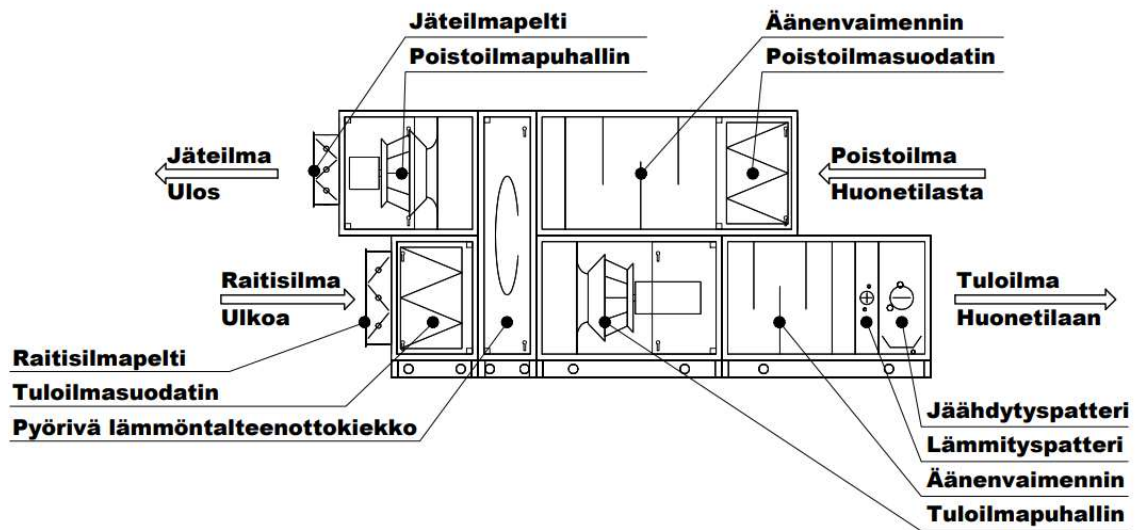
Rakennuksen ilmanvaihdon peruseriaatteena on, että oleskeluvyöhykkeillä syntyneet epäpuhtaudet siirretään pois sisäilmastosta ja tilalle tuodaan raikasta ja puhdasta ilmaa huonetilan käyttäjille hengitettäväksi käyttötilanteen kuormituksen huomioon ottaen.

Ilmanvaihdolla turvataan ihmiselle turvallinen ja terveellinen sisäilma kaikissa olosuhteissa ja mitoitusolosuhteissa. Epäpuhtauksia sisäilmassa voivat olla esimerkiksi ihmisen tuottama hiilidioksidi tai erilaiset prosesseissa syntyneet käryt, hajut tai muut epäpuhtaudet. Ilmanvaihdolla voidaan myös tarvittaessa jäähdyttää tai lämmittää huoneilmaa tehostuskapasiteettiä hyödyntäen.

Perinteisesti rakennuksen ilmanvaihto voidaan toteuttaa painovoimaisesti luonnollisten paine-erojen vaikutuksen myötä, esimerkiksi korkeuseron, lämpötilan tai tuulen vaikutuksesta. Modernit ilmanvaihtojärjestelmät kuitenkin käyttävät pääsääntöisesti mekaanisesti erilaisilla puhaltimilla tuotettua paine-eroa, jolloin rakennuksen ilmanvaihto on helpommin hallittavissa ja vaihdettava ilmamäärä on vuoden ympäri paljon tasalaatuisempi.

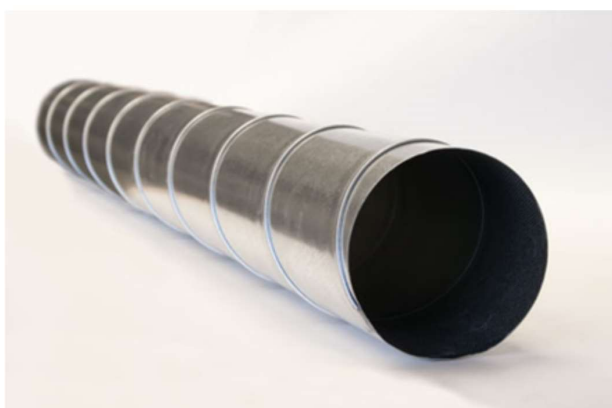
2.1 Ilmanvaihtokone ja kanavisto osineen

Tarvittavan ilmamassan liikuttamista varten riittää yleisesti pelkkä puhallin tuottamaan paine-eroa, mutta yleensä varsinkin isompien ilmamassojen käsittely vaatii kokonaisen ilmanvaihtokoneen, johon kuuluu puhaltimien lisäksi ilmansuodattimet, lämpöenergian lämmöntalteenotto, jälkilämmitys- ja jäähdytyspatterit, niille kuuluvat vesiverkostot ja pumput, sekä kokonaisuutta hallitseva rakennusautomaatiikka. Ilmanvaihtokoneen perusosat on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Ilmanvaihtokoneen perusosat [1]

Ilmanvaihtokoneen lisäksi rakennuksen ilmanvaihdon toteuttamiseen tarvitaan ilmanvaihtokanavisto ja tarvittavat tulo- ja poistoilmapäätelaitteet, sekä mahdolliset järjestelmän tasapainotukseen tarvittavat kertasäädettävät säätöpellit. Kierresaumakanava, säätöpelti ja tuloilmapäätelaite on esitetty kuvissa 2, 3. ja 4. Suomessa yleisesti suositaan pyöreää kierresaumakanavaa kantikanavan sijaan, sen asennettavuuden, edullisuuden, huollettavuuden ja virtausteknisten ominaisuuksien vuoksi.



Kuva 2. ja Kuva 3. Pyöreä kierresauma ilmanvaihtokanava FLEK ja IRIS-säätöpelti ilmamäärien säätöön kanavistossa [2]

Ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmapäätelaitteet ovat useasti ainoat ilmanvaihtojärjestelmän huonetilaan näkyvät osat. Järjestelmän toimivuuden kannalta varsinkin tuloilmapäätelaitteen tekniset ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi ilmanvaihdon toimivuuteen huonetilassa. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi päätelaitteen heittopituus ja sen säädettävyys, kanavistotasapainon säädettävyys ja päätelaitteen tuottama ääni.



Kuva 4. Tuloilmapäätelaitteen etulevy DYKH [2]

Ilmanvaihtokoneen, kanavistojen ja päätelaitteiden avulla saadaan toteutettua rakennuksen ilmanvaihto yksinkertaisille tiloille ja vakioilmamäärille. Energiansäästön kannalta myös osailmavirrat onnistuvat tällaisella kokonaisuudella tiputtamalla puhaltimien kierrosnopeutta. Tällöin tärkeässä roolissa on ilmanvaihtokanaviston tarkka tasapainotus myös puhaltimen osatehoilla, jolloin koko järjestelmä säätyy kokonaisuudessaan lineaarisesti, eikä rakennuksen sisäiset painesuhteet heittele merkittävästi yli- tai alipaineisiksi. Tällöin kuitenkin koko ilmanvaihtokoneen palvelualueen ilmavirrat tippuvat alkuperäisestä, joka ei ole välttämättä optimaalinen tilanne jokaiselle ilmanvaihtokoneen palvelualueen huonetyypille.

2.2 Ilmamäärät huonetiloissa ja mitoitusperiaatteet

Lähtökohtaisesti normaaleissa huonetiloissa ilmanvaihdon mitoitusperiaatteet perustuvat ihmisen hengitysilman tuottamaan hiilidioksidiin, joka vaihtelee kehon aktiivisuustilan mukaan. Erikoistiloissa, kuten keittiöissä tai teollisuuden tiloissa ilmavirtojen mitoitusperiaatteet voivat tulla prosessien tuottamien käryjen tai hajujen vaateesta, tällaisia tapauksia ei tässä työssä ei käsitellä. Hiilidioksidin poistaminen huonetiloista on ensiarvoisen tärkeää, koska liian korkeat hiilidioksidipitoisuudet vaikuttavat esimerkiksi ihmisen keskittymiskykyyn, tuottavuuteen ja vireystilaan. [3]

Ilmanvaihtoa voidaan myös hyödyntää tarvittaessa rakennuksen lämmitykseen tai jäähdytykseen, jolloin huonetilojen ilmamäärät mitoitetaan ilmavirran mukana kulkevan tarvittavan energiamäärän mukaan. Tällöin on myös hyvä tarkistaa voiko osan siirrettävästä ilmasta kierrättää takaisin huonetilaan kiertoilmakoneistolla.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta vaatii, että rakennuksen ilmanvaihto mitoitetaan siten, että käyttötilanteessa sisäilmaston hiilidioksidipitoisuus ei ylitä enempää kuin 800 ppm verrattuna ulkoilman hiilidioksidipitoisuuteen ja että ilmavirran mitoitus on oltava oleskelutiloissa vähintään 6 dm³/s henkilöä kohti suunniteltuna käyttöaikana. Asuinhuoneiston minimi kokonaisilmavirta on oltava kuitenkin vähintään 18 dm³/s tai 0,35 (dm³/s)/m². [4]

Ympäristöministeriön asettamien minimiarvojen lisäksi yleisesti käytetään Sisäilmastoluokitus 2018 sisäilmastoluokkien S3, S2 ja S1 määrittelemiä ilmamäärien arvoja, jossa S3 (Tyydyttävä sisäilmasto) vastaa ympäristöministeriön tasoa, eli hiilidioksidipitoisuus huonetilassa maksimissaan alle 800 ppm ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden lisäksi. S2 (Hyvä sisäilmasto) vastaa alle 550 ppm ja S1 (Yksilöllinen sisäilmasto) alle 350 ppm hiilidioksidipitoisuutta [5]. Yleisesti rakennushankeen alussa päätetään sisäilmastoluokituksen taso, joka määrittää myös raja-arvot esimerkiksi sisätilojen ääniolosuhteista ja lämpötilavaihteluista ja näiden olosuhdevaatimusten perusteella määritellään suunnitteluvaiheessa niin lämmityksen, jäähdytyksen, äänenvaimennuksen ja ilmanvaihdon ilmamäärien laatutaso.

Ilmamäärät voidaan mitoittaa myös suoraan tiedossa olevien henkilöiden ja niiden hiilidioksidituoton perusteella.

Tarvittava ilmamäärä voidaan laskea yhtälöllä 1:

$$q_{ulko} = \frac{G}{C_{poisto} - C_{ulko}} 1000000 \quad (1)$$

q_{ulko}	= Ulkoilmavirta [dm^3/s]
G	= Henkilöiden yhteenlaskettu hiilidioksidintuotto huonetilaan [dm^3/s]
C_{poisto}	= Poistoilman hiilidioksidipitoisuus [ppm] sisäilman suunnitteluarvo
C_{ulko}	= Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus [ppm]
1000000	= Yksikön muunnoskerroin

Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus heittelee vuoden aikana noin 380 – 440 ppm [6] välillä ja keskimäärin ihminen tuottaa hiilidioksidia esimerkiksi pelatessa sulkapalloa 92,4 dm^3/h . [7]

Näin esimerkiksi 400 ppm ulkoilman hiilidioksidipitoisuudella ja ympäristöministeriön minimi ilmanvaihdon määräyksillä neljän sulkapallon pelaajan hiilidioksidiperusteisen ilmanvaihdon määrä on yhtälöllä 1 laskettuna noin 130 dm^3/s ja jos taas mitoitetaan sisäilmastoluokituksen S1 vaatimuksilla, ilmamäärä vastaavassa tilanteessa on noin 290 dm^3/s .

Tehostustilanteiden tarve moninkertaistuu, mitä paremmat sisäilmaolosuhteet halutaan ja myöskin tarve on erittäin suuri sellaisissa tiloissa, joissa käyttöaste voi muuttua päivän aikana tyhjistä huonetilasta ison ihmismassan tuomaan kuormitukseen. Ilmanvaihdon energiankulutuksen kannalta käyttöajan ulkopuolella ei ole järkevää vaihtaa ilmaa enemmän, kuin on tarvetta vaan pyrkiä säätämään ilmanvaihdon voimakkuutta ilmanvaihtotarpeen mukaiseksi.

Ilmanvaihdolla voidaan myös tarpeen vaatiessa lämmittää huoneilmaa. Tarvittavan ilmamäärän huonetilan lämmittämiseen voi laskea yhtälöllä 2:

$$\Phi = q_v c m \Delta T \quad (2)$$

Φ = Lämpöteho [W]

q_v = Ilmavirta huonetilaan [dm^3/s]

c = Ilman ominaislämpökapasiteetti [$kJ/kg K$]

m = Ilman tiheys [kg/m^3]

Ilman tiheys on 20°C lämpötilassa ja 1013 hPa ilmanpaineessa 1,204 kg/m³ ja ilman ominaislämpökapasiteetti on 1010 J/kg K. Tällöin jos esimerkiksi huonetilaan tarvitaan laskennallisesti 5 kW lämpöteho nostamaan huoneilman lämpötila 15°C :sta 22°C:een, saadaan yhtälöstä 2 ilmamääräksi 587,38 dm³/s.

Samalla yhtälöllä voidaan myös laskea karkeasti tuntuvaan jäähditysenergian mukaan tarvittava ilmamäärä esimerkiksi jäähdityksen mitoituslämpötilan ja halutun huonelämpötilan mukaan. Jäähdityksen osalta kuitenkin varmin tapa on mitoittaa simulointiohjelmalla tarvittava tuntuva jäähditysenergian tarve, jonka jälkeen tarkastella vielä mollier-kaaviota hyödyntäen todellinen jäähdytystehontarve, sekä varmistua, ettei kondensoitumista pääse tapahtumaan esimerkiksi päätelaitteen etulevyn pinnalla.

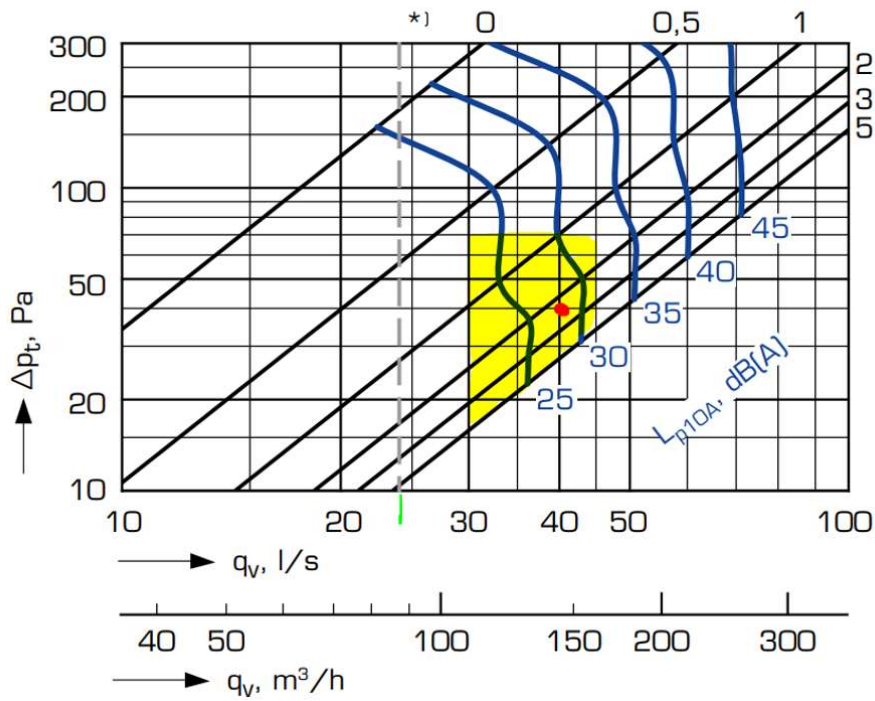
Monesti kuitenkin huonetilaan ilmanvaihdon tuottamalla lämmitys- ja jäähditysenergialla ei saada katettua haluttua energiatarvetta kokonaisuudessaan, joten huonetiloihin lisätään tarvittaessa erillisiä tilalaitteita lämmittämään ja jäähdyttämään ilmanvaihdon lisäksi.

2.3 Päätelaitteen valinta ja kanaviston mitoitus

Päätelaitteen valintaan vaikuttaa tarvittava ilmamäärä, ilmanjakotapa, muuntojoustavuuden tarve, päätelaitteen tuottama ääni ja esimerkiksi huoneen fyysinen koko. Päätelaitetta valittaessa varsinkin toimistotilojen toimintavyöhykkeelle tulee ottaa huomioon myös työskentelytilan vaatimukset, kuten vedottomuus, lämpötila tai koko huonetilan huuhtoutuvuus sopivien heittopituuksien perusteella. Erilaisille huonetyypeille on määritelty myös ilmanvaihtolaitteiston tuottama maksimi äänitaso, joka täytyy ottaa huomioon päätelaitteita valittaessa.

Päätelaitteiden heittopituudet ovat tärkeä ottaa huomioon varsinkin sekoittavassa ilmanjakotavassa, jota käytetään lähes poikkeuksetta normaaleissa toimitiloissa ja asuinrakennuksissa. Sekoittavan ilmanvaihdon peruserä on, että tuloilma sekoittuu mahdollisimman hyvin huonetilaan nopean ilmavirtauksien johdosta ja huoneilma on täten tasalaatuista, kun taas esimerkiksi syrjäyttävässä ilmanjakotavassa tuloilma tuodaan huonetilaan yleensä läheltä lattiapintaa pienillä ilman nopeuksilla ja poisto tapahtuu kattopinnasta, jolloin huoneilma voi kerrostua epätasalaatuiseksi.

DY(K,C)H-160-4 + ATTS-125-160-1 - 0 MM RAOLLA



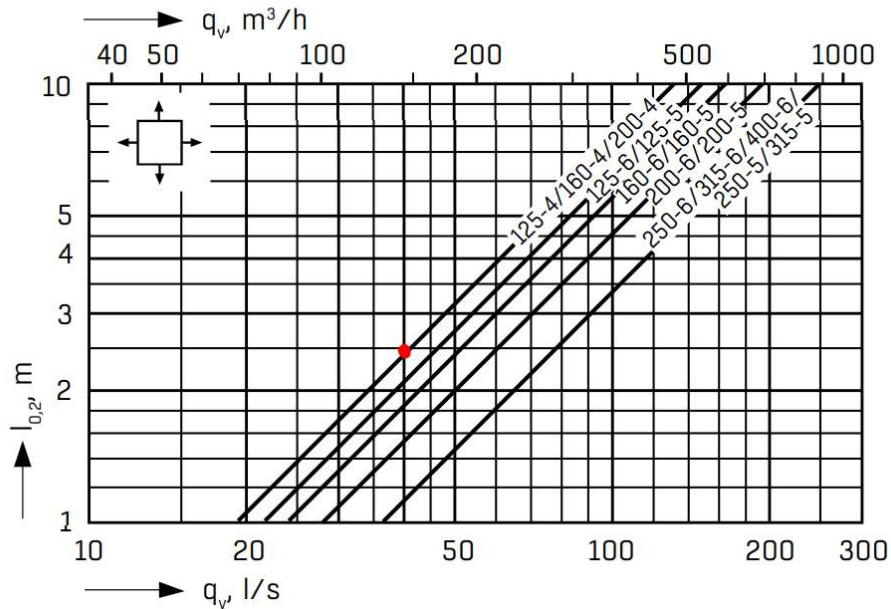
Kuva 5. DY(K,C)H-160-4+ATTS-125-160-1-0 Päätelaitteen ilmavirta, painehäviö ja äänitaso käyrästä muokattuna alkuperäisestä. [2]

Valmistajat ovat laatineet päätelaitteistaan mitoitus taulukot, joista voidaan tulkita riittävä päätelaitteessa valitulla ilmamäärällä ja paine-erolla säätövara ja pysyvä päätelaitteen tuottama äänenpaine halutussa rajoissa. Kuvassa 5 on esitetty tuloilmapäätelaitteen tyypillinen päätelaitteen mitoitus piste punaisella merkillä 40 Pa paineella ja 40 dm³/s ilmavirralla. Päätelaitte tuottaa tuolloin noin 27 Lp10A, dB(A) äänitason huonetilaan, joka on sellaisenaan sopiva äänitaso esimerkiksi toimistotiloihin.

Kuvaan 5 on merkattu keltaisella alue, johon päätelaitteet pyritään mitoittamaan. Tällöin päätelaitte on mitoitettu hyvälle säätöalueelle, eli päätelaitteen painehäviö on kohtuullinen ja päätelaitteen tuottama äänitaso ei ole liian kova. Hyvänä raja-arvona yleisesti pidetään alle 50 Pa painetta ja alle 33 dB(A) äänitasoa. Kuvassa 5 on myös merkattu vihreällä kyseiselle päätelaitteille ilmoitettu minimi ilmavirta, joka on noin 24 dm³/s, johon valmistajan mukaan päätelaitteen voi säätää.

HEITTOPITUUS (ISOTERMINEN)

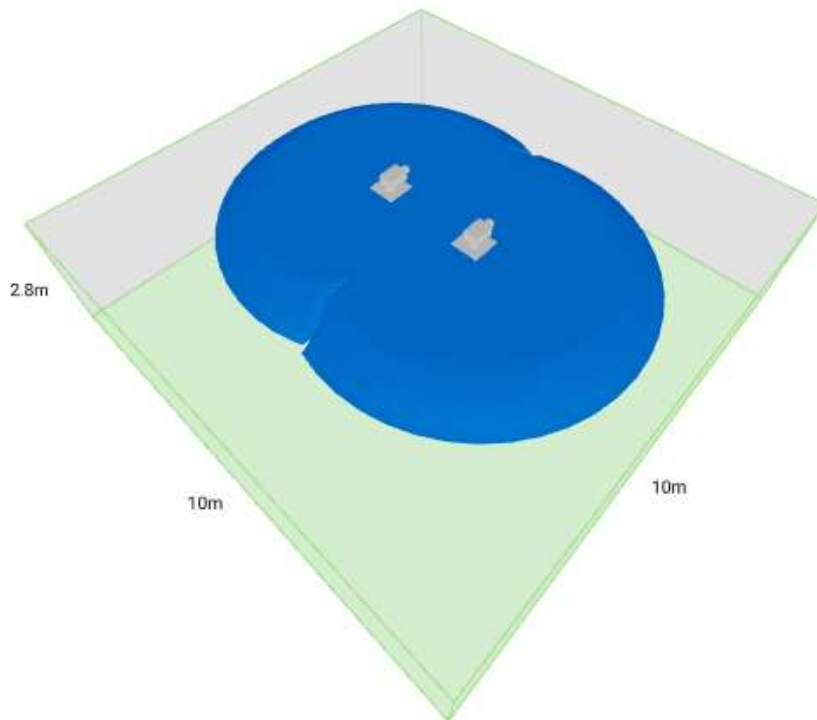
Koko ilmoittaa hajottimen koon (mm).



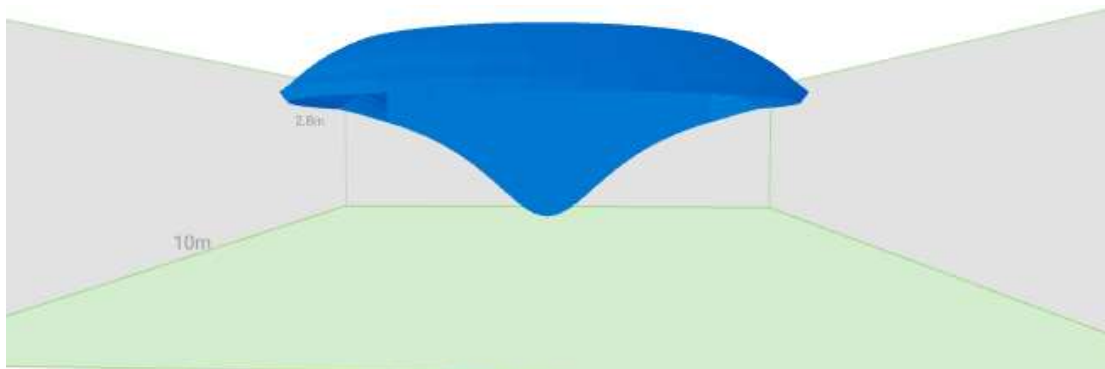
Kuva 6. Suutinhajotin DYKH/DYCH + Tasauslaatikko ATTS heittopituustaulukko. [2]

Kuvassa 6. on esitetty heittopituus kun suutinhajottimen DYKH (Etulevy esitetty kuvassa 4.) suuttimet ovat tasaisesti joka suuntaan suunnattu, $40 \text{ dm}^3/\text{s}$ mitoituspisteessä ja heittopituudeksi taulukko antaa kuvan 5 päätelaittekokonaisuudella 2,5 metriä. Heittopituuden määrittelmä on rajattu metrimäärään, jossa ilma liikkuu alle $0,2 \text{ m/s}$.

Jos huoneessa on useampi tuloilmapäätelaite on tarkasteltava myös oleskeluvyöhykkeelle syntyvät mahdolliset ilmavirtojen törmäyksestä syntyvät ilmavirtojen muutokset, jotka voivat aiheuttaa esimerkiksi hallitsematonta ilman liikehdintää ja työskentelyalueella tarpeetonta vedon tunnetta. Varsinkin staattisen työpisteen läheisyyteen ei saa muodostua vedon tunnetta, joten heittopituuksien avulla voidaan haarukoida mahdollisia ongelmapaikkoja. Joillain päätelaittevalmistajilla on myös simulointiohjelmiä, joilla voidaan tarkastella niin heittopituuksien kattavuutta, kuin mahdollisia vetoisuuspaikkoja. Kuvassa 7. ja 8. on esitetty Swegonin Room Unit Design simulointiohjelman tuloksia kahdella Colibri CCb päätelaitteella.



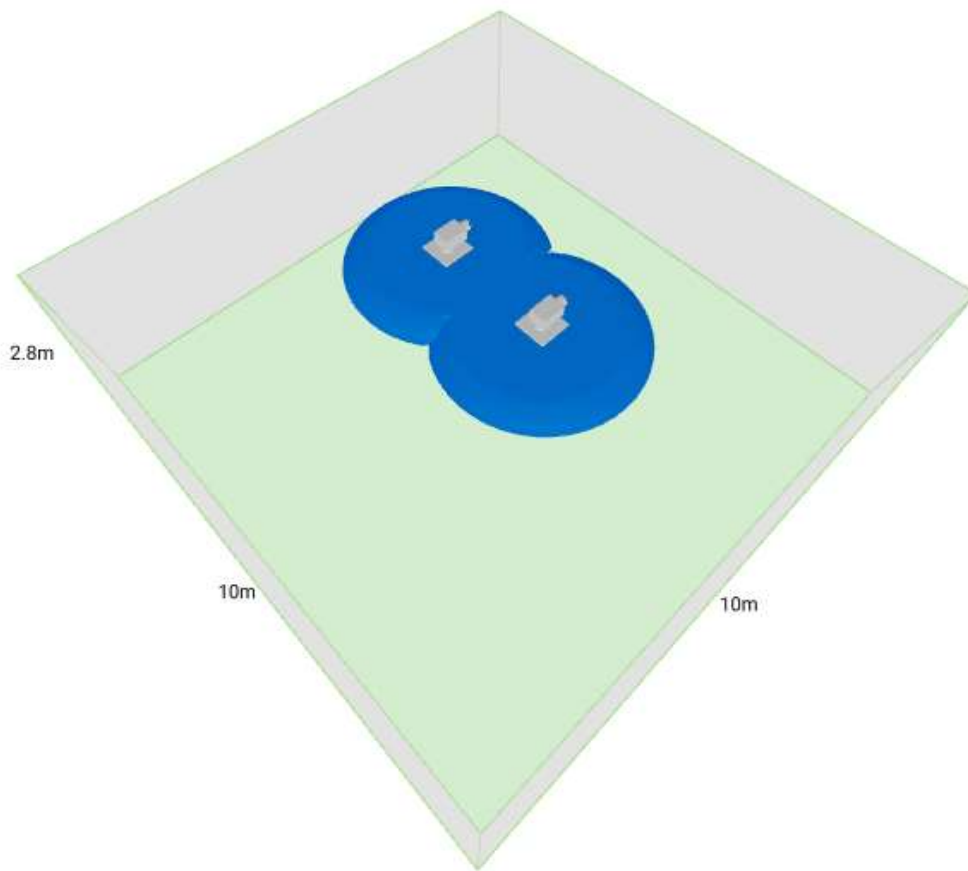
Kuva 7. Kaksi Colibri CCb päätelaitetta Swegon RUD simulointiohjelmassa [9]



Kuva 8. Kaksi Colibri CCb päätelaitetta Swegon RUD simulointiohjelmassa [9]

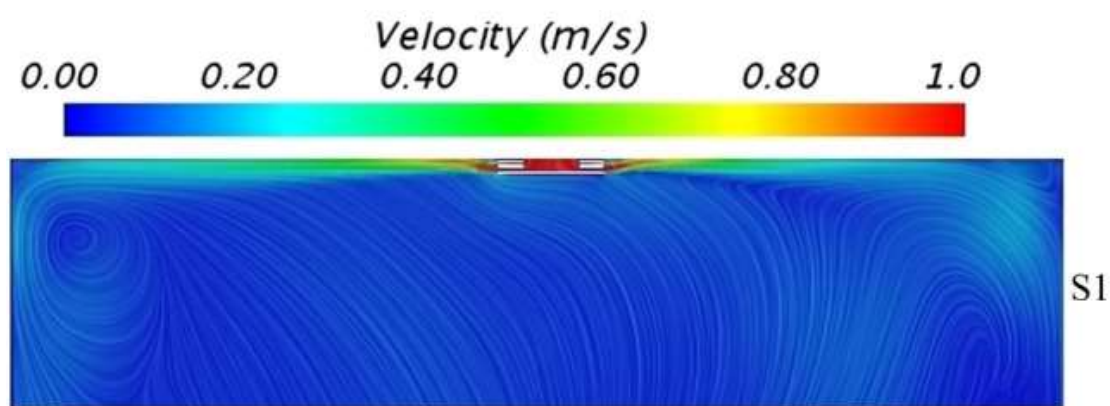
Kuvasta 7. nähdään, että kyseiselle 10m x 10m huoneelle päätelaitteiden heittopituudet ovat vajaita, joten ilmavirta ei huuhtelee koko huonetilaa täydellisesti. Kuvasta 8. näkee, kuinka ilmavirtojen törmäys aiheuttaa ilmavirtojen tipahtamisen keskelle huonetilaa ja aiheuttaa tuolle alueelle vedontunteen riskin.

Erityisesti muuttuvailmavirtaisessa järjestelmässä päätelaitteiden valinnat tulevat tärkeiksi, koska samalla tuloilmapäätelaitteella pitäisi toteuttaa tehostustilanteen ilmavirrat, sekä normaaliajan ilmavirrat. Kuvassa 9. on esitetty kuinka radikaali ero voi olla kuvassa 7. esitettyjen päätelaitteiden heittopituudella, jos päätelaitteiden tuloilmavirrat tiputetaan puoleen maksimimitoitus tilanteesta.



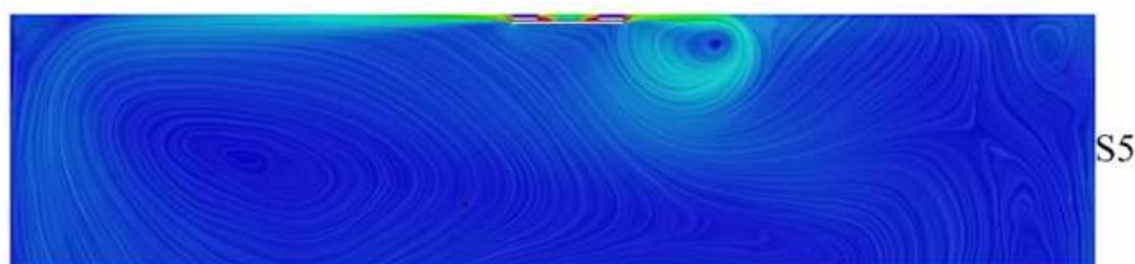
Kuva 9. Kaksi Colibri CCb päätelaitetta Swegon RUD simulointiohjelmassa pienellä ilmavirralla [9]

Jotkin valmistajat ovat ratkaisseet tätä heittopituus ongelmaa toteuttamalla niin sanottuja aktiivisia päätelaitteita, jonka heittopituus säätyy automaattisesti ilmavirran mukaan. Näiden ilmavirtojen liikkeitä on myös tutkittu esimerkiksi CFD-mallintamalla eri ilmavirroilla ja lämpötiloilla [10]. Kuvassa 10 on esitetty poikkileikkaus toimistohuoneesta, jossa keskellä kattoa on aktiivinen tuloilmapäätelaite. Kuvan oikeassa laidassa on ikkuna ja ulkolämpötilana on käytetty simuloinnissa $-1,8^{\circ}\text{C}$. Tuloilman lämpötilana käytetty 24°C ja ilmavirtana $49,4 \text{ dm}^3/\text{s}$. Kuvassa näkyvä päätelaitteen heittopituus riittää kattamaan koko huoneen, jolloin koko huone huuhtoutuu.



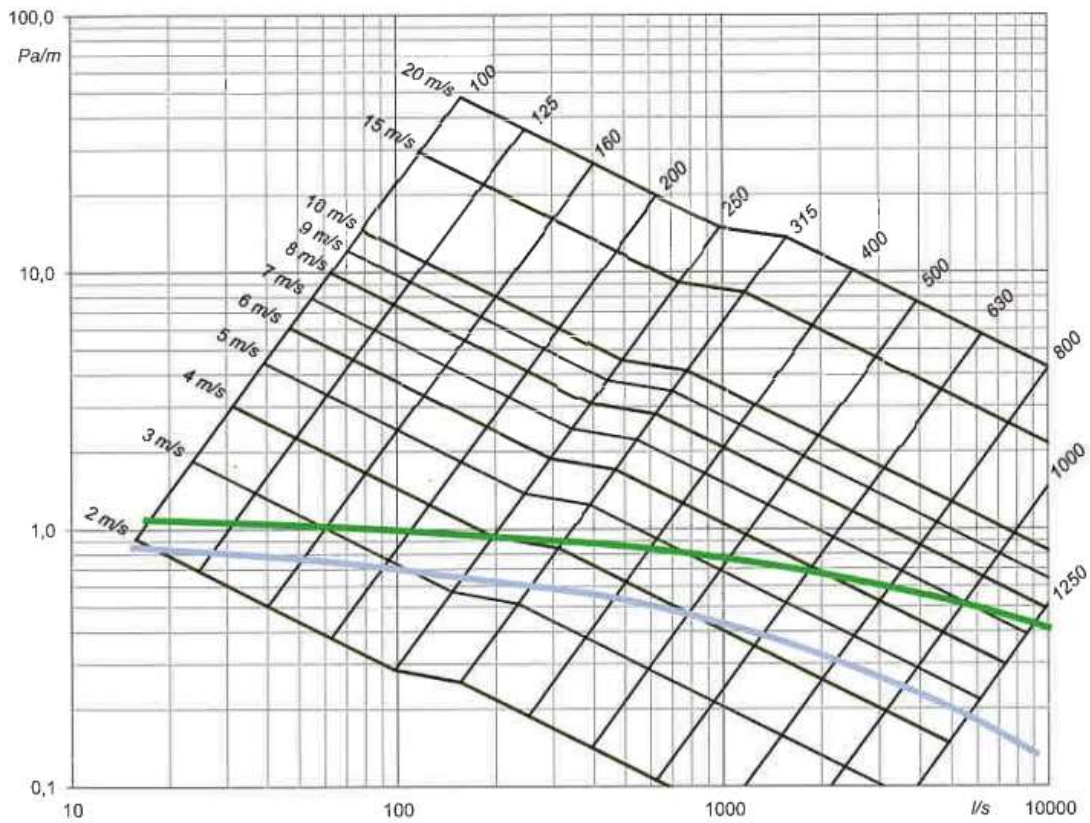
Kuva 10. Aktiivisen päätelaitteen heittopituudet [10, sivu 4]

Kuvassa 11 on esitetty vastaavassa simulointitilanteessa ilmavirtojen liikkeet $16 \text{ dm}^3/\text{s}$ ilmavirralla ja pienemmällä tuloilmapäätelaitteen raolla. Näistä voidaan verrata, että kuvan vasemmalle puolelle ilmavirta kulkeutuu säädetyn heittopituuden myötä myös koko huoneen matkalle, kun taas esimerkiksi kuvan 9 tapauksessa heittopituus ei riitä kattamaan koko huonetta. Kuvan 11 oikeassa laidassa olevan ikkunan kylmän pinnan lämpötilan muutoksien aiheuttamien ilmavirtojen takia tuloilmavirta ei kykene pääsemään huoneen laitaan, vaan jää pyörimään päätelaitteen viereen. Tästä syystä myös lämpötilojen vaihtelut on hyvä huomioida päätelaitetta valittaessa.



Kuva 11. Aktiivisen päätelaitteen heittopituudet [10, sivu 4]

Kun sopivat ilmamäärät ja päätelaitteet on valittu, niin rakennetaan järjestelmälle sopiva ilmanvaihtokanavisto. Kanavisto voidaan mitoittaa joko vakio nopeudelle m/s tai vakiolle kitkapainehäviölle Pa/m, mutta yleisimmin käytetty rakennuksien kanaviston mitoitus tapa on ”hyväksi todetut kanavakoot” mitoitus tyyli, jossa mitoitus kriteerinä on kanaviston virtauksien tuottama äänitaso. Kuvassa 12 on esitetty vakiokanavakoot, virtausnopeudet ja kitkapainehäviöt, joiden perusteella kanavakoot voidaan mitoittaa. Kuvassa myös esitetty vihreällä suurpiirteinen käyrä, jolla mitoittaessa saadaan kanavisto mitoitettua äänitasolle 35 dB (A) ja sininen käyrä vastaa ~25 dB(A) äänitasoa. [11]



Kuva 12. Pyöreän kanavan mitoitusdiagrammi [11, sivu 111]

2.4 Ilmanvaihtojärjestelmän toiminta ja säätö

2.4.1 Kanaviston tasapainotus ja muuttuva ilmavirtainen kanavisto

Toimivan ilmanvaihdon perustana on hyvin mitoitettu ja oikeaoppisesti todellisuudessa säädetty ilmanvaihtokanavisto kaikkine järjestelmäosineen. Kokonaisvaltaisen ilmanvaihtokanaviston tasapainotukseen on yleisesti kaksi lähestymistapaa: suhteellinen säätö tai venttiilikohtainen säätö.

Suhteellisella säädöllä tarkoitetaan säätötapaa, jolloin valitaan referenssimittauspisteeksi kanaviston yleensä kauimmaista tai vaikeimmassa pisteestä oleva päätelaite ja säädetään koko järjestelmä tämän päätelaitteen ilmavirran perusteella tasapainoon suunniteltujen ilmavirtojen ja mitattujen ilmavirtojen suhdelukuja hyödyntäen. Tasapainotuksen aikana ilmavirrat poikkeavat siis suunnitellusta, mutta kun säätötyön aikana jatkuvasti seurataan referenssipäätelaitteen ilmavirtaa ja verrataan sen suunnitteluarvoa mitattuun arvoon ja tämän suhdeluvun perusteella säädetään muut päätelaitteet, saadaan lopullinen oikea ilmavirta toteutettua puhallinnopeuden säädöllä. Tämä tapa on yleisesti työläs, mutta lopputuloksen kannalta paras säätötapa niin energiatehokkuuden, kuin kanaviston tuottaman äänien puolesta.

Venttiilikohtaisessa säädössä peruseriaatteena on laittaa puhaltimet haluttuun säätöarvoon ennen kuin muu säätötyö on aloitettu ja tämän jälkeen käydään päätelaitekohtaisesti säätämässä halutut asetusarvot. Tässäkin säätötavassa täytyy mitata ja säätää koko järjestelmä useampaan kertaan iteroimalla. Venttiilikohtaisessa säädössä järjestelmä säädetään ”kuristavasti”, jolloin järjestelmään syntyy enemmän ääntä ja puhallin joutuu tuottamaan enemmän painetta, kuin jos järjestelmä olisi säädetty suhteellista säätötapaa hyödyntäen.

Kun halutaan tiputtaa koko ilmanvaihtokoneen palvelualueen ilmamääriä, voidaan se toteuttaa hyvin tasapainotetun kanaviston avulla puhaltimen kierrosnopeutta laskemalla. Tällöin koko järjestelmän kanavisto säätyy lineaarisesti, jolloin puhaltimen pyörimisnopeuden puolitus aiheuttaa myös jokaisen päätelaitteen ilmamäärän puolittumisen, eikä toimenpide tällöin aiheuta rakennuksen painesuhteiden heittelyä. Kokemuspäisästi suhteellisella säädöllä toteutettu kanavisto säätyy helpommin lineaarisesti myös osailmavirroilla, kuin venttiilikoh-

taisella säädöllä, mutta kanavapaineiden laskiessa riittävän alas lisääntyy myös päätelaitteiden mittausten virhemarginaali, jolloin on vaikeampi todentaa kanavistotasapainon säilyvyys osailmavirroilla.

Erityisesti suunnittelun, mitoituksen ja fyysisen säätötyön haasteet syntyvät, kun järjestelmään lisätään käyttöalueita, joiden ilmavirtaa täytyy säätää käyttöaikana muusta palvelualueen ilmassasta poiketen esimerkiksi yksittäisten tilojen tarpeenmukaisen ilmanvaihdon osalta. Tällöin tärkeää on ottaa huomioon suunnittelu- ja toteutusratkaisussa yksittäisten haarojen ilmamäärien ja painevaihtelujen aiheuttamat muutokset myös muualla kanavistossa, jotta haluttu kanavistotasapaino pysyy hallinnassa.

Toteutusratkaisuja on useita ja sopivin on aina ratkaistava tapauskohtaisesti kanaviston luonteen, ilmanvaihtokoneen puhaltimen ohjaustavan, tarvittavien ilmamäärien ja esimerkiksi tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla varustettujen tilojen määrän mukaan.

2.4.2 Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tehostustarpeen mittaus ja ohjaus

Tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla toteutetun huonetilan ilmanvaihdon tehostustarvetta mitataan usein huonetilasta tai poistoilmakanavasta rakennusautomaatioon liitettyjen hiilidioksidipitoisuusantureiden tai lämpötila-antureiden avulla. Tutkimuksen mukaan hiilidioksidianturin sijainnilla on suuri merkitys siihen, kuinka luotettava hiilidioksidipitoisuuden mitaustulos on ja mittauspiste tuleekin siitä syystä sijaita lähellä poistoilmapäätelaitetta [12]. Hiilidioksidipitoisuus ja lämpötila raja-arvot asetetaan rakennusautomaatioon sisäilmasto-vaatimusten perusteella. Ihminen tuottaa lämpöä huoneeseen ja myös hiilidioksidia hengittäessään, joten huoneen hiilidioksidipitoisuus kasvaa jos huonetilaan tulee sen hetken ilmanvaihtoon nähden liikaa ihmisiä. Sisäilmastoluokitus 2018 määrittelee S2 sisäilmastoluokan mukaisesti maksimi hiilidioksiditasoksi <550 ppm ulkoilmaan nähden, eli huoneen hiilidioksidipitoisuus ei saa nousta yli 950 ppm arvoon, jos ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on 400 ppm.

Tällöin rakennusautomaatioon voidaan syöttää hiilidioksidimittauksen toimenpide raja-arvoksi esimerkiksi 700 ppm, jolloin huonetilaa palvelevat ilmamääriä säätelevät laitteet saavat rakennusautomaation kautta käskyn avautua. Tällöin huonetilaan tuodaan lisää raikasta ilmaa ja poistetaan käytettyä tai ylikuumennettua ilmaa kanavistojen kautta ulos huonetilasta ja tarpeenmukaisen ilmanvaihdon tehostus toimii automaattisesti silloin, kun huonetiloihin tulee kuormitusta.

2.4.3 Ilmanvaihtokoneen puhaltimen tehostustarpeen mittaus ja ohjaus

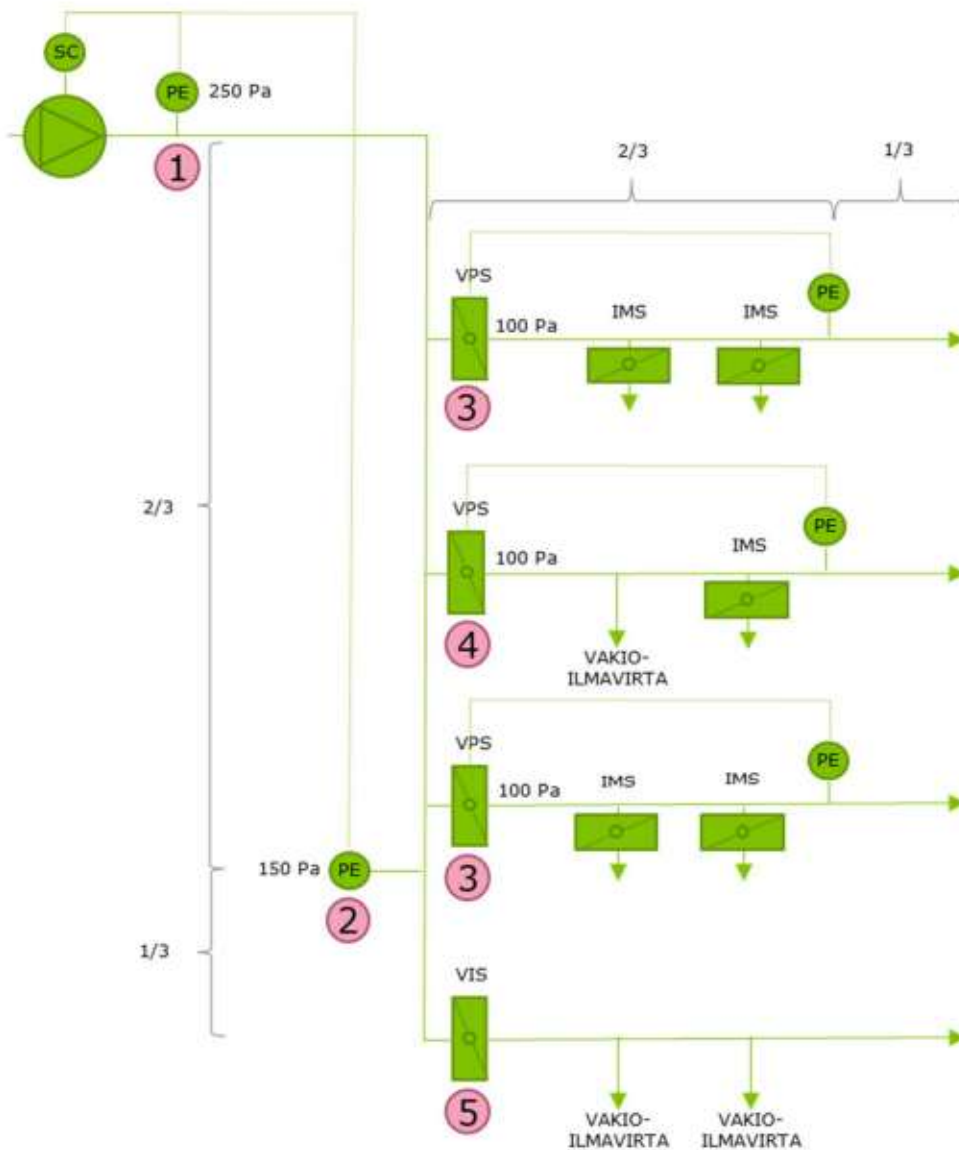
Jos koko ilmanvaihtokoneen palvelualueelta halutaan tiputtaa ilmamäärää ja kanaviston osalta tällainen on mahdollista, voidaan puhaltimen teho tiputtaa manuaalisesti rakennusautomaatiosta säätämällä esimerkiksi puolelle teholle tai joissain tapauksissa jopa sammuttaa koko ilmanvaihtokone. Tarpeenmukaisessa muuttuvailmavirtaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ilmanvaihtokoneen puhaltimia täytyy säätää vastaamaan todellista sen hetkistä ilmanvaihtotarvetta, jotta ilmaa saadaan riittävästi tarvituille alueille. Yleisesti puhaltimien kierrosnopeutta säädetään rakennusautomaation kautta automaattisesti jonkin ennalta syötetyn mittauseron mukaisesti. Jos kohteessa on kaikki kanavahaarat varustettu ilmamäärää aktiivisesti mittaavilla ilmamääräsäätimillä, voidaan puhallinta ohjata myös näiden mittaus tulosten perusteella, jolloin järjestelmä on muuttuvapainesäätöinen.

Kun tarpeenmukaisella ilmanvaihdolla toteutetun huonetilan kuormitus ja ilmamääriä säätelevien laitteiden säätöasennot muuttuu, silloin muuttuvat myös kanavistopaineet jos puhallin pyörii samalla pyörimisnopeudella. Tällöin puhaltimen ohjaamiseen on yleisesti käytetty kanavistopaineen mittausta ja silloin puhutaan painesäätöisestä ilmanvaihtojärjestelmästä. Painesäätöisen järjestelmän peruserä on, että joko kammiopaine tai kanavistopaine tietyn kanavaosan kohdalla on vakio riippumatta siitä, mitä kanavistossa tapahtuu.

Kokemuseräisesti vakiokammiopainemittauksella ei saada niin tarkkaa kanaviston säätöä toteutettua, koska kanaviston loppupäässä olevien ilmamääriä säätelevien laitteiden asentojen muutokset eivät välity niin herkästi kammiolle asti. Vakiopainemittauksen sijainti on yleisesti ohjeistettu asennettavaksi kanaviston pituuden viimeiselle kolmannekselle, jolloin

myös kanavapainevaihtelut välittyvät herkemmin kyseiselle mittauspisteelle ja tällöin puhaltimen ohjaus on tarkempi.

Jos kyseessä on paine-ero mittari, joka mittaa kanavan tai kammion sisäpuolen ja ulkopuolen välistä paine-eroa, on kanavan ulkopuolisen referenssipainemittauspisteen sijainnilla merkittävää lopputuloksen kannalta. Tällaisessa tapauksessa yleisesti painemittauksen referenssipiste on siellä, missä mittausyksikkökin sijaitsee ja jos mittari on sijoitettu vetoisaan tai esimerkiksi tahattomasti yli- tai alipaineiseksi vaihtelevaan tilaan on mittavirheen riski erittäin suuri. Tällöin paineenmittauksen referenssipisteen mittaustulos vääristää puhaltimen pyörimisnopeuden säätöä, jolloin ilmanvaihtojärjestelmän painesäätö ei toimi oikealla tavalla.

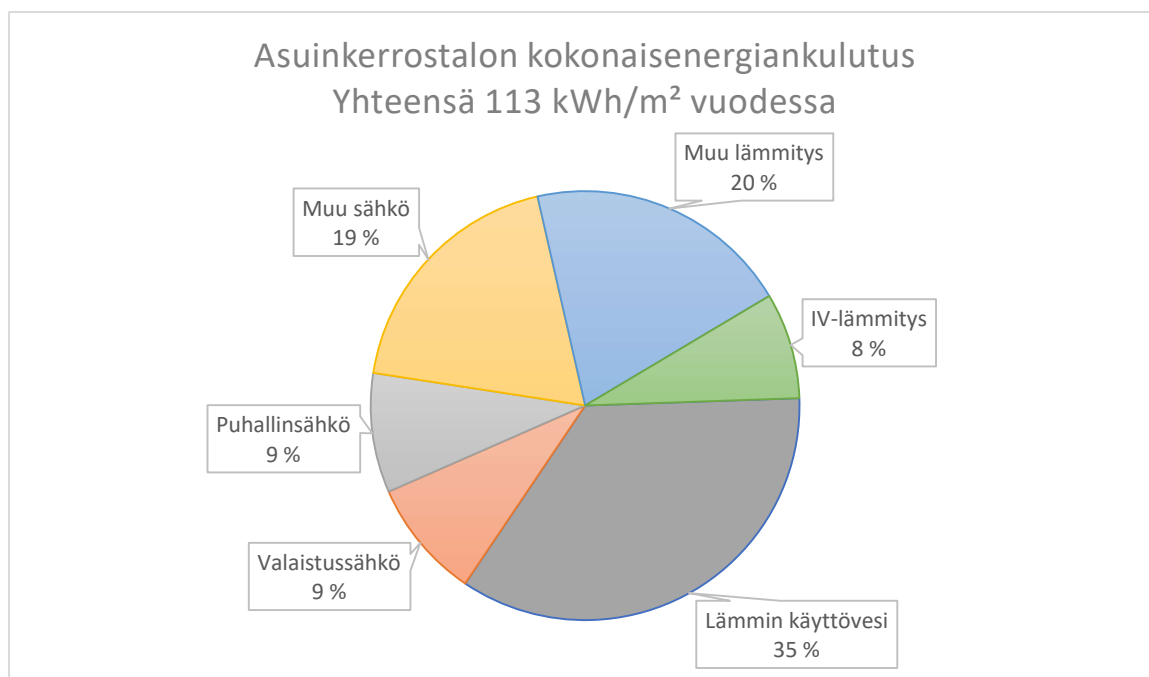


Kuva 13. Vakiopainesäädön esimerkkikuva [8, sivu 16]

Kuvassa 13 on esitetty yleisesti ilmanvaihtojärjestelmän vakioainesäädön toteutuksen esimerkkikaavio, jossa pisteessä 1. on vakiokammio paineen mukaan säätyvä järjestelmä ja pisteessä 2. on runkokanavapainesäätöinen järjestelmä. Pisteissä 3. ja 4. on esitetty isompien haarakanavien vakioainesäätö, jonka takana on yksittäisten kanavahaarojen tai huoneiden vakioilmavirtaisia kanavistoja tai ilmamääräsäätimillä varustettuja muuttuvailmavirtaisia kanavahaaroja. Pisteessä 5. on esitetty mekaanisella vakioilmavirtasäätimellä toteutettu kanavahaara, jonka takana on vakioilmavirtaisia kanavistoja. [8]

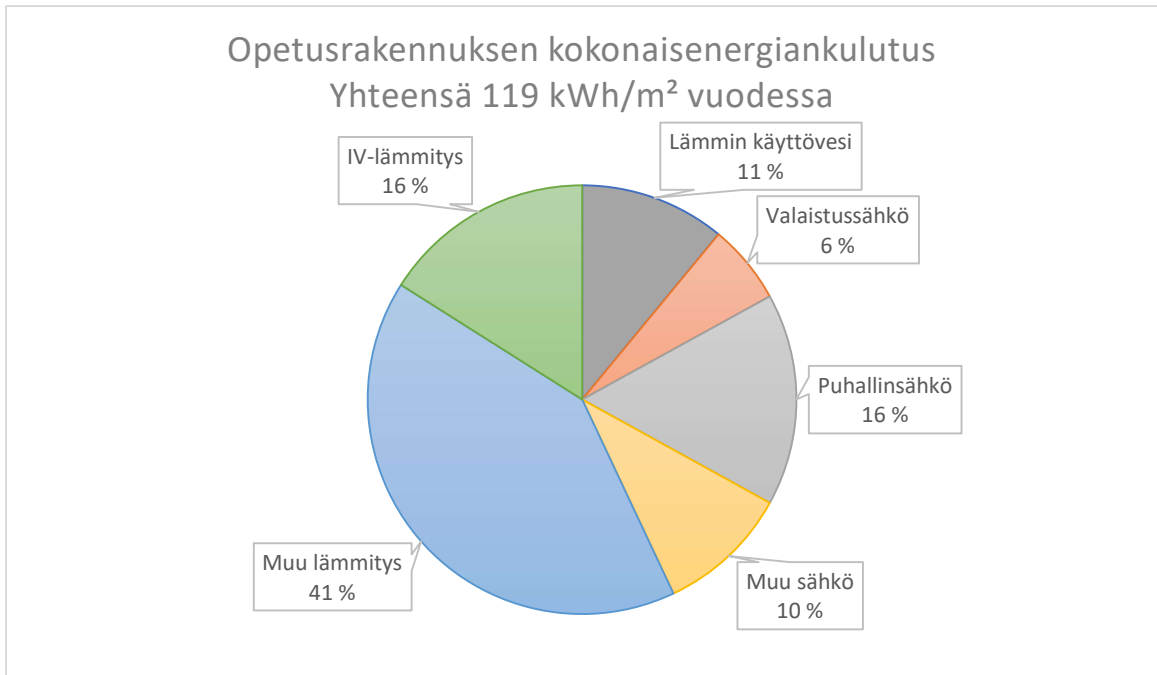
2.5 Rakennusten kokonaisenergiankulutus ja ilmanvaihdon osuus

Euroopan kokonaisenergiankulutuksesta noin 38% on erilaisten rakennuksien käyttämää energiaa ja tämä jakautuu siten, että noin 25% on asuinrakennusten ja 13% on muihin rakennuksiin [12]. Rakennuksien kokonaisenergiankulutuksesta ilmanvaihdon osuus on merkittävä tarvittavan puhallinsähkön ja lämmitysenergian myötä. Finvacin ympäristöministeriön hankkeiden loppuraportin mukaan asuinkerrostalon energiankulutuksesta ilmanvaihdon lämmitykseen kuluu 8% ja puhallinsähkөөn 9% kokonaisenergiankulutuksesta [13]. Kuvan 14 mukaisesti asuinkerrostalon kokonaisenergiankulutus on 113 kWh/m² vuodessa, jolloin puhallinsähkön ja ilmanvaihdon lämmityksen osuus on 19,21 kWh/m². Asuinkerrostalossa ilmamäärät ovat mitoituksellisesti pieniä ja käyttövaihtelut huoneistokohtaisia, joten mahdolliset energiasäästötoimenpiteet jäävät käyttäjän toteutettaviksi esimerkiksi ilmanvaihtokoneen poissaolo, paikallaolo ja tehostus painikkeilla.

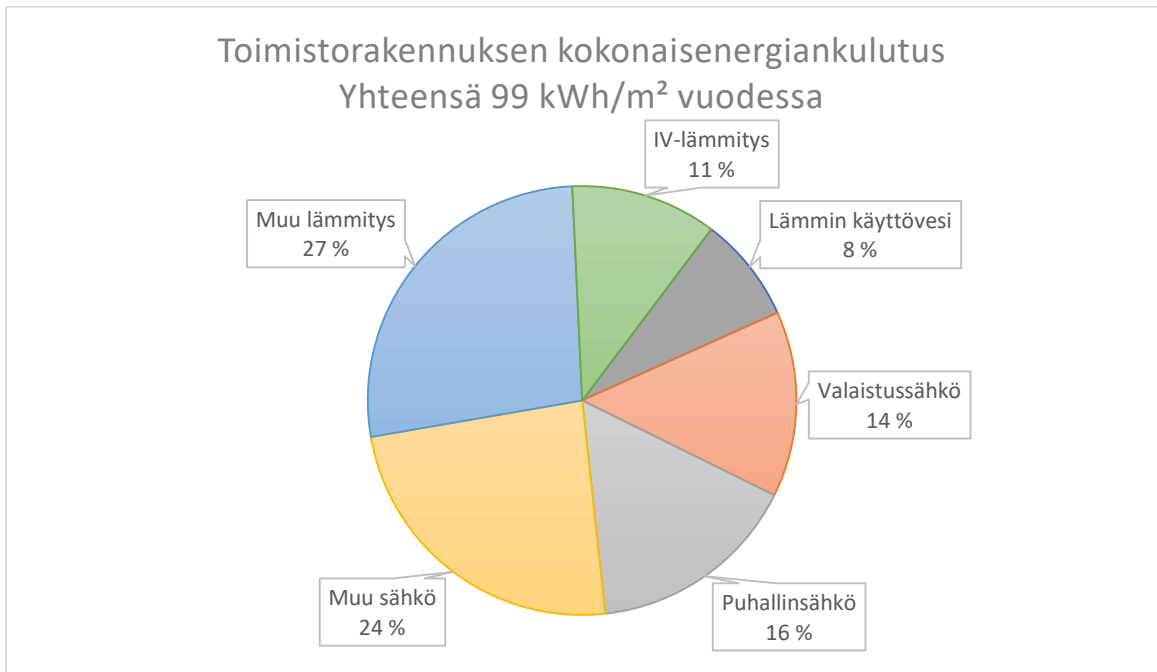


Kuva 14. Asuinkerrostalon kokonaisenergiankulutus lämmöntalteenotollisella ilmanvaihtojärjestelmällä [13, sivu 8].

Opetusrakennusten ja toimistorakennusten mitoitusilmamäärät ovat monesti asuinrakennuksia kovemmat, nousevat myös kyseisissä rakennustyypeissä näiden osuus kokonaisenergiankulutuksesta huomattavasti isommaksi. Kuvassa 15 on esitetty, että ilmanvaihdon lämmityksen osuus on 16% ja puhallinsähkön osuus on 16% kokonaisenergiankulutuksesta. Vuodessa opetusrakennuksissa kuluu energiaa 119 kWh/m², jolloin ilmanvaihdon osuus tästä on 38,08 kWh/m².



Kuva 15. Opetusrakennuksen kokonaisenergiankulutus lämmöntalteenotollisella ilmanvaihtojärjestelmällä [13, sivu 8].



Kuva 16. Toimistorakennuksen kokonaisenergiankulutus lämmöntalteenotollisella ilmanvaihtojärjestelmällä [13, sivu 8].

Toimistorakennuksen kokonaisenergiankulutus on 99 kWh/m² ja sen jakautuminen on esitetty kuvassa 16. Ilmanvaihdon lämmityksen osuus tässä tapauksessa on 11% ja puhallinsähkön osuus 16%. Tällöin toimistorakennuksen kokonaisenergiankulutuksesta 26,73 kWh/m² on ilmanvaihdosta johtuvaa kulutusta.

Puhaltimen sähkönkulutus on suoraan verrannollinen tarvittavan paineentuoton tai ilmavirran välillä. Tällöin puhaltimen osalta ainoat energiankulutukseen vaikuttavat tekijät on sen hetkinen puhaltimen pyörimisnopeus ja hyötysuhde. Rakennusten ilmanvaihtokoneiden puhaltimien tuottaman ilmavirran hyötysuhdetta vertaillaan ominaissähköteholla eli SFP-luvulla (Specific Fan Power). Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta määrää, että jos rakennuksessa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä, tulee ominaissähköteton olla enintään 1,8 kW/(m³/s) [14].

SFP-luvun voi laskea yhtälöllä 3:

$$SFP = \frac{P_T + P_P}{q_v} \quad (3)$$

SFP = Ominaissähköteto [kW/(m³/s)]

P_T = Tuloilmapuhaltimen ottoteho mitoituspisteessä [kW]

P_P = Poistoilmapuhaltimen ottoteho mitoituspisteessä [kW]

q_v = Ilmanvaihtokoneen tulo- tai poistoilmavirroista suurempi [m³/s]

Mitoituspisteessä tai maksimikäyttötilanteessa suurin puhallinsähkön kulutukseen vaikuttava tekijä on puhaltimen hyötysuhde. Kuitenkin energiankulutuksen kannalta parasta olisi, jos ylimääräistä ilmaa ei vaihdeta, jolloin puhaltimen pyörimisnopeuden tiputus vaikuttaa kokonaisenergiankulutukseen lähes samassa suhteessa prosentuaalisesti. Pieniä prosentuaalisia eroja voi tulla siitä, että eri pyörimisnopeudella puhaltimen hyötysuhde vaihtelee, mutta joka tapauksessa energiankulutus muuttuu pyörimisnopeuden mukaan.

Kuvissa 14, 15 ja 16 on esitetty rakennuksien kokonaisenergiankulutus, kun ilmanvaihto on toteutettu lämmöntalteenotolla. Nykyiset lämmöntalteenottojärjestelmät voivat olla hyötysuhteeltaan jopa yli 85%, jolloin huoneilmasta poistettavasta ilmasta saadaan otettua lämpöenergiaa talteen ja siirrettyä se ulkoa tuotavaan kylmään ilmaan. Tällöin ilmanvaihtoon tarvittava tuloilman lämmitysenergiatarve pienenee radikaalisti. Taulukossa 1 on esitetty keskeisiä energiankulutuskertoimia, kun rakennuksessa ei ole lämmöntalteenottoa.

Taulukko 1. Rakennuksen ilmanvaihdon keskeisiä energiankulutuksia perustuen Finvacin selvitykseen [13, sivu 8].

Kokonaisenergiankulutus ilman ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa			
Rakennustyyppi	Asuinkerrostalo	Opetusrakennus	Toimistorakennus
Kokonaisenergiankulutus ilman LTO:ta	167 kWh/m ²	187 kWh/m ²	208 kWh/m ²
Ilmanvaihdon osuus	Puhallin 4% Lämmitys 23%	Puhallin 6% Lämmitys 39%	Puhallin 5% Lämmitys 46%
Ilmanvaihdon energiankulutus	45,09 kWh/m ²	84,15 kWh/m ²	106,08 kWh/m ²
Kokonaisenergiankulutus ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla			
Kokonaisenergiankulutus LTO:lla	113 kWh/m ²	119 kWh/m ²	99 kWh/m ²
Ilmanvaihdon osuus	Puhallin 9% Lämmitys 8%	Puhallin 16% Lämmitys 16%	Puhallin 16% Lämmitys 11%
Ilmanvaihdon energiankulutus	19,21 kWh/m ²	38,08 kWh/m ²	26,73 kWh/m ²
Ero lämmöntalteenotolliseen rakennukseen			
Tehontarpeen muutos	+ 25,88 kWh/m ²	+ 46,07 kWh/m ²	+ 79,35kWh/m ²
Tehontarpeen muutos prosenteissa	+ 134 %	+ 120 %	+ 296 %

Finvacin ympäristöministeriön hankkeiden loppuraportin mukaan ilman ilmanvaihdon lämmöntalteenottoa ilmanvaihdon osuus kokonaisenergiankulutuksesta olisi asuinkerrostaloissa 134% korkeampi, opetusrakennuksissa 120% korkeampi ja toimistorakennuksissa jopa 296% korkeampi. Tästä syystä hyvällä lämmöntalteenotolla on suurempi merkitys rakennuksen ilmanvaihdon kokonaisenergiankulutukseen, kuin puhaltimien ottamalla energialla, mutta nykymääräyksien mukaisella ilmanvaihdon lämmöntalteenotolla varustetussa järjestelmässä lämmityksen osuus energiankulutuksesta on jopa pienempi, kuin puhaltimien ottama teho.

Ilmanvaihdon puhaltimien ottama sähköteho on jatkuvaa ja on suoraan verrannollinen puhaltimen pyörimisnopeuteen, kun taas ilmanvaihdon lämmitys riippuu lämmitysenergian tarpeesta ja lämmöntalteenoton sen hetkisestä hyötysuhteesta. Näistä syistä tarpeenmukainen ilmanvaihto on järkevää toteuttaa sellaisiin kohteisiin, joihin se saadaan kustannustehokkaasti toteutettua. Yleisesti opetusrakennukset ja toimistorakennukset ovat sellaisia rakennustyyppejä, joissa on isoille ihmismassoille suunniteltuja huonetiloja, joiden käyttöaste voi muuttua päivän aikana radikaalisti. Tällöin tarpeenmukainen ilmanvaihto on toteutettavissa järkevästi huonekohtaisesti tehostamalla, koska energiansäästöpotentiaali kattaa järjestelmän perustamiskustannukset.

3 Ilmanvaihdon tehostus

Energiankulutuksen kannalta järkevintä on vaihtaa ilmaa pelkästään sen verran, kun on tarpeen, jolloin huonetiloissa joissa on isot ilmavirrat ja laajat käyttöastevaihtelut toteutetaan tarpeenmukainen muuttuvilmavirtainen ilmanvaihtojärjestelmä. Jos ilmanvaihtojärjestelmässä on muuttuvilmavirtaisia osa-alueita, kanavistotasapainotuksen hallitsemiseksi yleisesti käytetään vakioilmavirtaisille kanavahaaroille mekaanisesti toimivia vakioilmavirtasäätimiä tai vakiopaineohjattuja vakiopainesäätimiä. Kanavistoja on myös toteutettu siten, että vakioilmavirtaisille haaroille ei ole erikseen rakennettu ilmavirran säätöä, tällöin kuitenkin vaarana on se, että tehostusten aktivoituessa kanavistotasapainotus muuttuu ja tällöin suunnitellut ilmavirrat eivät välttämättä toteudu.

3.1 Ilmamääräsäätimillä toteutettu tehostus

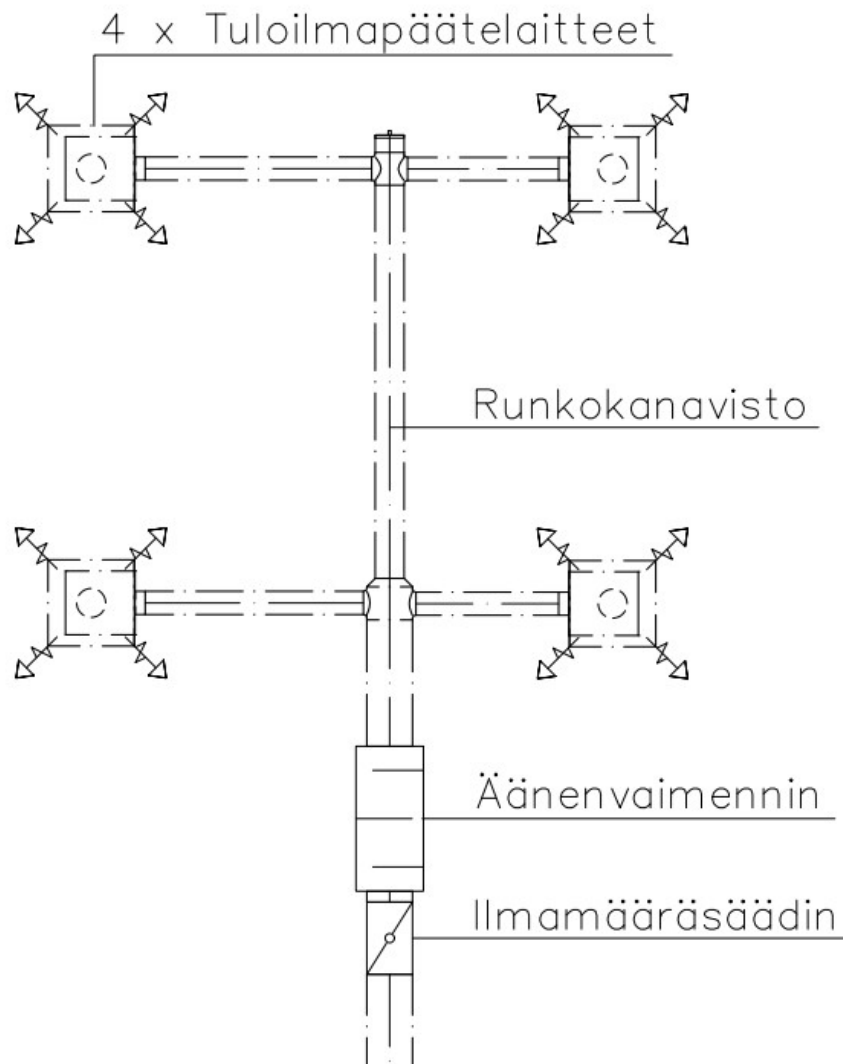
Tarpeenmukaisen ilmanvaihdon toteutukseen on nykypäivänä yleisesti käytetty kanavistoon erikseen asennettavia ilmamääräsäätimiä, jotka aktiivisesti mittaavat ja säätävät säätimen palvelualueen ilmavirtaa. Ilmamääräsäätimien ilmavirran mittaustekniikoita on pääsääntöisesti kolme erilaista: ultraäänimittaus, paine-ero mittaus säätöpellistä tai mittaristikosta. Paine-ero mittauksella varustetuissa ilmamääräsäätimissä on havaittu, että ajansaatossa mittauspisteiden paine-ero antureiden likaantumiset ja tukkiutumiset aiheuttavat mittaepätarkkuutta, jolloin ilmamääräsäädin ei säädä ilmavirtaa todellisuudessa oikeaan säätöarvoon, vaikka mittaustulos niin väittäisikin.



Kuva 17. FläktGroupin EMSS-virtaussäädin [2]

Kuvassa 17 on esitetty FläktGroupin tuottama versio mittalaipallisesta ilmamääräsäätimestä, jossa painemittaus tapahtuu kiinteän mittalaipan molemmin puolin ja tämän mittaustuloksen perusteella toimilaitte kääntää moottoriohjattua sulkupeltiä. Laitteen mittatarkkuuteen vaikuttaa erinäiset kanaviston ilmavirtauksia muuttavat tekijät, kuten kanavistomutkat tai T-haarat. Valmistajat ilmoittavat näille suojaetäisyydet, yleensä 0 - 4 kertaa kanavan poikkihalkaisijan pituus, joita noudattamalla saavutetaan valmistajan ilmoittama suhteellisen hyvä mittatarkkuus.

Ultraäänimittauksilla varustetuissa ilmamääräsäätimissä ilmavirran mittaus on toteutettu kanavan poikki kulkevalla ultraäänisignaalilla ja ilmavirta lasketaan siitä, kuinka paljon signaali taittuu ilmavirran myötä kanavan halkaisijan matkalla. Tällä mittausmenetelmällä ei ole mittauslaitteiston pölyyntymisongelmaa, mutta nämäkään ilmamääräsäätimet eivät kokemusperäisesti ole olleet ongelmattomia.



Kuva 18. Ilmamääräsäätimellä toteutettu huoneen ilmanvaihto

Yleisesti ilmamääräsäädin liitetään kuvassa 18 esitetyllä tavalla koko huonetta palvelevaan kanavahaaraan ja tällöin se säätelee koko huoneen ilmanvaihdon päätelaitteita kerralla. Tällöin liian radikaali ilmamäärien tiputus voi aiheuttaa päätelaitteiden ilman heittopituuden romah-
tamista, eikä näin ollen huonetila huuhtoudu kovin tehokkaasti. Tällaisessa järjestelmässä päätelaitteen sopiva mitoitus on ensiarvoisen tärkeää, jotta myös ilmanvaihdon tehostamat-
tomassa tilassa saataisiin mahdollisimman hyvin huuhteleva ilmanvaihto.

3.2 On/off-pelleillä toteutettu tehostus

Ilmamääräsäätimien ongelmien takia monet rakennuksien omistajat ovat kieltäneet aktiivisella mittauksella varustettujen ilmamääräsäätimien suunnittelemisen ja toteuttamisen, joten vaihtoehdoksi ilmanvaihdon tehostukselle on jäänyt erillisellä tehostuskanavistolla ja kuvan 19 kaltaisella on/off-pelistöllä toteutettu ilmanvaihto. Tällöin saadaan ”toimintavarma” tekniikka, koska huoltokohteita on vähemmän, mutta todellisuudessa näiden ilmanvaihtoverkostojen toiminnasta ei ole tarkkaa tietoa jokaisen käyttötilanteen osalta, koska aktiivista ilmavirran mittausta tällaisiin järjestelmiin toteutetaan vähän.

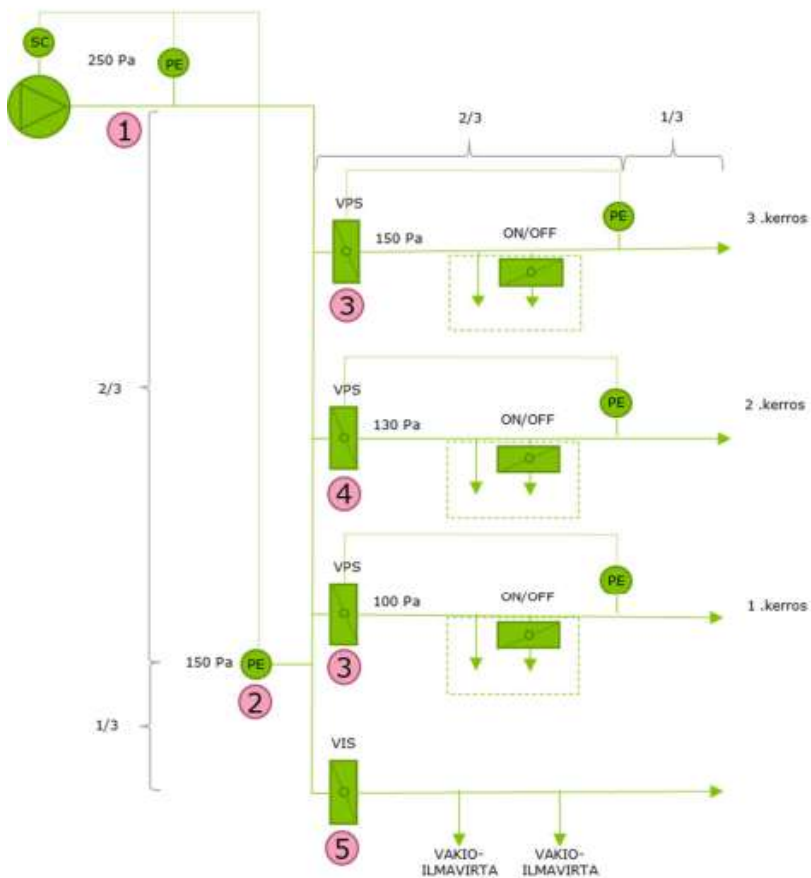


Kuva 19. FläktGroup BDEP sulkupelti ilman peltimoottoria [2]

Yleisesti on/off-pellein toteutettu kanavisto poikkeaa IMS-kanavistosta siten, että osa huoneen päätelaitteista on jatkuvasti käytössä ja tehostuskanaviston päätelaitteet vasta sitten, kun on/off-pelti on auki eli kun tehostustilanne on aktivoitu. Huoneen ilmamäärät voidaan jakaa mitoituksellisesti esimerkiksi tehostamattomalle päätelaitteille rakentamismääräyksien minimiarvoille ja tehostuskanaviston perässä oleville päätelaitteille loput huonetilan mitoituksellisesta kokonaisilmavirrasta esimerkiksi sisäilmastoluokituksen S2 huonetilan henkilömäärään perustuvan ilmavirran perusteella.

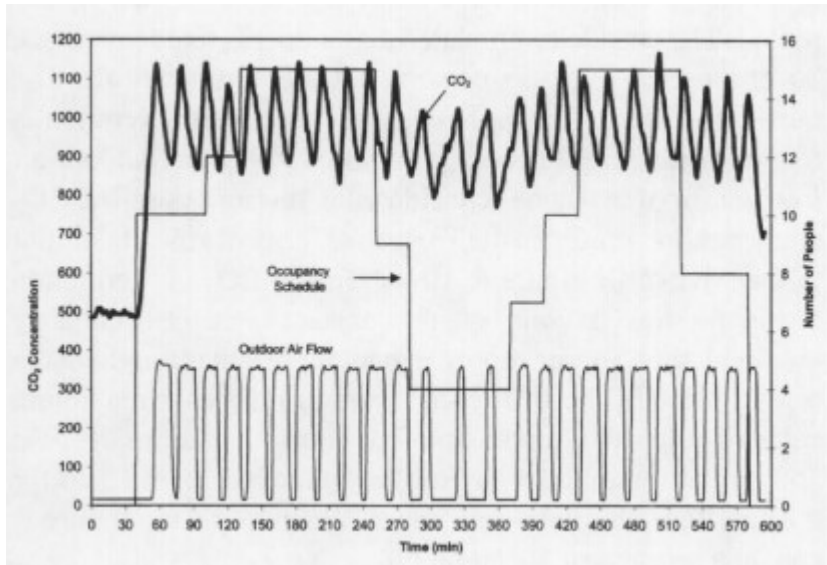
Tällöin esimerkiksi huoneen maksimikäytön mitoituksellisesta kokonaisilmavirrasta 30% on jatkuvasti päällä ja loput ilmavirrasta mitoitetaan tehostuskanavistolle. Esimerkkikuvia toteutetuista järjestelmistä esitetään työn luvussa 4. Simuloitavat kanavistot. Tällä tavalla toteutettuna tuloilmapäätelaitteiden heittopituudet ovat paremmin hallinnassa niin käyttöajan ulkopuolella, kuin tehostustilanteessa, jolloin saadaan huuhdeltua koko huonetila käyttöasteesta riippumatta.

Helsingin kaupungin laatimassa tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän ohjeessa mainitaan, että tällaisessa järjestelmässä jokaisella pääkytkentähaaralla tulee olla vakio painesäätimet tai jos haarakanavassa ei ole muuttuvilmavirtaisia haaroja, voidaan käyttää vakioilmavirtasäädintä. Kuvassa 20 on esitetty on/off-pellein suunnitellun järjestelmän painesäädön toteutusperiaatteet. Ohjeessa sanotaan myöskin, että ilmanvaihtokoneen puhaltimen ohjaus on toteutettava on/off-säätöisessä järjestelmissä aina vakio painesäätöisenä, mutta IMS-järjestelmään nähden etuna on, ettei on/off-pellit tarvitse suojaetäisyyksiä, koska laitteissa ei ole aktiivista mittausta. [8]

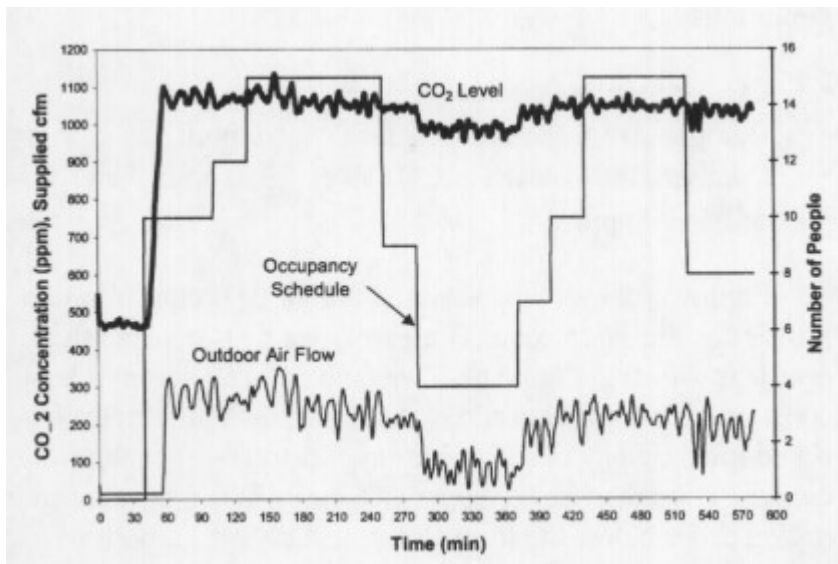


Kuva 20. On/off-säätöisen järjestelmän painesäädön periaatekuva [8, sivu 21]

on/off-pellein toteutetulla tehostuksella toteutettuna ilmanlaatu ei pysy niin tasaisena, kuin mitä ilmamääräsäätimillä toteutettuna [15]. Kuvassa 21 voidaan nähdä, kuinka CO₂ pitoisuus vaihtelee radikaalisti, koska on/off-säädöllä ilmanvaihdon tehostuksen määrän muutos on raju. Kuvassa 22 taas on lineaarisella ilmanvaihdon tehostussäädöllä toteutettu ilmanvaihto, jossa CO₂ pitoisuus ja ilmamäärät pysyvät lähes vakiona.



Kuva 21. Yksittäisellä mittaus-säätö parametrilla toteutettu ilmanvaihdon tehostus on/off-säätöperiaatteella [15, sivu 311]



Kuva 22. Yksittäisellä mittaus-säätö parametrilla toteutettu ilmanvaihdon tehostus lineaarisella säätöperiaatteella [15, sivu 311]

4 Simuloitavat kanavistot

Kanavistojen simulointia varten MagiCadilla laaditaan kuusi erilaista tuloilmakanavistoa, joissa jokaisessa on viisi identtistä huonetta. Kanavistosta tarkasteltavien laskentapisteiden sijainti on laskentatapauskohtainen ja laskentapisteiden määrä vaihtelee 11 – 20 pisteen välillä. Laskentapisteestä tarkastellaan suunniteltu ilmavirta $q_{v\ set}$ [dm^3/s], todellinen simuloitu ilmavirta q_v [dm^3/s], kanavan kokonaispaine p_t [Pa], ja kanavan staattinen paine p_{st} [Pa].

4.1 Kanavistovariaatiot

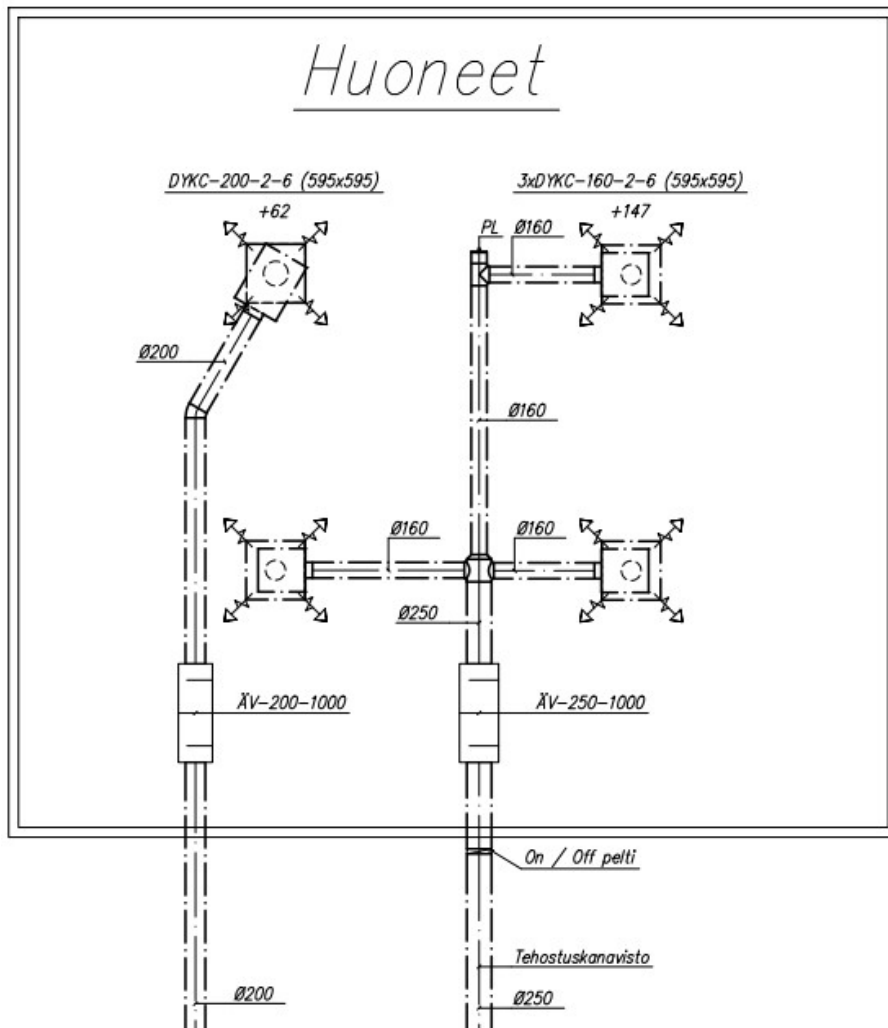
4.1.1 Laskentatapaus 1.

Laskentatapauksissa 1. simuloidaan kanavistoa siten, että tehostamaton kanava on pelkkää suoraa kanavaa ilman aktiivista säätölaitetta ja tehostuskanavistossa on/off-pelti, jolloin ainoa kanavistossa muuttuva tekijä on on/off-pellin asennot. Kanavat liitetään huoneiden viereissä kulkevaan runkokanavaan. Huoneiden ilmanvaihtokanavisto esitetty kuvassa 23.

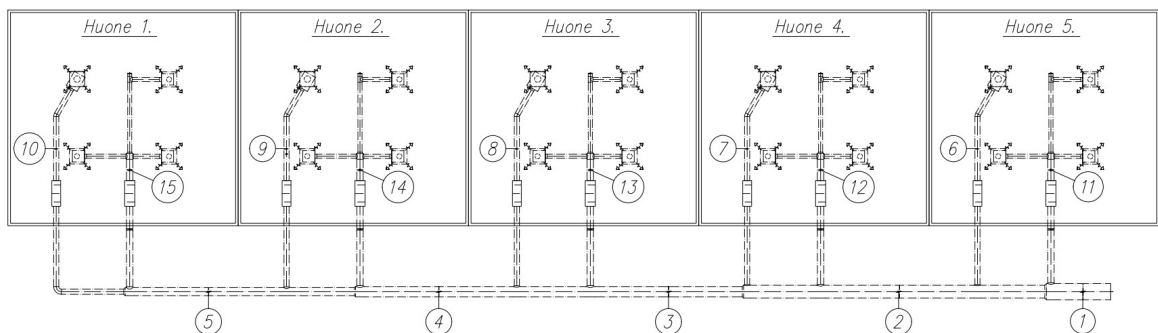
Kanavistovariaatio on valittu tutkimukseen, koska tällaisia kanavistoja on toteutettu, mutta kokemusperäisesti nämä eivät ole toimineet moitteetta vaan ovat aiheuttaneet eri tilanteissa esimerkiksi ääniongelmia viereisiin huoneisiin. Peruseriaatteena tällaisessa kanavistovariaatiossa on, että ilmanvaihtokoneen kanavapainemittaus toteutettaisiin kanaviston loppupäästä, jolloin kanavistotasapaino pysyisi hallinnassa.

Laskentatapaus 1. laskentapisteet on esitetty kuvassa 24.

- Pistet 1. – 5. ovat runkokanavistossa
- Pistet 6. – 10. ovat tehostamattomassa kanavistossa
- Pistet 11. – 15. ovat tehostuskanaviston on/off-pellin jälkeisessä kanavistossa



Kuva 23. Normaalijajan ilmanvaihtokanavisto suoralla kanavalla, tehostuskanavisto on/off-pellillä



Kuva 24. Laskentatapaus 1. Normaalijajan ilmanvaihtokanavisto suoralla kanavalla, tehuskanavisto on/off-pellillä ja liitosrunkokanavaan. Kuvassa myös laskentapisteen 1. – 15.

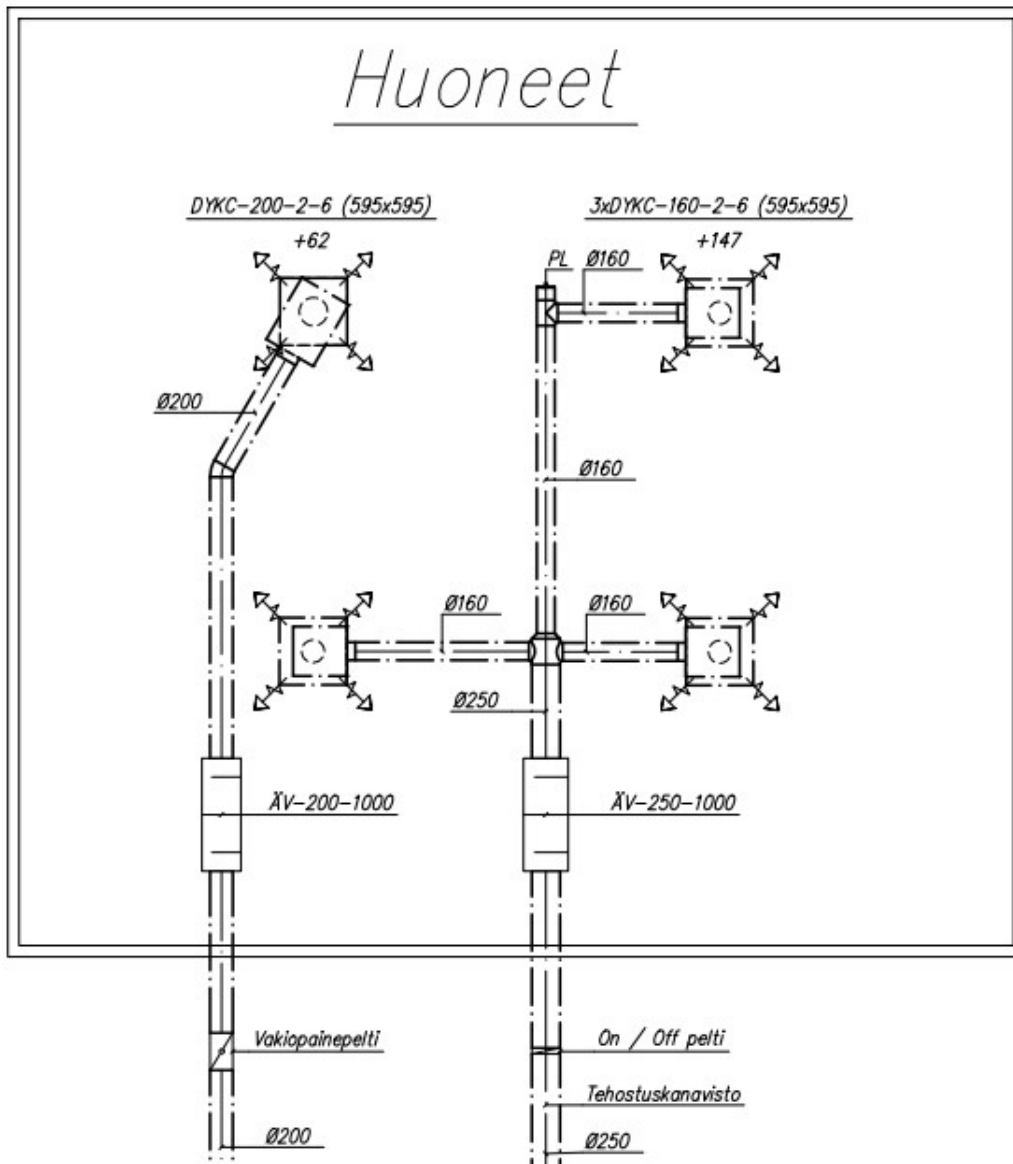
4.1.2 Laskentatapaus 2.

Laskentatapauksissa 2. simuloidaan kanavistoa siten, että tehostamattomassa kanavassa on vakiopainepelti ja tehostuskanavistossa on/off-pelti. Kanavistossa olevat muuttujat ovat siis on/off-pelti ja vakiopainepelti. Laskentatapauksessa 2. kanavat liitetään huoneiden vieressä kulkevaan runkokanavaan. Huoneiden kanavistovariaatio esitetty kuvassa 25 ja runkokanavisto, sekä laskentapistee on esitetty kuvassa 26.

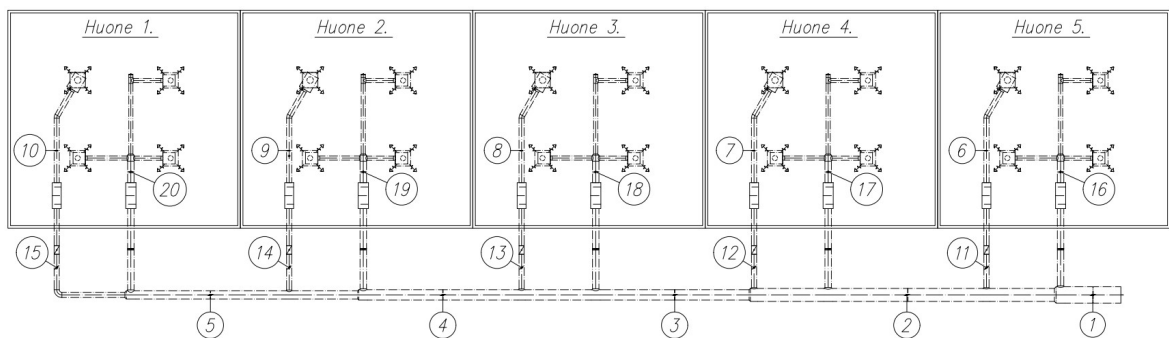
Kanavistovariaatio mukailee laskentatapaus 1. kanavistoa, mutta tutkimukseen kanavistovariaatio on valittu, jotta voidaan todeta auttaako vakiopainepelti pitämään kanavistotasapainoa yllä.

Laskentatapaus 2. laskentapistee:

- Pisteet 1. – 5. ovat runkokanavistossa
- Pisteet 6. – 10. ovat tehostamattomassa kanavistossa
- Pisteet 11. – 15. ovat tehostamattomassa kanavassa vakiopainepellin jälkeisessä kanavistossa
- Pisteet 16. – 20. ovat tehostuskanaviston on/off-pellin jälkeisessä kanavistossa



Kuva 25. Normaalijan ilmanvaihtokanavisto vakiopainePELLillä, tehostuskanavisto on/off-PELLillä, liitos runkokanavaan / kammioon



Kuva 26. Laskentatapaus 2. Normaalijan ilmanvaihtokanavisto vakiopainePELLillä, tehostuskanavisto on/off-PELLillä ja liitos runkokanavaan. Kuvassa myös laskentapistet 1. – 20.

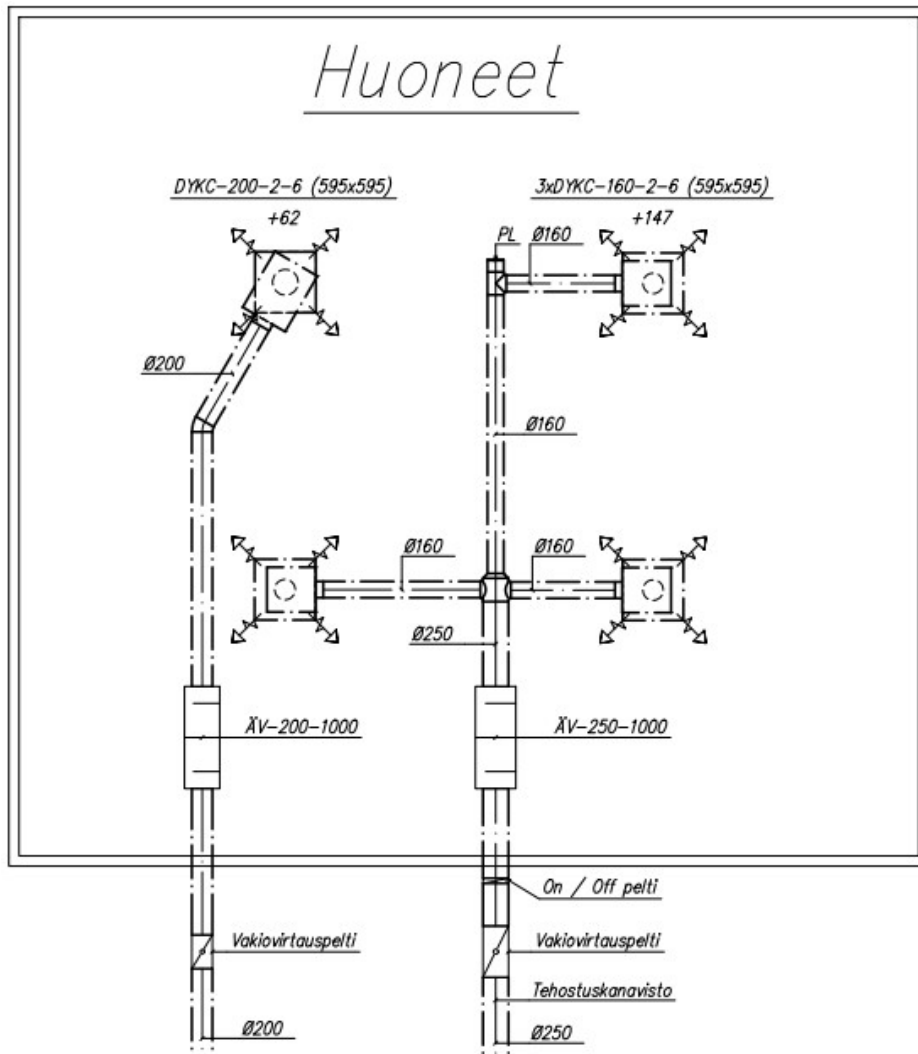
4.1.3 Laskentatapaus 3.

Laskentatapauksessa 3. simuloidaan kanavistoa siten, että molemmissa kanavissa on vakiovirtauspelti ja tehostuskanavistossa on/off-pelti. Kanavistossa olevat muuttujat ovat vakiovirtauspellit ja on/off-pellit. Haarat liitetään huoneiden vieressä kulkevaan runkokanavaan. Huoneiden kanavistovariaatio esitetty kuvassa 27 ja runkokanavisto, sekä laskentapistet on esitetty kuvassa 28.

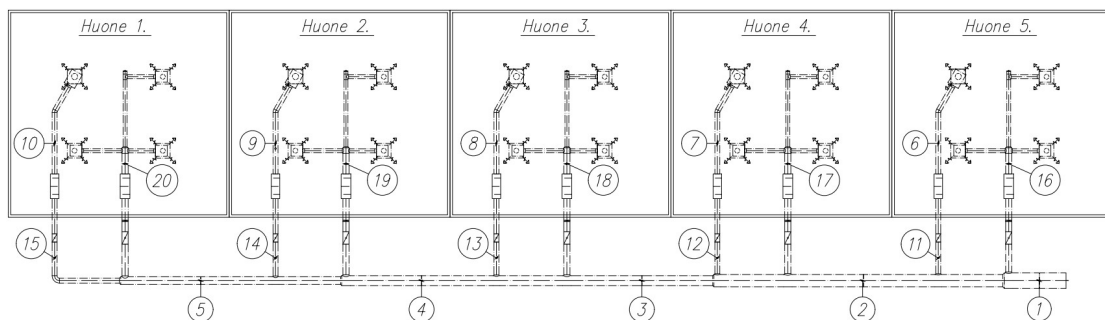
Kanavistovariaatio on valittu tutkimukseen sillä periaatteella, että voidaanko kanavistotaspainoa ylläpitävä aktiivinen säätö toteuttaa mekaanisilla vakiovirtauspelleillä.

Laskentatapaus 3. laskentapistet:

- Pisteet 1. – 5. ovat runkokanavistossa
- Pisteet 6. – 10. ovat tehostamattomassa kanavistossa
- Pisteet 11. – 15. ovat tehostamattomassa kanavassa vakiovirtauspellin jälkeisessä kanavistossa
- Pisteet 16. – 20. ovat tehostuskanaviston on/off-pellin jälkeisessä kanavistossa



Kuva 27. Normaalijan ilmanvaihtokanavisto vakiovirtauspellillä, tehostuskanavisto vakiovirtauspellillä ja on/off-pellillä, liitos runkokanavaan



Kuva 28. Laskentatapaus 3. Normaalijan ilmanvaihtokanavisto vakiovirtauspellillä, tehostuskanavisto vakiovirtauspellillä ja on/off-pellillä, liitos runkokanavaan. Kuvassa myös laskentapisteet 1. – 20.

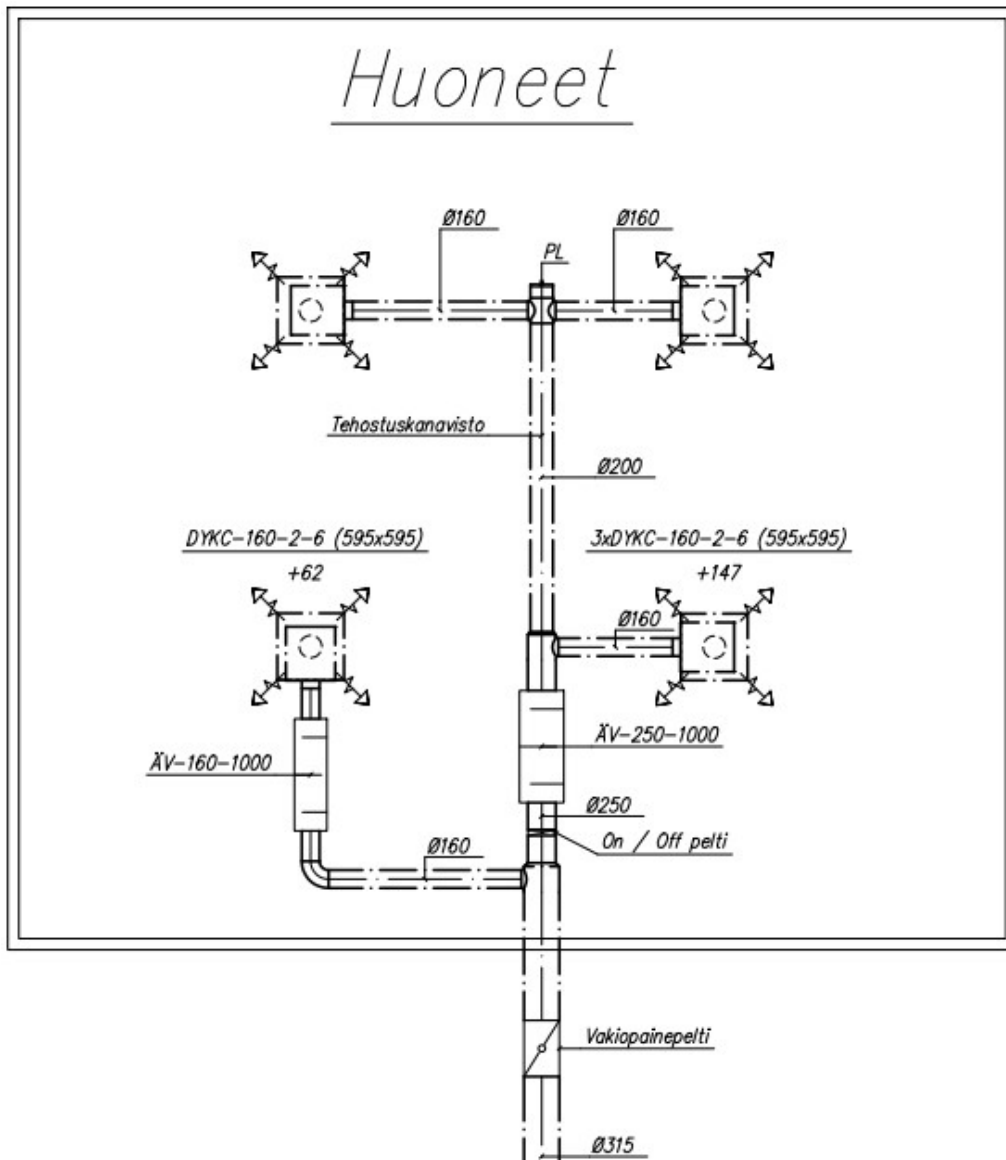
4.1.4 Laskentatapaus 4.

Laskentatapauksessa 4. simuloidaan kanavistoa siten, että huoneeseen kulkeva ainoa kanavahaara varustetaan vakiopainepellillä, jonka jälkeen haarautuu tehostamaton kanavahaara, sekä tehostuskanavisto on/off-pellillä. Kanavistossa muuttuvat tekijät ovat vakiopainepellit ja on/off-pellit. Koko huonetta palveleva kanavahaara liitetään huoneiden vieressä kulkevaan runkokanavaan. Huoneiden kanavistovariaatio esitetty kuvassa 29 ja runkokanavisto, sekä laskentapisteen on esitetty kuvassa 30.

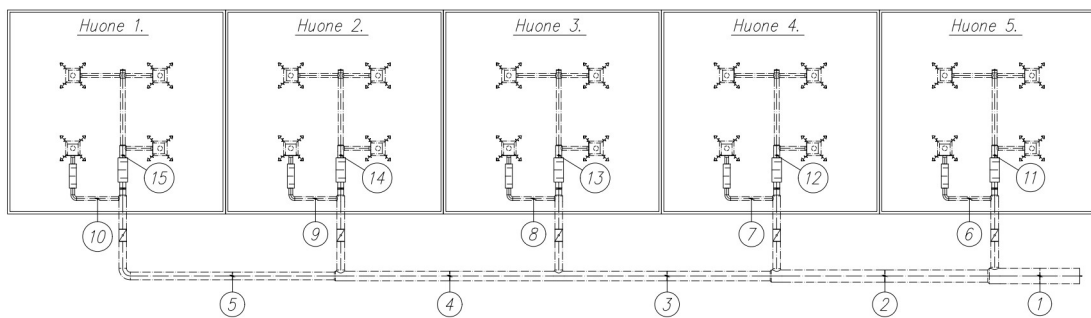
Tutkimukseen kanavistovariaatio on valittu, koska se mukailee Helsingin Kaupungin ohjeistusta tarpeenmukaisesta ilmanvaihtojärjestelmästä, kun käytetään on/off-peltejä.

Laskentatapaus 4. laskentapisteen:

- Pisteet 1. – 5. ovat runkokanavistossa
- Pisteet 6. – 10. ovat tehostamattomassa kanavahaarassa
- Pisteet 11. – 15. ovat tehostuskanaviston on/off-pellin jälkeisessä kanavistossa



Kuva 29. Huoneeseen haarautuvassa kanavahaarassa vakiopainepelti, normaaliajan ilmanvaihtokanavisto haarautuu omaksi haaraksi ja tehostuskanavisto on varustettu on/off-pellillä



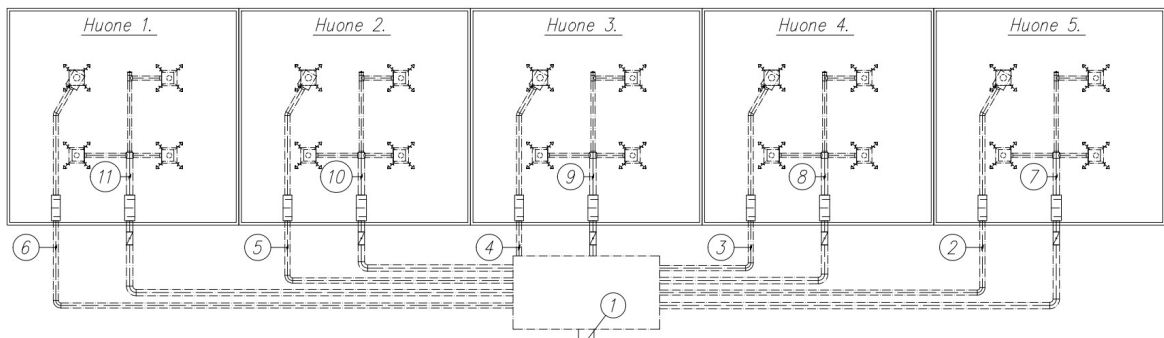
Kuva 30. Laskentatapaus 4. runkokanavisto ja laskentapisteet 1. – 15.

4.1.5 Laskentatapaus 5

Laskentatapauksessa 5. huoneiden kanavistot ovat vastaavat, kuin laskentatapauksessa 1, mutta kaikki kanavat liitetään tuloilmakammioon. Kanavistovariaatio on valittu tutkimukseen sillä periaatteella, että onko runkoratkaisulla vaikutusta kanavistovariaation toimintaan. Laskentapisteen on esitetty kuvassa 31.

Laskentatapaus 5. laskentapisteen:

- Piste 1. on tuloilmakammiossa
- Pisteet 2. – 6. ovat tehostamattomassa kanavistossa
- Pisteet 7. – 11. ovat tehostuskanaviston on/off-pellin jälkeisessä kanavistossa



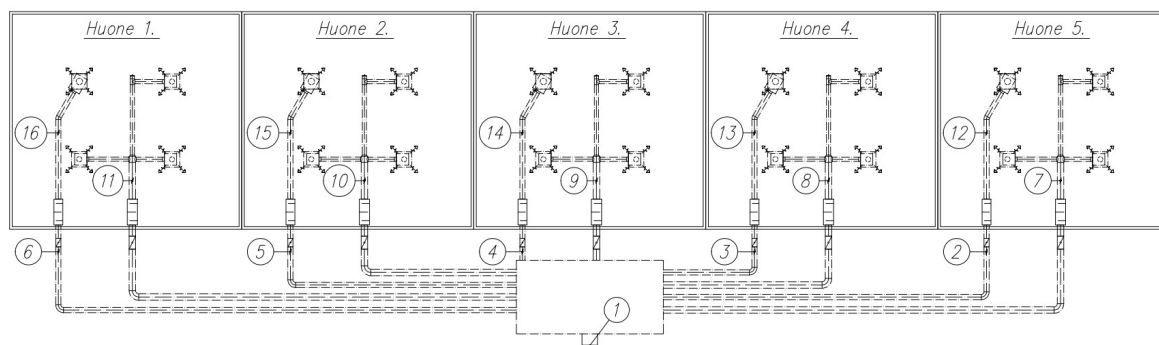
Kuva 31. Laskentatapaus 5. Normaaliajan ilmanvaihtokanavisto suoralla kanavalla, tehostuskanavistossa on/off-pelti ja kanavaliitokset suoraan kammioon. Kuvassa myös laskentapisteen 1. – 11.

4.1.6 Laskentatapaus 6

Laskentatapauksessa 6. huoneiden kanavistot ovat vastaavat, kuin laskentatapauksessa 2, mutta kaikki kanavat liitetään tuloilmakammioon. Kanavistovariaatio on valittu tutkimukseen sillä periaatteella, että onko runkoratkaisulla vaikutusta kanavistovariaation toimintaan. Laskentapisteen on esitetty kuvassa 32.

Laskentatapaus 6. laskentapisteen:

- Piste 1. tuloilmakammiossa
- Pisteet 2. – 6. ovat tehostamattomassa kanavistossa ennen vakiopainepellin
- Pisteet 7. – 11. ovat tehostuskanaviston on/off-pellin jälkeisessä kanavistossa
- Pisteet 12. – 16. ovat tehostamattomassa kanavistossa vakiopainepellin jälkeen



Kuva 32. Laskentatapaus 6. Normaaliajan ilmanvaihtokanavisto vakiopainepellillä, tehostuskanavistossa on/off-pelti ja kanavaliitokset suoraan kammioon. Kuvassa myös laskentapisteen 1. – 11.

4.1.7 Simuloinnit

Simulointeja suoritetaan jokaisella kanavistovariaatioilla seitsemän kappaletta. Maksimi ilmavirta jokaisessa huoneessa neljästä tuloilmapäätelaitteesta on 209 dm³/s. Yksi huonetilojen neljästä päätelaitteesta mitoitetaan ilmanvaihdon tehostamattomalle vakioilmamäärälle 62 dm³/s ja loput kolme ovat tehostusilman päätelaitteita 147 dm³/s ilmamäärällä. Tällöin simuloitavan järjestelmän kokonaisilmavirta vaihtelee 310 - 1045 dm³/s välillä.

Simulointeja suoritetaan jokaisella kanavistovariaatiolla seitsemän:

1. Simulointi:

Kaikki tehostuskanavistojen on/off-pellit auki

Kokonaisilmamäärä 1045 dm³/s.

2. Simulointi:

Huoneiden 1. – 5. tehostuskanaviston on/off-pellit kiinni

Kokonaisilmamäärä 310 dm³/s.

3. Simulointi:

Huoneiden 2. ja 3. tehostuskanavistojen on/off-pellit kiinni

Kokonaisilmamäärä 751 dm³/s.

4. Simulointi:

Huoneen 1. tehostuskanaviston on/off-pelti kiinni,

Kokonaisilmamäärä 898 dm³/s.

5. Simulointi:

Huoneiden 2. – 5. tehostuskanaviston on/off-pellit kiinni,

Kokonaisilmamäärä 457 dm³/s.

6. Simulointi:

Huoneiden 3. ja 5. tehostuskanaviston on/off-pellit kiinni

Kokonaisilmamäärä 751 dm³/s.

7. Simulointi:

Huoneiden 1., 2. ja 4. tehostuskanaviston on/off-pellit kiinni

Kokonaisilmamäärä 604 dm³/s.

Taulukossa 2 on esitetty simulointien 1 - 7 tehostuskanavistojen on/off-peltien asento simulointitapauskohtaisesti ja laskennallinen järjestelmän haluttu kokonaisilmamäärä kyseisellä simulointivariaatiolla. Simulointivariaatiot on valittu siten, että kanaviston käyttäytymisestä saadaan mahdollisimman kattava käsitys eri tehostustilanteiden aikana.

Taulukko 2. Simulointivariaatiot taulukoituna

Simulointi	Ilmamäärä	Huone 1.	Huone 2.	Huone 3.	Huone 4.	Huone 5.
1.	1045 dm ³ /s	Auki	Auki	Auki	Auki	Auki
2.	310 dm ³ /s	Kiinni	Kiinni	Kiinni	Kiinni	Kiinni
3.	751 dm ³ /s	Auki	Kiinni	Kiinni	Auki	Auki
4.	898 dm ³ /s	Kiinni	Auki	Auki	Auki	Auki
5.	457 dm ³ /s	Auki	Kiinni	Kiinni	Kiinni	Kiinni
6.	751 dm ³ /s	Auki	Auki	Kiinni	Auki	Kiinni
7.	604 dm ³ /s	Kiinni	Kiinni	Auki	Kiinni	Auki

MagiCad ohjelmistossa ei mallinnus hetkellä ole työkalua, jolla voisi tällaista kanavistoa simuloida suoraan, mutta kanaviston simulointi onnistuu yksi laskentatapaus kerrallaan sitten, että mitoitetaan koko kanavisto ”Summation” komennolla ja tämän jälkeen kanavisto tasapainoitetaan ”Balancing” komennolla.

Koska oikeassa kanavistossa olevien kertosäätteisten päätelaitteiden ja muiden säätölaitteiden säätörvoja ei muuteta sen jälkeen kun ilmanvaihtojärjestelmä mitataan ja säädetään tasapainoon, täytyy tasapainotuksen jälkeen ohjelmasta lukita kyseiset säätävät laitteet. Tällöin saadaan simuloitua kanaviston todelliset laskennalliset virtaukset ja paineet.

Simuloitaessa on/off-pellin toimintaa on katkaistava ohjelmassa kyseinen kanavahaara, jonka halutaan olevan simulointitapauksessa kiinni. Tämän jälkeen ohjelman ”Extended flow analysis” työkalulla voidaan tarkastella kyseisen laskentatapauksen kanaviston virtaamia ja paineita. Vakiokammioaine säätöä voidaan simuloida ottamalla maksimitilanteen kanavapaine ja syöttämällä se ”Calculation settings” valikon ”Pressure specified by sensor” kohtaan.

Vakiopainemittauspistettä, jolla voisi järjestelmän mitoitaa, ei mitoitushjelmassa voi käytettävissä olevalla MagiCad versiolla valita, joten kanavapainemittauksien simulointia ei saa toteutettua realistisesti, mutta minimipaineella voidaan tuloksia tulkitsemalla vertailla kanavapaineen pysyvyyttä kammiossa tai runkokanaviston eri osissa. Laskentatapauksen minimipaine, jolla voidaan tuottaa laskentatapauksen kokonaisilmavirta, saadaan simuloitua ”Minimum pressure for air flow set values” ja ”Calculate adjustment for unlocked flow dampers” mitoituksella.

5 Simuloinnit ja tulokset

Simulointituloksia on todella suuri määrä, joten alla esitetään taulukoissa 3. – 8. kunkin laskentatapauksen 1. Simulointi eli maksimikäyttöaste, johon kanavisto ja päätelaitteet todellisuudessakin tasapainotetaan. Simulointitulokset 2. – 7. on esitetty liitteessä 1.

5.1 Laskentatapaus 1. Tulokset

Taulukko 3. Laskentatapaus 1; 1. Simuloinnin Tulokset

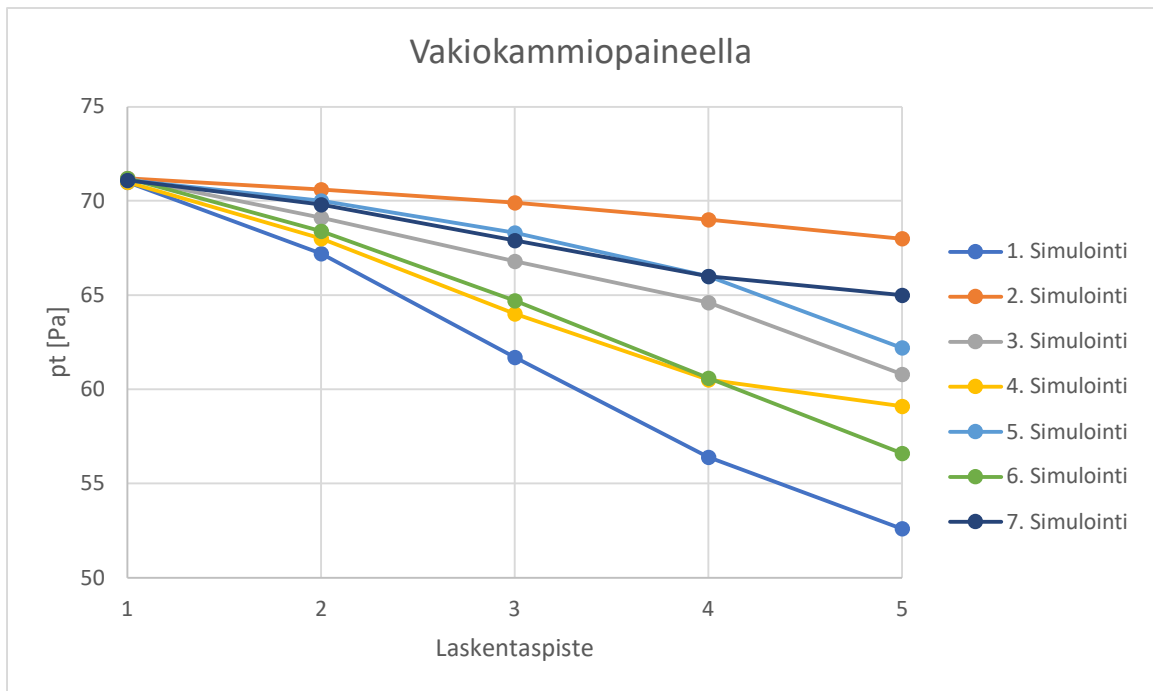
Laskentapiste	qv [dm ³ /s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava			
1	1045	71	64,2
2	836	67,2	56,3
3	627	61,7	46,8
4	418	56,4	49,8
5	209	52,6	48,3
Tehostamaton kanavisto			
6	62	55,3	53
7	62	56,4	54,1
8	62	48	45,7
9	62	45,6	43,3
10	62	49,2	46,9
Tehostuskanavisto			
11	147	62,2	56,8
12	147	53,2	47,9
13	147	42,8	37,5
14	147	46,9	41,5
15	147	45,5	40,1

Laskentatapauksessa 1. simuloinnissa 1. eli maksimitilanteessa kanavapaine pt on 71 Pa. Matalin staattinen paine pst runkokanavassa on laskentapisteessä 3. 46,8 Pa paineella ja tehostamattomassa kanavistossa laskentapisteessä 9. 43,3 Pa paineella.

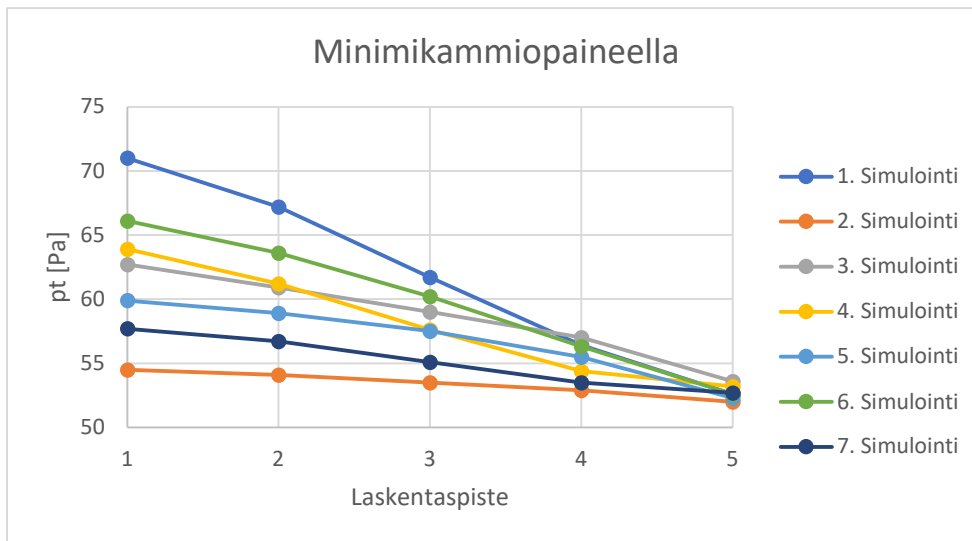
Simuloinneissa 2-7. vakiokammiopaineella 71 Pa mitoitettuna kaikkien avoinna olevien kanavahaarojen ja runkokanavien ilmamäärät ovat nousseet alkuperäisestä mitoituksesta 2-

20% välillä. Minimikammiopaineella saadaan toteutettua laskentapisteeseen 1. haluttu mitoitusvirtaama, mutta muut kanavamittaustulokset vaihtelevat noin -7 % ja +5% välillä halutusta virtaamasta.

Toisin sanoen vakiokammiopaineella puhallin ei osaa reagoida kanavistossa tapahtuviin muutoksiin, koska ilmamäärät kanavistossa tippuu ja näin ollen kanaviston dynaaminen paine laskee. Kuvassa 33 on esitetty vakiokammiopaineisen kanaviston käyttäytyminen eri simulointitapauksissa ja tästä voidaan tulkita, ettei kanaviston painetasot pysy loppupäässä hallinnassa, joka taas aiheuttaa sen, että kanaviston säätölaitteistoihin asetetut säätöarvot eivät vastaa kyseisen simulointitapauksen säätöarvoja ja tällöin päätelaitteet päästävät kyseisellä painetasolla enemmän ilmaa huonetilaan.

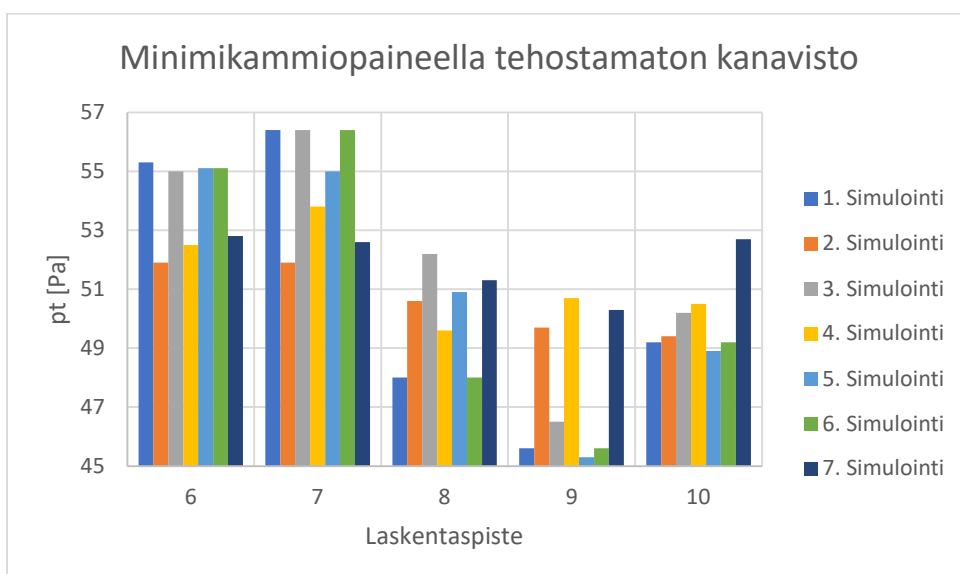


Kuva 33. Laskentatapaus 1. kanavapaineet vakiokammiopaineella laskentapisteistä 1-5



Kuva 34. Laskentatapaus 1. kanavapaineet minimikammiopaineella laskentapisteistä 1-5

Minimikammiopaineisena kokonaisilmavirta saadaan pidettyä halutussa, mutta simulointitapauskohteisesti muu kanavisto ei pysy tasapainossa. Kuvassa 34 on esitetty minimikammiopaineisen järjestelmän simulointituloksien kanavapaineet runkokanavan laskentapisteissä 1-5. Tuloksista ilmenee, että laskentatapaus 1. kanavistossa paineenmittauspisteen paikaksi tulisi valita laskentapiste 5, jossa paineet pysyvät lähes samana. Kuitenkin kuvan 35 minimikammiopaineisen tehostamattoman kanaviston paineet eivät pysy kaikissa simulointitapauksissa 1. simulointitapausten kaltaisena, jolloin päätelaitteiden ilmavirta ei pysy vakiona simulointitapausten välillä.



Kuva 35. Laskentatapaus 1. kanavapaineet minimikammiopaineella laskentapisteistä 6-10

5.2 Laskentatapaus 2. Tulokset

Taulukko 4. Laskentatapaus 2; 1. Simuloinnin tulokset

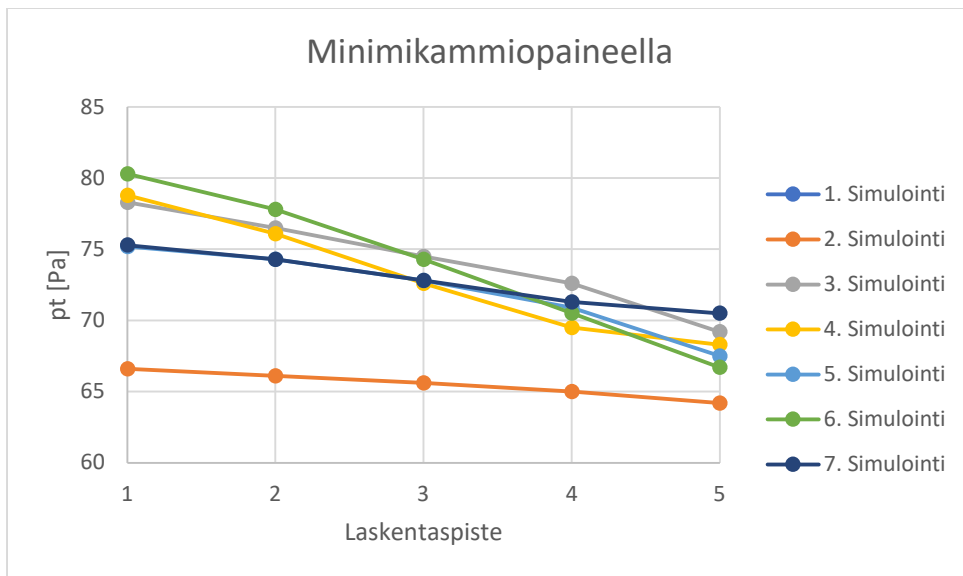
Laskentapiste	qv [dm ³ /s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava			
1	1045	86,9	80,2
2	836	83,1	72,2
3	627	77,7	62,7
4	418	72,3	65,7
5	209	68,6	64,2
Tehostamaton kanavisto vakiopainepellin jälkeen			
6	62	36,5	34,1
7	62	36,5	34,1
8	62	36,5	34,1
9	62	36,5	34,1
10	62	36,5	34,1
Tehostamaton kanavisto ennen vakiopainepeittä			
11	62	71,6	69,2
12	62	72,6	70,3
13	62	64,2	61,9
14	62	61,9	59,5
15	62	65,4	63,1
Tehostuskanavisto			
16	147	74,9	69,5
17	147	65,9	60,5
18	147	55,5	50,1
19	147	59,6	54,2
20	147	58,2	52,8

Laskentatapauksessa 2. simuloinnissa 1. kanavapaine pt on 86,9 Pa. Matalin staattinen paine pst runkokanavassa on laskentapisteessä 3. 62,7 Pa paineella ja tehostamattomassa kanavistossa laskentapisteessä 14. 59,5 Pa paineella.

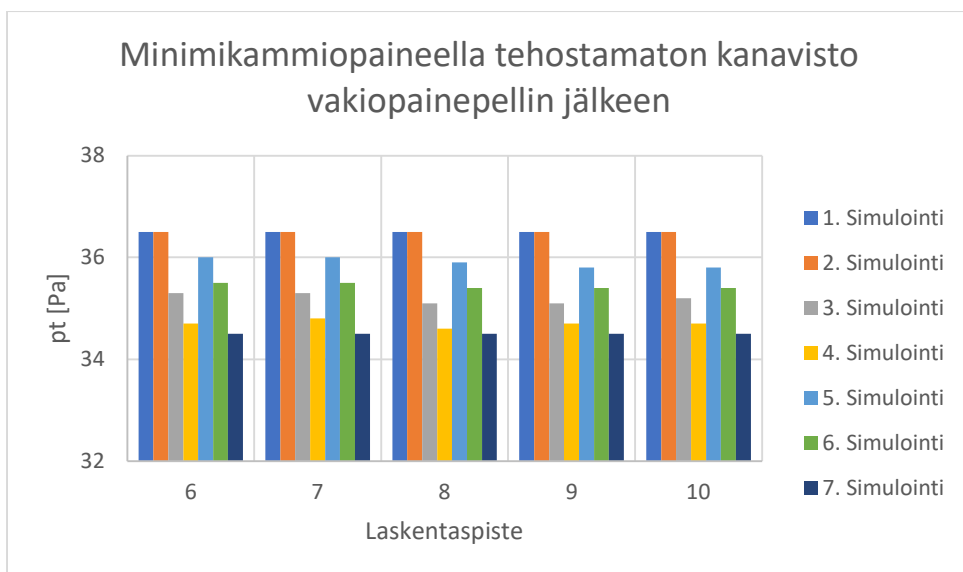
Simulointitapauksessa 2. vakiokammiopaineella 86,9 Pa ja minimikammiopaineella 66,6 Pa mitoitettuna kanavahaarat pysyvät halutussa tasapainossa. Simulointitapauksissa 3-7 ohjelma pyrkii tasapainottamaan kanaviston mahdollisimman hyvin tasapainoon, jolloin vakiopainepeittähaaratkaan eivät pysy halutussa mitoitusvirtaamassa. Vakiokammiopaineella

tehostamattomat kanavistojen ilmamäärät ovat +2,5% - +7 % korkeammat ja minimikammionpaineella -2,7% - -0,6 % pienemmät.

Vakiokammionpaineisena runkokanavan paineet käyttäytyvät lähes samalla tavalla, kuin laskentatapaus 1. Kuvan 36 perusteella minimikammionpaineisena runkokanavien paineet pysyvät jokaisessa laskentapisteessä pienemmällä alueella, pois lukien 2. simuloinnissa, jossa kaikki tehostuskanavistojen on/off-pellit ovat kiinni. Tässä tapauksessa ohjelma tasapainottaa kanaviston pelkästään näiden avulla, joten kanavistopaineet pysyvät alempana.

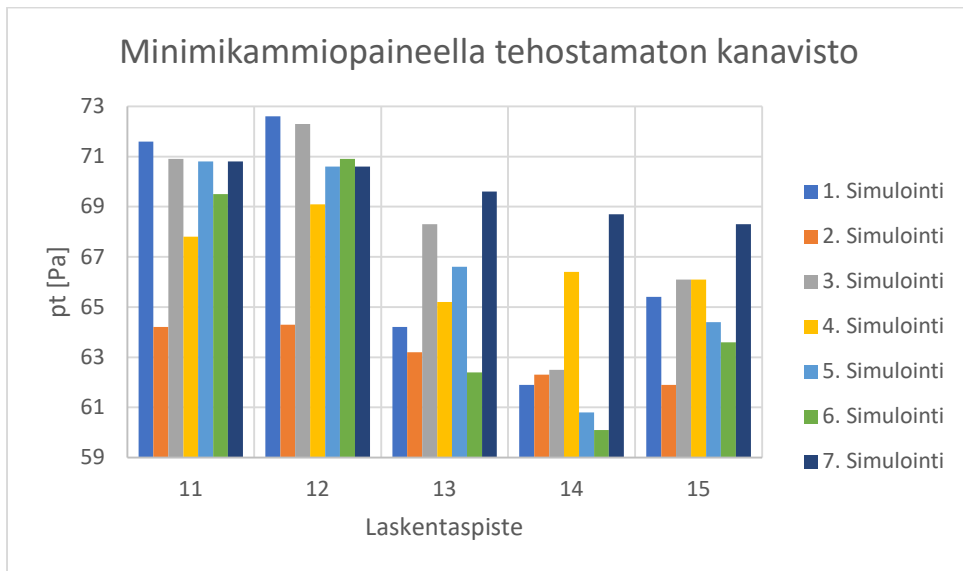


Kuva 36. Laskentatapaus 2. kanavapaineet minimikammionpaineella laskentapisteistä 1-5



Kuva 37. Laskentatapaus 2. kanavapaineet minimikammionpaineella laskentapisteistä 6 - 10

Kuvassa 37 on esitetty tulokset vakiopainepellin jälkeen. Näiden perusteella minimikammiopaineisena kanaviston paineet eivät pysy kaikissa simulointitapauksissa hallinnassa, mutta ovat keskenään miltei samanlaisia. Kuvassa 38 on esitetty simulointitulokset laskentapisteistä 11. – 15., jotka ovat tehostuskanavistoa ennen vakiopainepectä. Kanavapaineet heittelevät rajusti eri simulointitapauksien välillä. Tästä johtuen myöskään on/off-tehostuskanavistot eivät pysy tasapainossa eri simulointitulosten välillä, koska tehostuskanaviston kanavahaarassa ei ole aktiivista säätölaitetta. Minimikammiopainesäädöllä kuitenkin ilmavirtojen heittelyt ovat paljon maltillisempia, kuin vakiokammiopaineisena.



Kuva 38. Laskentatapaus 2. kanavapaineet minimikammiopaineella laskentapisteistä 11-15

5.3 Laskentatapaus 3. Tulokset

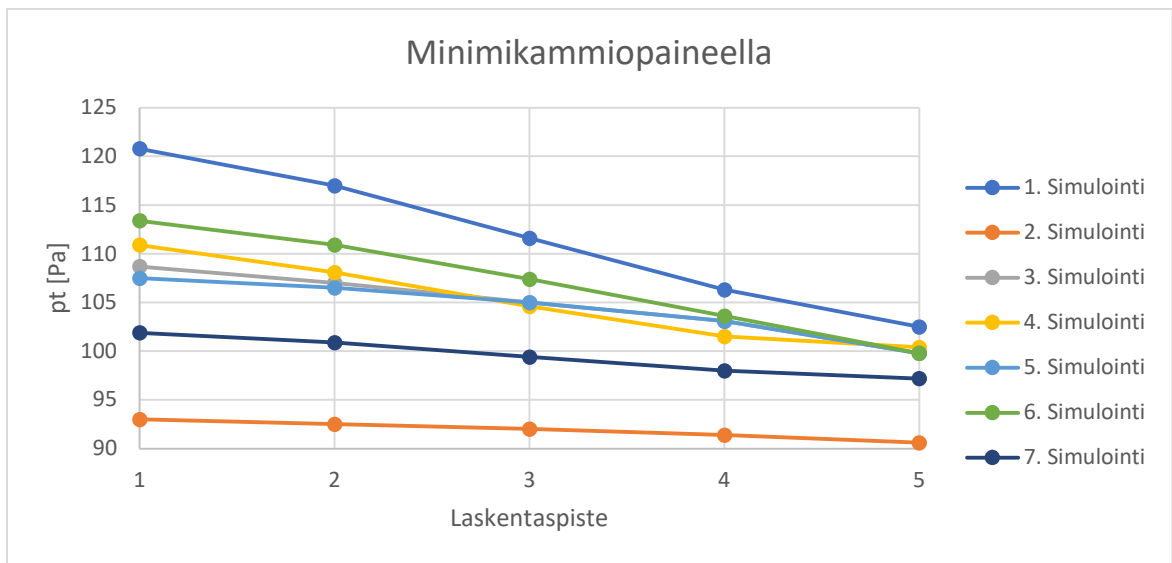
Taulukko 5. Laskentatapaus 3; 1. Simuloinnin tulokset

Laskentapiste	qv [dm ³ /s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava			
1	1045	120,8	114,1
2	836	117	106,2
3	627	111,6	96,6
4	418	106,3	99,6
5	209	102,5	98,2
Tehostamaton kanavisto vakiovirtauspellin jälkeen			
6	62	36,7	34,3
7	62	36,7	34,3
8	62	36,7	34,3
9	62	36,7	34,3
10	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto ennen vakiovirtauspeltiä			
11	62	105,7	103,4
12	62	106,8	104,4
13	62	98,4	96
14	62	96	93,7
15	62	99,6	97,3
Tehostuskanavisto			
16	147	42,9	37,5
17	147	42,9	37,5
18	147	42,9	37,5
19	147	42,9	37,5
20	147	42,9	37,5

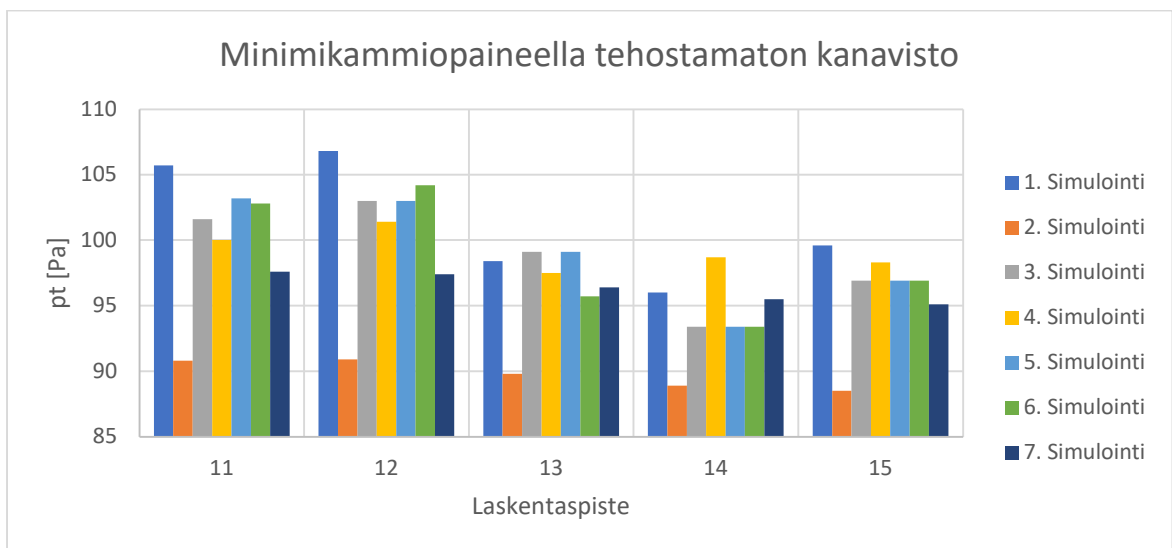
Laskentatapauksessa 3. simuloinnissa 1. kanavapaine pt on 120,8 Pa. Matalin staattinen paine pst runkokanavassa on laskentapisteessä 3. 96,6 Pa paineella ja tehostamattomassa kanavistossa laskentapisteessä 14. 93,7 Pa paineella.

Simuloinneissa 2-7 ilmamäärät pysyvät halutuissa arvoissa niin vakiokammioaineisena, kuin minimikammioaineisena. Minimikammioaine laskee alimmillaan 2. simuloinnin aikana 93 Pa tasoon.

Vakiokammioaineisena kanavisto käyttäytyy, lähes kuten laskentatapaus 1. Runkokanaviston kanavapaineet minimikammioaineella on esitetty kuvassa 39. Minimikammioaineella simulointien perusteella kanavapaineiden hajonta on suurta, mutta tasaisimmat paineet ovat laskentapisteissä 4. ja 5. Myöskään tehostamattoman kanaviston haarojen paineet eivät pysy vakioina, kuten kuvassa 40 on esitetty. Vakiokammioaineisena suoranaisesti kanavapaineet käyttäytyvät, kuten muidenkin laskentatapauksien osalta, mutta vakioilmavirtapelit pitävät ilmavirrat jokaisessa haarassa vakaana, riippumatta siitä, mitä kanavistossa tapahtuu.



Kuva 39. Laskentatapaus 3. kanavapaineet minimikammioaineella laskentapisteistä 1-5



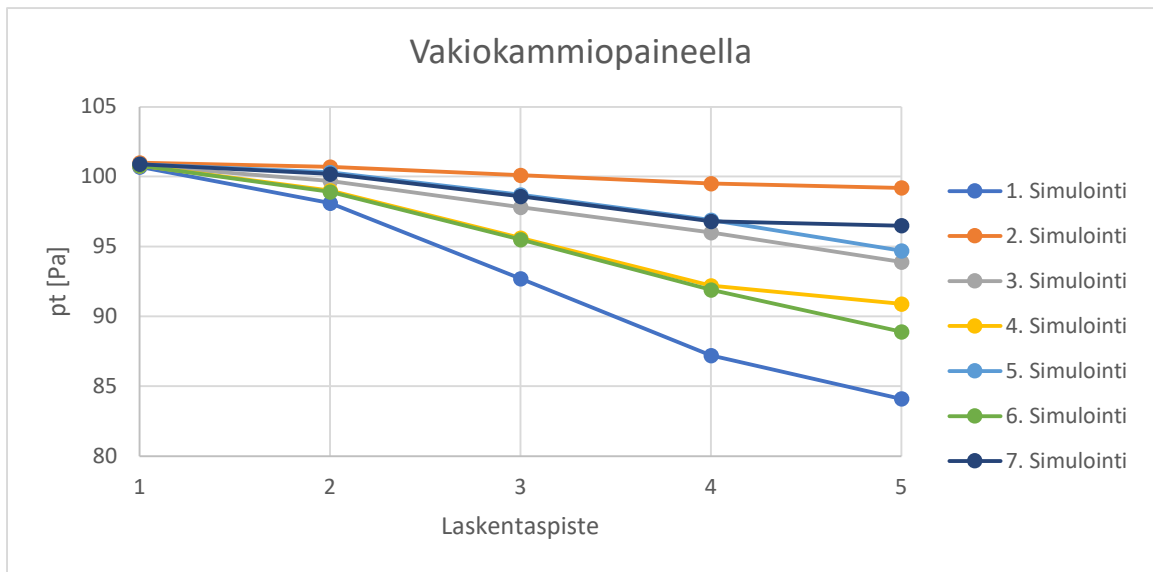
Kuva 40. Laskentatapaus 1. kanavapaineet minimikammioaineella laskentapisteistä 11-15

5.4 Laskentatapaus 4. Tulokset

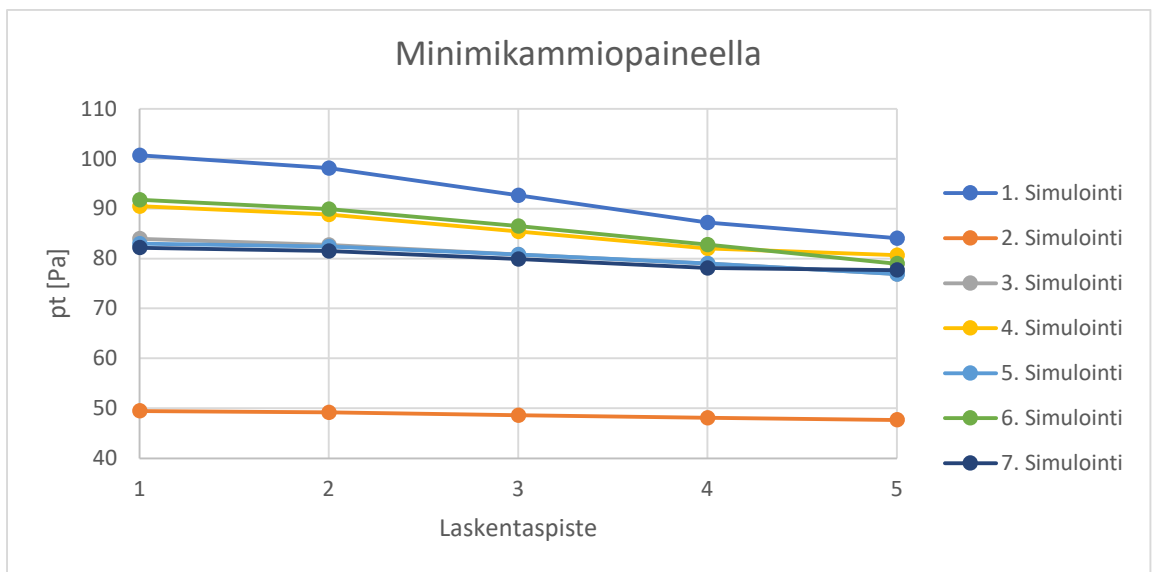
Taulukko 6. Laskentatapaus 4; 1. Simuloinnin tulokset

Laskentapiste	qv [dm ³ /s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava			
1	1045	100,7	94
2	836	98,1	87,2
3	627	92,7	77,8
4	418	87,2	80,5
5	209	84,1	79,8
Tehostamaton kanavisto			
6	62	42,4	36,7
7	62	42,4	36,7
8	62	42,4	36,7
9	62	42,4	36,7
10	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto			
11	147	48,4	43
12	147	48,4	43
13	147	48,4	43
14	147	48,4	43
15	147	48,4	43

Laskentatapauksessa 4. simuloinnissa 1. kanavapaine pt on 100,7 Pa. Matalin staattinen paine pst runkokanavassa on laskentapisteessä 3. 96,6 Pa. Simuloinneissa 2-7 ilmamäärät pysyvät halutuissa arvoissa vakiokammio-paineisena, ja simuloinneissa 3-7 minimikammio-paineisena. Minimikammio-paine laskee alimmillaan 2. simuloinnin aikana 49,5 Pa tasoon, mutta tehostamattoman kanaviston ilmamäärät poikkeaa halutusta arvosta $\pm 0,1$ dm³/s.



Kuva 41. Laskentatapaus 4. kanavapaineet vakiokammioaineella laskentapisteistä 1-5



Kuva 42. Laskentatapaus 4. kanavapaineet minimikammioaineella laskentapisteistä 1-5

Kun kaikissa kanavahaaroissa on vakioaineepellit, saadaan simuloinnissa toteutumaan halutut ilmavirrat jokaisessa laskentatapausten simuloinnissa. Kuvassa 41 ja 42 on esitetty kanavistopaineiden käyttäytyminen simulointien aikana ja ne ovat yhteneväisiä laskentatapausten 3. simulointitulosten kanssa. Painemittauksen sijainti voi olla simulointitulosten perusteella kammiossa. Minimikammioaineella kanavistopaineet heittelevät jonkin verran.

5.5 Laskentatapaus 5. Tulokset

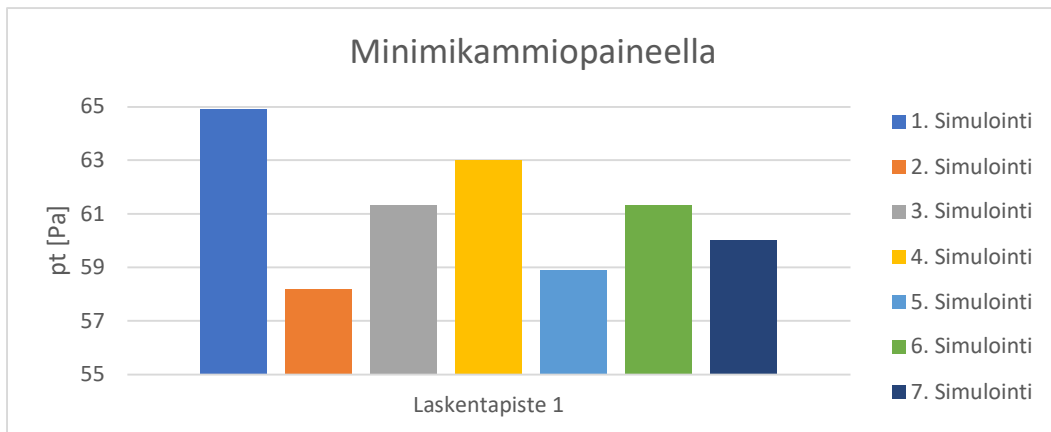
Taulukko 7. Laskentatapaus 5; 1. Simuloinnin tulokset

Laskentapiste	qv [dm ³ /s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio			
1	1045	64,9	57,6
Tehostamaton kanavisto			
2	62	51,3	49
3	62	54,1	51,7
4	62	56,4	54
5	62	53,2	50,8
6	62	50,4	45,1
Tehostuskanavisto			
7	147	44,7	39,3
8	147	49,1	43,7
9	147	54,9	49,5
10	147	50,5	45,1
11	147	46	40,6

Laskentatapauksessa 5. simuloinnissa 1. kanavapaine pt on 64,9 Pa ja staattinen paine pst on 57,6 Pa. Matalin staattinen paine pst tehostamattomissa kanavistoissa on laskentapisteessä 6. 45,1 Pa.

Vakiokammiopaineisena simulointien 2-7. perusteella ilmamäärät kasvavat tehostamattomassa kanavistossa + 1,5% - +5,8% ja tehostuskanaviston avonaisissa haaroissa + 1,5% - +5% tavoitearvoista. Minimikammiopaineisena ilmavirrat pysyvät halutuissa tavoitearvoissa jokaisen simuloinnin aikana.

Minimikammiopaineella simuloituna kaikki vakioilmavirtaiset haarat pysyvät halutussa säätöarvossa ja myöskin näiden kanavapaine pysyy vakiona. Kun kanavisto on rakennettu siten, että kaikki haarat lähtevät liikkelle samasta pisteestä, eli kammiosta, vakiokammiopainesäädöllä päätelaitteiden ilmavirrat jakautuvat tasaisesti, mutta eivät pysy halutussa. Kuvasta 43 nähdään, kuinka paljon minimikammiopaineella simuloituna kanavapaine vaihtelee eri simulointitapauksien välillä.



Kuva 43. Laskentatapaus 5. kanavapaineet minimikammiopaineella laskentapisteestä 1

5.6 Laskentatapaus 6. Tulokset

Taulukko 8. Laskentatapaus 6; 1. Simuloinnin tulokset

Laskentapiste	qv [dm ³ /s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio			
1	1045	77,2	69,9
Tehostamaton kanavisto ennen vakiopainepeittä			
2	62	63,7	61,3
3	62	66,4	64,1
4	62	68,7	66,3
5	62	65,5	63,1
6	62	62,7	60,4
Tehostuskanavisto			
7	147	57	51,6
8	147	61,4	56,1
9	147	67,2	61,8
10	147	62,8	57,4
11	147	58,3	52,9
Tehostamaton kanavisto vakiopainepellin jälkeen			
12	62	36,8	34,4
13	62	36,8	34,4
14	62	36,8	34,4
15	62	36,8	34,4
16	62	36,8	34,4

Laskentatapauksessa 6. simuloinnissa 1. kanavapaine pt on 77,2 Pa ja staattinen paine pst on 69,9 Pa. Matalin staattinen paine pst tehostamattomissa kanavistoissa on laskentapistessä 6. 60,4 Pa.

Vakiokammioaineisena simuloinnissa 2. tavoiteilmamäärät saavutetaan, kun taas 3-7. perusteella ilmamäärät kasvavat tehostamattomassa kanavistossa +1,3% - +4,2% ja tehostuskanaviston avonaisissa haaroissa +1,2% - +4,1% tavoitearvoista. Minimikammioaineisena ilmavirrat pysyvät halutuissa tavoitearvoissa jokaisen simulointien aikana.

Minimikammioaineella simuloituna kaikki vakioilmavirtaiset haarat pysyvät halutussa säätöarvossa ja myöskin näiden kanavapaine pysyy vakiona simulointituloksien välillä. Vakio-kammioaineisäätöisenä samasta kammioista lähtevät haarat pysyvät keskenään tasapainossa, eli ilmavirrat jakautuvat tasaisesti, vaikkei kokonaisilmavirta pysy haluttuna. Simulointitulokset on lähes vastaava, kuin laskentatapaus 5. tulokset.

6 Päätelmät ja yhteenveto laskentatuloksista

Laskentatapaus 1. mukaisesti pelkästään yksi runkokanavistoon lisättävä on/off-pelti ilman muita säätölaitteita aiheuttaa koko ilmanvaihtokanavistoon epätasapainoa, jolloin muiden huonetilojen ilmanvaihto ei toteudu suunnitteluarvoihin. Vakiokammioaineisena kokonaisilmamäärä on jokaisessa simulointitilanteessa liian suuri, joka kertoo siitä, että kammioon asti kanavistonpainevaihtelut eivät yllä, kun taas minimikammioaineella toteutettuna kokonaisilmavirta on mitoitusarvossa, mutta kanavistotasapaino päätelaitteille ei pysy hallinnassa. Myöskään laskentatapaus 2. mukainen kanavisto, johon on lisätty vakiopainepellit tehostamattoman ajan kanavistoon, ei toimi simulointien mukaan tarpeeksi tarkasti. Tilanne on paljon parempi, kuin laskentatapaus 1. kohdalla, mutta kanaviston epätasapainoa on huomattavasti.

Myöskin kokemusperäisesti laskentatapaus 1. mukainen kanavisto aiheuttaa sulkupeltien ollessa kiinni viereisiin huoneisiin ääniongelmia, joka kertoisi myös siitä, että kyseisistä kanavahaaroista tulee enemmän ilmaa, kuin mitä on suunniteltu. Tällöin voidaan päätellä, ettei kanavistotasapaino pysy hallinnassa ollenkaan. Simuloinneista voidaan myös päätellä, että yksikin kiinni oleva on/off-pelti aiheuttaa kanavistossa epätasapainoa, eikä tarkkaa tasapainoa saada toteutettua myöskään silloin, kun paineenmittauspisteen sijainti on nykyohjeistuksen mukaisesti kanaviston loppupäässä.

Kuitenkin samanlaiset on/off kanavistot toimii silloin, kun kaikki kanavahaarat liitetään samaan kammioon, kuten laskentatapaus 5. ja 6. on simuloitu. Tällöin ei kuitenkaan vakiokammioainetta voida käyttää, vaan puhaltimen paineohjauksen mittauspiste on toteutettava jonkin vakioilmavirtaisen päätelaitteen haarakanavasta. Suoraan kammioon liitettyjen kanavistojen tapauksessa ei ole tarvetta käyttää vakiopainepelejä, vaan samanlainen lopputulos saadaan myös ilman niitä, tällöin kustannustehokkain ratkaisu on toteuttaa kammioon liitettäessä kanavisto ilman vakiopainepelejä.

Simulointien mukaan laskentatapaus 3. mukaisella kanavistolla, jossa on molemmissa haaroissa vakiovirtauspellit, saadaan toteutettua ilmanvaihdon tehostus on/off-pelleillä. Tämä vaatii kuitenkin sen, että jokaisessa kanavahaarassa on vakiovirtauspelti. Tällainen järjes-

telmä toimisi simulointiohjelman mukaan niin vakiokammionpaineisena, kuin minimikammionpaineisena, mutta vakiovirtauspellit tarvitsevat kovan paineen toimiakseen, joten todellisuudessa vakiokammionpaineinen on varmin ratkaisu. Toisaalta, simulointiohjelma ei antanut minimikammionpaineisena yhtenäistä kanavapaineen mittausta paikkaa, mutta kanavapainemittauspiste voisi sijaita ohjeistuksen mukaisesti 1/3 kanaviston loppupäästä, jolloin päästäisiin pienempiin kanavapaineisiin jos tehostustarvetta ei ole.

Simulointien mukaan toimiva ratkaisu oli myöskin laskentatapaus 4. mukainen kanavisto, jossa runkokanavistosta haarautuu yksi kanavahaara, jossa on vakio painepelti. Tämän jälkeen haarautuu erikseen on/off haara. Tällainen toteutusratkaisu on myös esitetty Helsingin kaupungin suunnitteluohjeessa [8]. Tällöin simulointitulosten mukaan kanavisto toimii vakiokammionpaineisena ja minimikammionpaineisena.

Painemittauspisteen paikka on aina tapauskohtainen, mutta pääsääntöisesti simulointitulosten perusteella se olisi hyvä sijaita lähellä kanaviston loppupäästä, jolloin sieltä mitattu painetaso ottaa helpommin huomioon, mitä kanavistossa tapahtuu keskivaiheilla. Dynaamisen paineen ja staattisen paineen välillä ei havaittu ilmeistä yhteyttä, jota voisi hyödyntää mittauspaikan etsimisessä. Kuitenkin joissain tapauksissa mittauspisteellä ei ole kanaviston toiminnan kannalta suurta merkitystä, mutta energiatehokkuuden puolesta ylimääräinen paineentuohto on suoraan verrannollinen ylimääräiseen energiankulutukseen, jolloin tällaista mittausta on vältettävä.

Simulointitulosten perusteella voi päätellä, että muuttuvilmavirtaisessa järjestelmässä runkokanavisto tarvitsee jokaiseen haaraan jonkin aktiivisen säätölaitteen, kuten vakiovirtauspellin tai vakio painepellin, jotta kanavistotasapaino säilyy ja näin ollen huonetilan ilmanvaihto ei ole epätasapainossa. Jos taas rakennettu kanavisto on sellainen, josta jokainen kanavahaara jakautuu samasta pisteestä, voidaan tällaiset aktiiviset säätölaitteet jättää kanavistosta pois. Tällainen toteutus on kuitenkin erittäin harvinainen ja yksittäiset kanavistot vievät erittäin paljon tilaa rakennuksesta, jolloin ratkaisu voi olla todella kallis toteuttaa.

Taulukossa 9 on esitetty simulointien keskeiset tulokset.

Taulukko 9. Keskeiset tulokset esitettynä taulukossa

Kanavisto- variaatio	Selite	Liitos	Painemit- tauspaikka	Toimiiko	Huomiot
1.	Tehostamaton kanavisto: Suoralla kanavalla Tehostuskanavisto: on/off-pelti	Runkokanavaan	-	Ei	Yksikin on/off haara sekoittaa koko järjestelmän tasapainon
2.	Tehostamaton kanavisto: Vakiopainepellillä Tehostuskanavisto: on/off-pelti	Runkokanavaan	-	Ei	Vakiopainehaarat pysyvät hallinnassa, tehostuskanavisto ei toimi oikein
3.	Tehostamaton kanavisto: Vakiovirtauspelti Tehostuskanavisto: Vakiovirtauspelti ja on/off-pelti	Runkokanavaan	Runkokana- viston loppu- päästä tai kammioista	Kyllä	Kanavistopaineet ovat korkeat, huomioitava tarpeeksi suuri kanavapaine säätimelle
4.	Rungosta yksi kanavahaara huoneeseen, jossa vakiopainepelti. Tehostamaton kanavisto: Suoralla kanavalla Tehostuskanavisto: on/off-pelti	Runkokanavaan	Runkokana- viston loppu- päästä tai kammioista	Kyllä	Kaikki haarat varustettava vakiopainesää- döllä, huomioi- tava tarpeeksi suuri kanavapaine säätimelle
5.	Tehostamaton kanavisto: Suoralla kanavalla Tehostuskanavisto: on/off-pelti	Kammioon	Vakioilma- virtaisesta haarasta	Kyllä	Kaikki haarat oltava liitettynä suoraan kammioon
6.	Tehostamaton kanavisto: Vakiopainepellillä Tehostuskanavisto: on/off-pelti	Kammioon	Vakioilma- virtaisesta haarasta	Kyllä, mutta ks. huomio!	Ei tarvetta vakiopainepel- lille, joten variaatio 5. on parempi kammioon liityttäessä

7 Yhteenveto

Työssä tutkittiin kuinka ilmanvaihdon tehostuksen toteutus on/off-pelleillä toteutettuna vaikuttaa kanaviston tasapainotukseen eri käyttötilanteissa, kun tehostettavien huoneilojen välillä on kuormitus eroja. Simulointien perusteella myös tulkittiin painesäätöisen ilmanvaihtokoneen paineenmittauksen optimaalista sijaintia laskentatapauskohtaisesti.

Tutkimukseen valittiin kuusi erilaista kanavistoratkaisua toteutettujen järjestelmien perusteella, mutta myös uudenlaisia järjestelmiä kokoonpanoja ja näiden kanavistojen toimintaa simuloitiin seitsemällä erilaisella huoneiden käyttöaste tilanteella. Kanavistovariaatiot 1-4 perustuivat normaaliin runkokanavarakenteeseen ja variaatiot 5-6 perustuivat kammioon liitettäviin haaroihin. Kaikissa tapauksissa huoneiden kanavahaarat vaihtelivat siten, että tehostamattomassa ja tehostuskanavistossa tutkittiin toteutusratkaisuja pelkän suoran kanavan, on/off-peltien, vakio painepeltien tai vakiovirtauspeltien kanavistorakenne yhdistelmiä tarkastellen näiden muuttujien vaikutusta kanaviston tasapainotukseen eri käyttötilanteissa. Käyttötilanteita simuloitiin seitsemällä käyttöaste variaatiolla siten, että kaikki huoneet olivat käytössä, kaikki huoneet eivät olleet käytössä, yksittäiset huoneet olivat käytössä ja muutama huone oli käytössä. Näiden muuttujien perusteella tutkimuksessa saatiin hyvä kokonaiskuva kyseisen kanavistovariaation käyttäytymisestä eri käyttötilanteissa.

Tutkimuksessa todettiin, että on/off pellein ilmanvaihdon tehostus on mahdollista toteuttaa siten, että kanavisto tasapainotus säilyy, mutta toimiva järjestelmä vaatii runkokanavaisessa järjestelmässä jonkin aktiivisen säätölaitteen, kuten vakiovirtauspellin tai vakio painepellin toimiakseen. Kun kanavistossa on jokin haara, jota ei voida aktiivisesti säätää, voi yksikin on/off pellillä varustettu haara muuttaa kanaviston tasapainotusta siten, että säätymättömässä haarasta tulee liian vähän, tai liian paljon ilmaa ja tämä epätasapaino voi myös aiheuttaa ääniongelmia.

Tutkimuksessa todettiin myös, että jos kanaviston jokaisessa haarassa on jokin aktiivinen säätölaite, voidaan kanavapainemittaus toteuttaa niin kammioista, kuin kanavistostakin, mutta kanavistosta mitattaessa saadaan toteutettua ilmanvaihto pienemmillä järjestelmän kokonaispainella ja täten järjestelmä kuluttaa myös vähemmän energiaa.

Kun kanavisto rakennetaan siten, että kaikki kanavat tuodaan kammiolle asti tai toisinsanoen kanavat haarautuvat samasta pisteestä, voidaan on/off-peltejä käyttää ilman muita säätyviä laitteita, mutta tällöin ilmanvaihtokoneen painesäädön mittauspiste tulee olla vakioilmavirtaisessa haarassa.

Työn tuloksien perusteella saadaan kattava teoriaperusta, millaiset järjestelmät voisivat toimia, mutta tulosten todentamiseksi täytyisi tehdä myös fyysisiä kanaviston mittauksia. Simulointitulokset ovat laskennalliseen tasapainotukseen perustuvia, eikä ohjelma välttämättä kykene täydellisen realistiseen simulointiin, kuten esimerkiksi tilanteessa, jossa ei ole kaikki kanavahaarat aktiivisen säädön perässä, jolloin ohjelma säätää ja mitoittaa arvot mahdollisimman lähelle keskinäistä tasapainoa. Todellisuudessa aktiivisella säädöllä olevat kanavahaarat säätyvät asetusarvoihin ja säätyvät myötäilevät päinvastaiseen suuntaan. Simulointitulosten perusteella kuitenkin voidaan todeta, mitkä järjestelmät eivät ainakaan toimi kaikissa käyttötilanteissa.

Tutkimustulosten perusteella yksinkertaisimmillaan on/off säädön voi toteuttaa siten, että jokainen kanavahaara tuodaan tulo- tai poistoilmakammioon ja käytetään ainoastaan tehostuskanavistossa on/off peltiä, mutta tällaista toteutusratkaisua ei kovinkaan monessa tapauksessa ole järkevää lähteä toteuttamaan järjestelmän tilavaatimuksien takia ja myöskin tulevaisuuden muuntojoustavuus kärsii, koska pienikin kanavamuuotos voi aiheuttaa koko kanaviston vikatilaa.

Vaikka IMS-järjestelmien ongelmien takia on alettu suosimaan on/off-säätöön perustuvia järjestelmiä, niin tulosten perusteella voidaan todeta, että kanaviston toteutus on/off-pellein on mahdollista tietyillä ehdoilla, mutta ei nämäkään ole ongelmattomia ratkaisuja. Esimerkiksi vakiopainepeltien tarvitsemassa paineenmittauksessa on sama pölyyntymisongelma, kuin ilmamääräsäätimissäkin ja näin ollen vakiopainesäätimetkin tarvitsevat huoltoa. Mekaaniseen säätöön perustuva järjestelmä voisi olla lähimpänä sellaista ”huoletonta” järjestelmää, jota asiakkaat haluavat, mutta yleisesti vakiovirtaussäätimet tarvitsevat isommat kanavapaineet toimiakseen ja täten ovat myös äänekkäämpiä.

Lähteet:

- [1] FläktGroup Oy. Ilmanvaihtokoneen pohja kuvassa Acon mitoitusohjelmasta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavissa: <https://acon.flaktgroup.com/WebApp/Fle.Acon.WebApp/Home.aspx>
- [2] FläktGroup Oy tuotteet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavissa: <https://www.flaktgroup.com/fi/tuotteet/>
- [3] Ilmakas. Onko kodissasi liian korkea hiilidioksiditaso? [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavissa: <https://ilmakas.fi/onko-kodissasi-liian-korkea-hiilidioksiditaso/>
- [4] Finlex. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>
- [5] Rakennustieto Oy. 2018. Sisäilmastoluokitus 2018. RT 07-11299. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023].
- [6] Ympäristöministeriö. Rakentamismääräyskokoelma, Laskentaopas Tilan ulkoilma-virran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella. Julkaistu 28.02.2018. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavilla: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Opas-tarpeenmukaisen-ilmanvaihdon-huomioimisesta-E-luvun-laskennassa_20180228-a-E4C60E12_A5A3_4B98_A5D5_02AEE4FC9FD7-144152.pdf/4971dad2-56d6-dc25-e2d3-8b06affdd344/Opas-tarpeenmukaisen-ilmanvaihdon-huomioimisesta-E-luvun-laskennassa_20180228-a-E4C60E12_A5A3_4B98_A5D5_02AEE4FC9FD7-144152.pdf?t=1603260253816

- [7] Finvac. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa, Julkaistu 30.11.2018 (korjattu 28.01.2020). [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavissa: https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf/9f1ca28e-57de-3fa4-5388-a00f4d973afb/Opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2019b-D9B578DC_66D4_44BC_B1AE_DCAB875D5907-144726.pdf?t=1603260098252
- [8] Helsingin kaupunki. Tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän ohje. Julkaistu 18.05.2022. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavissa: <https://www.lyyti.fi/att/0d8b971c333e/9f907f5ed930a6adc97863d53b1794e33bb4fc0b5cb03eca6a1d40678f>
- [9] Swegon Room Unit Desing simulointiohjelma. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.04.2023]. Saatavissa: <https://www.swegon.com/fi/tekninen-tuki/ohjelmat/room-unit-design/>
- [10] Rabani, M., Madessa, H. B., Nord, N. Schild, P (2019) Performance analysis of an active diffuser in mixing ventilation for cell office by using numerical approach. E3S Web of Conferences 111.
- [11] Sandberg, E. 2014 Ilmastointilaitoksen mitoitus: Ilmastointitekniikka osa 2. Talotekniikkajulkaisut.
- [12] Merema, B., Delwati, M., Sourbron, M., Breesch, H. (2018) Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies. Energy and buildings. Vol. 172. Sivut. 349–360.
- [13] Ilmanvaihdon mitoituksen perusteet. Loppuraportti ympäristöministeriön hankkeista. Selvitys muiden kuin asuinrakennuksen tilojen ilmanvaihdon mitoituksesta ja tilakohtaisista ohjearvoista ja Selvitys asuinrakennuksen asuintilojen ja yhteistilojen ilmanvaihdon mitoituksesta ja tilakohtaisista ohjearvoista. Julkaistu 30.11.2017. Saatavissa: <https://www.sulvi.fi/wp-content/uploads/2017/12/D2-hanke-loppuraportti-30112017.pdf>

- [14] Finlex. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>
- [15] Alalawi, M. A. & Krarti, M. (2002) Experimental evaluation of CO(2)-based demand-controlled ventilation strategies. ASHRAE transactions. Vol. 108 Sivut 307-317.

Liitteet:

Liite 1. Laskentatapauksien 2. – 7. Simulointitulokset.

Simulointi 2.

Laskentatapa 1. Simulointi 2. Vakiokammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	354,5	71,2	70,4
2	248	285,9	70,6	69,3
3	186	217,9	69,9	68,1
4	124	145,1	69	68,2
5	62	71,1	68	67,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	68,6	67,7	64,8
7	62	68	67,8	65
8	62	72,8	66,2	62,9
9	62	74	64,9	61,6
10	62	71,1	64,6	61,6
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Laskentatapa 1. Simulointi 2. Minimikammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	310	54,5	53,9
2	248	250	54,1	53,1
3	186	190,5	53,5	52,1
4	124	126,8	52,9	52,2
5	62	62,1	52	51,7
Tehostamaton kanavisto				
6	62	60	51,9	49,7
7	62	59,5	51,9	49,8
8	62	63,7	50,6	48,2
9	62	64,7	49,7	47,1
10	62	62,1	49,4	47,1
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Simulointi 3.

Laskentatapa 1. Simulointi 3. Vakiokammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	800	71,2	67,1
2	542	583,8	69,1	63,8
3	333	360,4	66,8	61,9
4	271	291,5	64,6	61,4
5	209	224,8	60,8	55,8
Tehostamaton kanavisto				
6	62	65,8	62,3	59,7
7	62	66	63,9	61,3
8	62	68,9	59,2	56,3
9	62	66,7	52,8	50,1
10	62	66,7	57	54,2
Tehostuskanavisto				
11	147	150,4	65	59,4
12	147	157,4	61	54,8
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	158,1	52,6	46,4

Laskentatapa 1. Simulointi 3. Minimikammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	62,7	59,2
2	542	548	60,9	56,3
3	333	338,2	59	54,6
4	271	273,5	57	54,1
5	209	211	53,6	49,2
Tehostamaton kanavisto				
6	62	61,8	55	52,6
7	62	62	56,4	54
8	62	64,7	52,2	49,7
9	62	62,6	46,5	44,1
10	62	62,6	50,2	47,8
Tehostuskanavisto				
11	147	141,2	57,4	52,4
12	147	147,8	53,8	48,4
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	148,4	46,4	40,9

Simulointi 4.

Laskentatapa 1. Simulointi 4. Vakiokammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	947	71	65,5
2	689	734,8	68	59,6
3	480	519,3	64	53,8
4	271	293,7	60,5	57,2
5	62	66,2	59,1	58,7
Tehostamaton kanavisto				
6	62	63,7	58,4	55,5
7	62	63,9	59,8	57,3
8	62	66,5	55,2	52,5
9	62	69	56,4	53,5
10	62	66,2	56,2	53,5
Tehostuskanavisto				
11	147	148,5	63,4	57,9
12	147	151,7	56,7	50,9
13	147	159,1	51,1	44,8
14	147	158,5	55,5	49,2
15	0	0	0	0

Laskentatapa 1. Simulointi 4. Minimikammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	898	63,9	58,9
2	689	696,8	61,2	53,7
3	480	492,3	57,6	48,4
4	271	278,5	54,4	51,5
5	62	62,8	53,2	52,8
Tehostamaton kanavisto				
6	62	60,4	52,5	50,3
7	62	60,6	53,8	51,6
8	62	63	49,6	47,2
9	62	65,4	50,7	48,1
10	62	62,8	50,5	48,1
Tehostuskanavisto				
11	147	140,8	57,1	52,1
12	147	143,9	51	45,8
13	147	150,8	46	40,3
14	147	150,3	49,9	44,3
15	0	0	0	0

Simulointi 5.

Laskentatapa 1. Simulointi 5. Vakiokammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	498,6	71,1	69,6
2	395	431,1	70	67,1
3	333	364,3	68,3	63,3
4	271	194,7	66	62,7
5	209	227,3	62,2	48
Tehostamaton kanavisto				
6	62	67,5	65,5	62,7
7	62	66,7	65,3	62,6
8	62	63,9	50,9	48,4
9	62	67,4	53,9	51,2
10	62	67,4	58,2	55,4
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	159,9	53,8	47,4

Laskentatapa 1. Simulointi 5. Minimikammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	457	59,9	58,6
2	395	395,1	58,9	56,5
3	333	333,9	57,5	53,2
4	271	270,1	55,5	52,8
5	209	208,3	52,3	48
Tehostamaton kanavisto				
6	62	61,9	55,1	52,8
7	62	61,2	55	52,7
8	62	63,9	50,9	48,4
9	62	61,8	45,3	43
10	62	61,8	48,9	46,6
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	146,5	45,2	39,8

Simulointi 6.

Laskentatapa 1. Simulointi 6. Vakiokammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	779	71,2	67,3
2	689	714,9	68,4	60,5
3	480	497,7	64,7	55,3
4	418	433,4	60,6	53,5
5	209	216,7	56,6	51,9
Tehostamaton kanavisto				
6	62	64,1	59,2	56,7
7	62	64,3	60,7	58,2
8	62	64,3	51,6	49,1
9	62	64,3	49,1	46,5
10	62	64,3	52,9	50,4
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	147	152,9	57,6	51,7
13	0	0	0	0
14	147	152,4	50,4	44,6
15	147	152,4	48,9	43,1

Laskentatapa 1. Simulointi 6. Minimikammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	66,1	62,6
2	689	689,1	63,6	56,3
3	480	479,7	60,2	51,4
4	418	417,8	56,3	49,7
5	209	208,9	52,6	48,3
Tehostamaton kanavisto				
6	62	61,9	55,1	52,7
7	62	62	56,4	54,1
8	62	62	48	45,6
9	62	62	45,6	43,3
10	62	62	49,2	46,8
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	147	147,4	53,5	48,1
13	0	0	0	0
14	147	146,9	46,8	41,5
15	147	146,9	45,5	40,1

Simulointi 7.

Laskentatapa 1. Simulointi 7. Vakiokammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	604	670,9	71,1	68,3
2	395	451,9	69,8	66,7
3	333	385,4	67,9	62,3
4	124	141,8	66	65,2
5	62	69,5	65	64,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	67,2	65	62,3
7	62	66,5	64,8	62,1
8	62	71,2	63,2	60,2
9	62	72,3	62	58,9
10	62	69,5	61,8	58,8
Tehostuskanavisto				
11	147	151,8	66,2	60,5
12	0	0	0	0
13	147	172,4	58,8	51,4
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Laskentatapa 1. Simulointi 7. Minimikammiopaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	604	604	57,7	55,5
2	395	406,8	56,7	54,1
3	333	346,9	55,1	50,5
4	124	127,6	53,5	52,9
5	62	62,5	52,7	52,3
Tehostamaton kanavisto				
6	62	60,6	52,8	50,6
7	62	59,8	52,6	50,4
8	62	64,1	51,3	48,8
9	62	65,1	50,3	47,7
10	62	62,5	52,7	52,3
Tehostuskanavisto				
11	147	136,7	53,8	49,1
12	0	0	0	0
13	147	155,2	47,7	41,7
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Simulointi 2.

Laskentatapaus 2. Simulointi 2. Vakiokammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	310	87,1	86,5
2	248	248	86,6	85,7
3	186	186	86,1	84,8
4	124	124	85,4	84,9
5	62	62	84,7	84,7
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,5	34,1
7	62	62	36,5	34,1
8	62	62	36,5	34,1
9	62	62	36,5	34,1
10	62	62	36,5	34,1
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	84,6	82,3
12	62	62	84,7	82,4
13	62	62	83,6	81,3
14	62	62	82,8	80,4
15	62	62	82,4	80
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

Laskentatapaus 2. Simulointi 2. Minimikammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	310	87,1	86,6
2	248	248	86,6	85,2
3	186	186	86,6	84,3
4	124	124	85	84,4
5	62	62	84,2	83,8
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,5	34,1
7	62	62	36,5	34,1
8	62	62	36,5	34,1
9	62	62	36,5	34,1
10	62	62	36,5	34,1
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	64,2	61,8
12	62	62	64,3	61,9
13	62	62	63,2	60,8
14	62	62	62,3	59,9
15	62	62	61,9	59,9
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

Simulointi 3.

Laskentatapaus 2. Simulointi 3. Vakiokammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	752,3	87,1	83,2
2	542	575,3	85	79,9
3	333	352,3	82,9	78,2
4	271	288	80,7	77,6
5	209	223,8	77	72,1
Tehostamaton kanavisto				
6	62	64,3	39,2	36,7
7	62	64,4	39,3	36,7
8	62	64,3	39,2	36,7
9	62	64,1	39	36,5
10	62	64,3	39,1	36,6
Tehostamaton kanavisto				
11	62	64,3	78,8	76,3
12	62	64,4	80,4	77,9
13	62	64,3	76	73,5
14	62	64,1	69,5	67
15	62	64,3	73,6	71,1
Tehostuskanavisto				
16	147	152,6	80,7	74,9
17	147	158,7	76,8	70,6
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	159,6	68,5	62,2

Laskentatapaus 2. Simulointi 3. Minimikammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	87,1	74,7
2	542	545,3	85	71,8
3	333	333,8	82,9	70,3
4	271	272,9	80,7	69,7
5	209	212,1	77	64,8
Tehostamaton kanavisto				
6	62	61	35,3	33
7	62	61	35,3	33
8	62	60,8	35,1	32,8
9	62	60,8	35,1	32,8
10	62	60,9	35,2	32,9
Tehostamaton kanavisto				
11	62	61	70,9	68,6
12	62	61	72,3	70
13	62	60,8	68,3	66,1
14	62	60,8	62,5	60,2
15	62	60,9	66,1	63,9
Tehostuskanavisto				
16	147	144,7	72,6	67,3
17	147	150,5	69,1	63,4
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	151,2	61,6	55,9

Simulointi 4.

Laskentatapaus 2. Simulointi 4. Vakiokammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	943,4	87,1	81,4
2	689	728,8	84	75,7
3	480	511,1	80,1	70,2
4	271	287	76,7	73,5
5	62	63,6	75,4	75
Tehostamaton kanavisto				
6	62	63,6	38,3	35,9
7	62	63,6	38,3	35,9
8	62	63,5	38,2	35,8
9	62	63,6	38,3	35,8
10	62	63,6	38,3	35,8
Tehostamaton kanavisto				
11	62	63,6	74,8	72,3
12	62	63,6	76,3	73,8
13	62	63,5	72	69,5
14	62	63,6	73,3	70,9
15	62	63,6	72,9	70,5
Tehostuskanavisto				
16	147	151,1	79	73,4
17	147	154,1	72,4	66,5
18	147	160,6	66,2	59,9
19	147	160	70,5	64,1
20	0	159,6	68,5	62,2

Laskentatapaus 2. Simulointi 4. Minimikammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	898	87,1	73,8
2	689	693,7	84	68,6
3	480	486,4	80,1	63,6
4	271	273,2	76,7	66,6
5	62	60,5	75,4	67,9
Tehostamaton kanavisto				
6	62	60,5	34,7	32,5
7	62	60,5	34,8	32,5
8	62	60,4	34,6	32,4
9	62	60,5	34,7	32,5
10	62	60,5	34,7	32,5
Tehostamaton kanavisto				
11	62	60,5	67,8	65,6
12	62	60,5	69,1	66,9
13	62	60,4	65,2	63
14	62	60,5	66,4	64,2
15	62	60,5	66,1	63,8
Tehostuskanavisto				
16	147	143,8	71,6	66,5
17	147	146,7	65,7	60,3
18	147	152,8	60	54,2
19	147	152,2	63,9	58,1
20	0	0	0	0

Simulointi 5.

Laskentatapaus 2. Simulointi 5. Vakiokammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	491,9	87,1	85,6
2	395	425,6	84	79,7
3	333	359,4	84,3	79,4
4	271	293,1	82,1	78,8
5	209	227	78,2	73,1
Tehostamaton kanavisto				
6	62	66,3	41,6	38,9
7	62	66,3	41,6	39
8	62	66,2	41,6	38,9
9	62	66,2	41,5	38,8
10	62	66,2	41,6	38,9
Tehostamaton kanavisto				
11	62	66,3	81,9	79,2
12	62	66,3	81,7	79
13	62	66,2	77,1	74,4
14	62	66,2	70,4	67,8
15	62	66,2	74,7	72
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	160,7	69,5	63,1

Laskentatapaus 2. Simulointi 5. Minimikammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	457	87,1	73,9
2	395	395,4	84	71,8
3	333	333,8	84,3	68,6
4	271	273,3	82,1	68,1
5	209	210,8	78,2	63,1
Tehostamaton kanavisto				
6	62	61,6	36	33,7
7	62	61,6	36	33,7
8	62	61,5	35,9	33,6
9	62	61,5	35,8	33,5
10	62	61,5	35,8	33,5
Tehostamaton kanavisto				
11	62	61,6	70,8	68,5
12	62	61,6	70,6	68,3
13	62	61,5	66,6	64,3
14	62	61,5	60,8	58,5
15	62	61,5	64,4	62,1
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	149,3	60	54,4

Simulointi 6.

Laskentatapaus 2. Simulointi 6. Vakiokammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	782,1	87,1	83,2
2	689	718,4	84,3	76,3
3	480	499,9	80,6	71,1
4	418	436	76,4	69,2
5	209	218,2	72,3	67,6
Tehostamaton kanavisto				
6	62	63,7	38,5	36
7	62	63,7	38,5	36,1
8	62	63,6	38,4	35,9
9	62	63,6	38,4	35,9
10	62	63,7	38,4	36
Tehostamaton kanavisto				
11	62	63,7	75,3	72,9
12	62	63,7	76,8	74,4
13	62	63,6	67,7	65,2
14	62	63,6	65,1	62,7
15	62	63,7	69	66,6
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	147	154,7	73	67,1
18	0	0	0	0
19	147	154,5	65,7	59,8
20	147	154,5	64,3	58,3

Laskentatapaus 2. Simulointi 6. Minimikammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	87,1	76,8
2	689	689	84,3	70,4
3	480	480	80,6	65,6
4	418	418,9	76,4	63,8
5	209	209,5	72,3	62,4
Tehostamaton kanavisto				
6	62	61,2	35,5	33,2
7	62	61,2	35,5	33,3
8	62	61,1	35,4	33,1
9	62	61,1	35,4	33,1
10	62	61,1	35,4	33,2
Tehostamaton kanavisto				
11	62	61,2	69,5	67,3
12	62	61,2	70,9	68,6
13	62	61,1	62,4	60,1
14	62	61,1	60,1	57,8
15	62	61,1	63,6	61,3
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	147	148,6	67,4	61,9
18	0	0	0	0
19	147	148,3	60,6	55,1
20	147	148,4	59,2	53,8

Simulointi 7.

Laskentatapaus 2. Simulointi 7. Vakiokammiopaineella				
Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	604	649,4	87,1	84,4
2	395	430,7	85,8	83
3	333	365,8	84,1	79
4	124	129,7	82,3	81,7
5	62	64,8	78,2	73,1
Tehostamaton kanavisto				
6	62	64,8	39,9	37,3
7	62	64,8	39,9	37,3
8	62	64,8	39,8	37,3
9	62	64,8	39,8	37,3
10	62	64,8	39,8	37,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	64,8	81,8	79,2
12	62	64,8	81,5	79
13	62	64,8	80,4	77,8
14	62	64,8	79,4	76,9
15	62	64,8	79	76,4
Tehostuskanavisto				
16	147	153,9	82,7	76,8
17	0	0	0	

Simulointi 2.

Laskentatapaus 3. Simulointi 2. Vakiokammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	310	121	120,4
2	248	248	120,5	119,6
3	186	186	120	118,7
4	124	124	119,3	118,8
5	62	62	118,6	118,2
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	118,8	116,4
12	62	62	118,8	116,5
13	62	62	117,8	115,4
14	62	62	116,9	114,5
15	62	62	116,5	114,1
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

Laskentatapaus 3. Simulointi 2. Minimikammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	310	93	92,4
2	248	248	92,5	91,6
3	186	186	92	90,7
4	124	124	91,4	90,8
5	62	62	90,6	90,2
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	90,8	88,4
12	62	62	90,9	88,5
13	62	62	89,8	87,4
14	62	62	88,9	86,5
15	62	62	88,5	86,1
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	0	0	0	0

Simulointi 3.

Laskentatapaus 3. Simulointi 3. Vakiokammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	120,9	117,4
2	542	542	119,2	114,6
3	333	333	117,2	113
4	271	271	115,3	112,5
5	209	209	112	107,7
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	113,8	111,4
12	62	62	115,2	112,9
13	62	62	111,3	108,9
14	62	62	105,5	103,2
15	62	62	109,1	106,8
Tehostuskanavisto				
16	147	147	42,9	37,5
17	147	147	42,9	37,5
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	147	42,9	37,5

Laskentatapaus 3. Simulointi 3. Minimikammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	108,7	105,2
2	542	542	107	102,4
3	333	333	105	100,8
4	271	271	103,1	100,3
5	209	209	99,8	95,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	101,6	99,3
12	62	62	103	100,7
13	62	62	99,1	96,7
14	62	62	93,4	91
15	62	62	96,9	94,6
Tehostuskanavisto				
16	147	147	42,9	37,5
17	147	147	42,9	37,5
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	147	42,9	37,5

Simulointi 4.

Laskentatapaus 3. Simulointi 4. Vakiokammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	898	120,8	115,9
2	689	689	118,2	110,8
3	480	480	114,7	106
4	271	271	111,7	108,9
5	62	62	110,5	110,1
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	110,1	107,8
12	62	62	111,5	109
13	62	62	107,6	105,3
14	62	62	108,8	106,4
15	62	62	108,4	106
Tehostuskanavisto				
16	147	147	42,9	37,5
17	147	147	42,9	37,5
18	147	147	42,9	37,5
19	147	147	42,9	37,5
20	0	0	0	0

Laskentatapaus 3. Simulointi 4. Minimikammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	898	110,9	105,9
2	689	689	108,1	100,7
3	480	480	104,6	95,8
4	271	271	101,5	98,8
5	62	62	100,4	100
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	100	97,7
12	62	62	101,4	99
13	62	62	97,5	95,2
14	62	62	98,7	96,3
15	62	62	98,3	95,9
Tehostuskanavisto				
16	147	147	42,9	37,5
17	147	147	42,9	37,5
18	147	147	42,9	37,5
19	147	147	42,9	37,5
20	0	0	0	0

Simulointi 5.

Laskentatapaus 3. Simulointi 5. Vakiokammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	457	121	119,7
2	395	395	120	117,6
3	333	333	118,5	114,3
4	271	271	116,6	113,8
5	209	209	113,3	109
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	116,7	114,4
12	62	62	116,5	114,2
13	62	62	112,6	110,2
14	62	62	106,9	104,5
15	62	62	110,4	108,1
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	147	42,9	37,5

Laskentatapaus 3. Simulointi 5. Minimikammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	457	107,5	106,2
2	395	395	106,5	104,1
3	333	333	105	100,8
4	271	271	103,1	100,3
5	209	209	99,8	95,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	103,2	100,9
12	62	62	103	100,7
13	62	62	99,1	96,7
14	62	62	93,4	91
15	62	62	96,9	94,6
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	0	0	0	0
18	0	0	0	0
19	0	0	0	0
20	147	147	42,9	37,5

Simulointi 6.

Laskentatapaus 3. Simulointi 6. Vakiokammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	120,9	117,4
2	689	689	118,4	111
3	480	480	115	106,2
4	418	418	111,1	104,5
5	209	209	107,3	103
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	110,3	108
12	62	62	111,7	109,4
13	62	62	103,2	100,9
14	62	62	100,9	98,5
15	62	62	104,4	102,1
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	147	147	42,9	37,5
18	0	0	0	0
19	147	147	42,9	37,5
20	147	147	42,9	37,5

Laskentatapaus 3. Simulointi 6. Minimikammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	113,4	109,9
2	689	689	110,9	103,5
3	480	480	107,4	98,7
4	418	418	103,6	97
5	209	209	99,8	95,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	102,8	100,5
12	62	62	104,2	101,9
13	62	62	95,7	93,4
14	62	62	93,4	91
15	62	62	96,9	94,6
Tehostuskanavisto				
16	0	0	0	0
17	147	147	42,9	37,5
18	0	0	0	0
19	147	147	42,9	37,5
20	147	147	42,9	37,5

Simulointi 7.

Laskentatapaus 3. Simulointi 7. Vakiokammioaineella

Laskentapisti	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	604	604	120,9	118,7
2	395	395	119,9	117,5
3	333	333	118,5	114,3
4	124	124	117	116,4
5	62	62	116,2	115,8
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	36,7	34,3
7	62	62	36,7	34,3
8	62	62	36,7	34,3
9	62	62	36,7	34,3
10	62	62	36,7	34,3
Tehostamaton kanavisto				
11	62	62	116,6	114,3
12	62	62	116,4	114,1
13	62			

Simulointi 2.

Laskentatapa 4. Simulointi 2. Vakiokammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	310	101	100,4
2	248	248	100,7	99,7
3	186	186	100,1	98,8
4	124	124	99,5	99
5	62	62	99,2	98,8
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Laskentatapa 4. Simulointi 2. Minimikammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	310	310	49,5	48,9
2	248	247,9	49,2	48,3
3	186	185,8	48,6	47,3
4	124	123,8	48,1	47,5
5	62	61,9	47,7	47,4
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62,1	42,6	36,8
7	62	62,1	42,5	36,8
8	62	62	42,4	36,7
9	62	61,9	42,4	36,7
10	62	61,9	42,3	36,6
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Simulointi 3.

Laskentatapa 4. Simulointi 3. Vakiokammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	100,8	97,3
2	542	542	99,7	95,1
3	333	333	97,8	93,6
4	271	271	96	93,2
5	209	209	93,9	89,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	147	147	48,4	43
12	147	147	48,4	43
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	147	48,4	43

Laskentatapa 4. Simulointi 3. Minimikammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	84	80,3
2	542	542	82,7	78,1
3	333	333	80,8	76,6
4	271	271	79	76,2
5	209	209	76,9	72,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	147	147	48,4	43
12	147	147	48,4	43
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	147	48,4	43

Simulointi 4.

Laskentatapa 4. Simulointi 4. Vakiokammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	898	100,8	95,8
2	689	689	99	91,6
3	480	480	95,6	86,8
4	271	271	92,2	89,4
5	62	62	90,9	90,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	147	147	48,4	43
12	147	147	48,4	43
13	147	147	48,4	43
14	147	147	48,4	43
15	0	0	0	0

Laskentatapa 4. Simulointi 4. Minimikammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	898	898	90,5	85,6
2	689	689	88,8	81,4
3	480	480	85,4	76,6
4	271	271	82	79,2
5	62	62	80,7	80,3
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	147	147	48,4	43
12	147	147	48,4	43
13	147	147	48,4	43
14	147	147	48,4	43
15	0	0	0	0

Simulointi 5.

Laskentatapa 4. Simulointi 5. Vakiokammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	457	100,9	99,6
2	395	395	100,3	97,9
3	333	333	98,7	94,5
4	271	271	96,9	94,1
5	209	209	94,7	90,4
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	147	48,8	43

Laskentatapa 4. Simulointi 5. Minimikammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	457	457	83	81,8
2	395	395	82,4	80
3	333	333	80,8	76,6
4	271	271	79	76,2
5	209	209	76,9	72,5
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	0
15	147	147	48,8	43

Simulointi 6.

Laskentatapa 4. Simulointi 6. Vakiokammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	100,8	97,3
2	689	689	98,9	91,6
3	480	480	95,5	86,8
4	418	418	91,9	85,3
5	209	209	88,9	84,6
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	147	147	48,4	43
13	0	0	0	0
14	147	147	48,4	43
15	147	147	48,4	43

Laskentatapa 4. Simulointi 6. Minimikammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	751	751	91,8	88,5
2	689	689	89,9	82,5
3	480	480	86,5	77,7
4	418	418	82,8	76,5
5	209	209	79	79,8
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	0	0	0	0
12	147	147	48,4	43
13	0	0	0	0
14	147	147	48,4	43
15	147	147	48,4	43

Simulointi 7.

Laskentatapa 4. Simulointi 7. Vakiokammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	604	604	100,9	98,7
2	395	395	100,2	97,8
3	333	333	98,6	94,4
4	124	124	96,8	96,2
5	62	62	96,5	96,1
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	147	147	48,4	43
12	0	0	0	0
13	147	147	48,4	43
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Laskentatapa 4. Simulointi 7. Minimikammioaineella				
Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Runkokanava				
1	604	604	82,2	79,9
2	395	395	81,5	79,1
3	333	333	79,9	75,7
4	124	124	78,1	77,5
5	62	62	77,7	77,4
Tehostamaton kanavisto				
6	62	62	42,4	36,7
7	62	62	42,4	36,7
8	62	62	42,4	36,7
9	62	62	42,4	36,7
10	62	62	42,4	36,7
Tehostuskanavisto				
11	147	147	48,4	43
12	0	0	0	0
13	147	147	48,4	43
14	0	0	0	0
15	0	0	0	0

Simulointi 2.

Laskentatapaus 5. Simulointi 2. Vakiokammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	310	327,8	65	64,3
Tehostamaton kanavisto				
2	62	65,6	57,4	54,8
3	62	65,6	63	60,4
4	62	65,5	63	60,4
5	62	65,6	59,4	56,8
6	62	65,6	56,4	53,8
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0

Laskentatapaus 5. Simulointi 2. Minimikammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	310	310	58,2	57,5
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	51,3	49
3	62	62	54,1	51,7
4	62	62	56,4	54
5	62	62	53,2	50,8
6	62	62	50,4	48,1
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0

Simulointi 3.

Laskentatapaus 5. Simulointi 3. Vakiokammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	773,3	65	61
Tehostamaton kanavisto				
2	62	63,8	54,4	52
3	62	63,8	57,3	54,8
4	62	63,8	59,7	57,2
5	62	63,8	56,3	53,9
6	62	63,8	53,5	51
Tehostuskanavisto				
7	147	151,4	47,4	41,7
8	147	151,4	52,1	46,4
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	151,4	48,8	43,1

Laskentatapaus 5. Simulointi 3. Minimikammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	751	61,3	57,6
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	51,3	49
3	62	62	56,4	54
4	62	62	56,4	54
5	62	62	53,2	50,8
6	62	62	50,4	48,1
Tehostuskanavisto				
7	147	147	44,7	39,3
8	147	147	49,1	43,7
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	147	46	40,6

Simulointi 4.

Laskentatapaus 5. Simulointi 4. Vakiokammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	898	912,4	65	59,5
Tehostamaton kanavisto				
2	62	63	53	50,6
3	62	63	55,8	53,4
4	62	63	58,2	55,8
5	62	63	54,9	52,5
6	62	63	52	49,6
Tehostuskanavisto				
7	147	149,4	46,1	40,6
8	147	149,4	50,7	45,1
9	147	149,3	56,6	51,1
10	147	149,4	52,1	46,5
11	0	0	0	0

Laskentatapaus 5. Simulointi 4. Minimikammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	898	898	63	57,6
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	51,3	49
3	62	62	54,1	51,7
4	62	62	56,4	54
5	62	62	53,2	50,8
6	62	62	50,4	48,1
Tehostuskanavisto				
7	147	147	44,7	39,3
8	147	147	49,1	43,7
9	147	147	54,9	49,5
10	147	147	50,5	45,1
11	0	0	0	0

Simulointi 5.

Laskentatapaus 5. Simulointi 5. Vakiokammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	457	480,2	65	63,5
Tehostamaton kanavisto				
2	62	65,1	56,7	54,1
3	62	65,1	59,7	57,1
4	62	65,1	62,2	59,6
5	62	65,1	58,6	56,1
6	62	65,1	55,7	53,1
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	154,5	50,8	44,9

Laskentatapaus 5. Simulointi 5. Minimikammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	457	457	58,9	57,6
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	51,3	49
3	62	62	54,1	51,7
4	62	62	56,4	54
5	62	62	53,2	50,8
6	62	62	50,4	48,1
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	147	46	40,6

Simulointi 6.

Laskentatapaus 5. Simulointi 6. Vakiokammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	773,3	65	61
Tehostamaton kanavisto				
2	62	63,8	54,4	52
3	62	63,8	57,3	54,8
4	62	63,8	59,7	57,2
5	62	63,8	56,3	53,9
6	62	63,8	53,5	51
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	147	151,4	52,1	46,4
9	0	0	0	0
10	147	151,4	53,5	47,8
11	147	151,4	48,8	43,1

Laskentatapaus 5. Simulointi 6. Minimikammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	751	61,3	57,6
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	51,3	49
3	62	62	54,1	51,7
4	62	62	56,4	54
5	62	62	53,2	50,8
6	62	62	50,4	48,1
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	147	147	49,1	43,7
9	0	0	0	0
10	147	147	50,5	45,1
11	147	147	46	40,6

Simulointi 7.

Laskentatapaus 5. Simulointi 7. Vakiokammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	604	628,9	65	62,4
Tehostamaton kanavisto				
2	62	64,6	55,7	53,1
3	62	64,6	58,6	56,1
4	62	64,6	61,1	58,5
5	62	64,6	64,6	55,1
6	62	64,6	54,7	52,1
Tehostuskanavisto				
7	147	153,1	48,5	42,6
8	0	0	0	0
9	147	153	59,4	53,6
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0

Laskentatapaus 5. Simulointi 7. Minimikammiopaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	604	604	60	57,6
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	51,3	49
3	62	62	54,1	51,7
4	62	62	56,4	54
5	62	62	53,2	50,8
6	62	62	50,4	48,1
Tehostuskanavisto				
7	147	147	44,7	39,3
8	0	0	0	0
9	147	147	54,9	49,5
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0

Simulointi 2.

Laskentatapaus 6. Simulointi 2. Vakiokammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	310	310	77,2	76,6
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	70,4	68
3	62	62	73,1	70,8
4	62	62	75,4	73
5	62	62	72,2	69,8
6	62	62	69,4	67,1
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
Tehostamaton kanavisto				
12	62	62	36,8	34,4
13	62	62	36,8	34,4
14	62	62	36,8	34,4
15	62	62	36,8	34,4
16	62	62	36,8	34,4

Laskentatapaus 6. Simulointi 2. Minimikammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	310	310	70,5	69,9
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	63,7	61,3
3	62	62	66,4	64,1
4	62	62	68,7	66,3
5	62	62	65,5	63,1
6	62	62	62,7	60,4
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
Tehostamaton kanavisto				
12	62	62	36,8	34,4
13	62	62	36,8	34,4
14	62	62	36,8	34,4
15	62	62	36,8	34,4
16	62	62	36,8	34,4

Simulointi 3.

Laskentatapaus 6. Simulointi 3. Vakiokammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	769	77,2	73,3
Tehostamaton kanavisto				
2	62	63,5	66,7	64,3
3	62	63,5	69,6	67,1
4	62	63,5	72	69,5
5	62	63,5	68,6	66,2
6	62	63,5	65,8	63,3
Tehostuskanavisto				
7	147	150,5	59,8	54,1
8	147	150,5	64,4	58,8
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	150,5	61,2	55,5
Tehostamaton kanavisto				
12	62	63,5	38,6	36,1
13	62	63,5	38,5	36,1
14	62	63,5	38,5	36,1
15	62	63,5	38,5	36,1
16	62	63,5	38,6	36,1

Laskentatapaus 6. Simulointi 3. Minimikammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	751	73,7	69,9
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	63,7	61,3
3	62	62	66,4	64,1
4	62	62	68,7	66,3
5	62	62	65,5	63,1
6	62	62	62,7	60,4
Tehostuskanavisto				
7	147	147	57	51,6
8	147	147	61,4	56,1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	147	58,3	52,9
Tehostamaton kanavisto				
12	62	62	36,8	34,4
13	62	62	36,8	34,4
14	62	62	36,8	34,4
15	62	62	36,8	34,4
16	62	62	36,8	34,4

Simulointi 4.

Laskentatapaus 6. Simulointi 4. Vakiokammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	898	909,4	77,2	71,7
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62,8	65,3	62,9
3	62	62,8	68,1	65,7
4	62	62,8	70,4	68
5	62	62,8	67,1	64,7
6	62	62,8	64,3	61,9
Tehostuskanavisto				
7	147	147	58,5	52,9
8	147	148,9	63	57,5
9	147	148,8	68,9	63,4
10	147	148,9	64,4	58,8
11	0	0	0	0
Tehostamaton kanavisto				
12	62	62,8	37,7	35,3
13	62	62,8	37,7	35,3
14	62	62,8	37,7	35,3
15	62	62,8	37,7	35,3
16	62	62,8	37,7	35,3

Laskentatapaus 6. Simulointi 4. Minimikammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	898	898	75,3	69,9
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	63,7	61,3
3	62	62	66,4	64,1
4	62	62	68,7	66,3
5	62	62	65,5	63,1
6	62	62	62,7	60,4
Tehostuskanavisto				
7	147	147	57	51,6
8	147	147	61,4	56,1
9	147	147	67,2	61,8
10	147	147	62,8	57,4
11	0	0	0	0
Tehostamaton kanavisto				
12	62	62	36,8	34,4
13	62	62	36,8	34,4
14	62	62	36,8	34,4
15	62	62	36,8	34,4
16	62	62	36,8	34,4

Simulointi 5.

Laskentatapaus 6. Simulointi 5. Vakiokammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	457	475,9	77,2	75,7
Tehostamaton kanavisto				
2	62	64,6	69	66,5
3	62	64,6	72	69,4
4	62	64,5	74,4	71,9
5	62	64,6	71	68,4
6	62	64,6	68	65,5
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	153,1	63,2	57,4
Tehostamaton kanavisto				
12	62	64,6	39,8	37,3
13	62	64,6	39,8	37,3
14	62	64,5	39,8	37,3
15	62	64,5	39,8	37,3
16	62	64,5	39,8	37,3

Laskentatapaus 6. Simulointi 5. Minimikammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	457	457	71,3	69,9
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	63,7	61,3
3	62	62	66,4	64,1
4	62	62	68,7	66,3
5	62	62	65,5	63,1
6	62	62	62,7	60,4
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	147	147	58,3	52,9
Tehostamaton kanavisto				
12	62	62	36,8	34,4
13	62	62	36,8	34,4
14	62	62	36,8	34,4
15	62	62	36,8	34,4
16	62	62	36,8	34,4

Simulointi 6.

Laskentatapaus 6. Simulointi 6. Vakiokammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	769	77,2	73,3
Tehostamaton kanavisto				
2	62	63,5	66,7	64,3
3	62	63,5	69,6	67,1
4	62	63,5	72	69,5
5	62	63,5	68,6	66,2
6	62	63,5	65,8	63,3
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	147	150,5	64,4	58,8
9	0	0	0	0
10	147	150,5	65,8	60,2
11	147	150,5	61,2	55,5
Tehostamaton kanavisto				
12	62	63,5	38,5	36,1
13	62	63,5	38,5	36,1
14	62	63,5	38,5	36,1
15	62	63,5	38,5	36,1
16	62	63,5	38,5	36,1

Laskentatapaus 6. Simulointi 6. Minimikammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	751	751	73,7	69,9
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	63,7	61,3
3	62	62	66,4	64,1
4	62	62	68,7	66,3
5	62	62	65,5	63,1
6	62	62	62,7	60,4
Tehostuskanavisto				
7	0	0	0	0
8	147	147	61,4	56,1
9	0	0	0	0
10	147	147	62,8	57,4
11	147	147	58,3	52,9
Tehostamaton kanavisto				
12	62	62	36,8	34,4
13	62	62	36,8	34,4
14	62	62	36,8	34,4
15	62	62	36,8	34,4
16	62	62	36,8	34,4

Simulointi 7.

Laskentatapaus 6. Simulointi 7. Vakiokammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	604	624,3	77,2	74,6
Tehostamaton kanavisto				
2	62	64,1	68	65,5
3	62	64,1	70,9	68,4
4	62	64,1	73,3	70,8
5	62	64,1	69,9	67,4
6	62	64,1	67	64,5
Tehostuskanavisto				
7	147	152	60,9	55,1
8	0	0	0	0
9	147	151,9	71,7	66
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
Tehostamaton kanavisto				
12	62	64,1	39,3	36,8
13	62	64,1	39,3	36,8
14	62	64,1	39,3	36,8
15	62	64,1	39,3	36,8
16	62	64,1	39,3	36,8

Laskentatapaus 6. Simulointi 7. Minimikammioaineella

Laskentapiste	qv set [dm³/s]	qv [dm³/s]	pt [Pa]	pst [Pa]
Tuloilmakammio				
1	604	604	72,3	69,9
Tehostamaton kanavisto				
2	62	62	63,7	61,3
3	62	62</		