

Sami Kemppainen

Tarpeenmukainen ilmanvaihto monitoimiaree- nassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Talotekniikka

Insinöörityö

3.2.2019

Tekijä Otsikko	Sami Kemppainen Tarpeenmukainen ilmanvaihto monitoimiareenassa
Sivumäärä Aika	37 sivua + 2 liitettä 3.2.2019
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	talotekniikka
Ammatillinen pääaine	LVI-suunnittelu
Ohjaajat	lehtori Seppo Innanen diplomi-insinööri Kai Lindgren
<p>Tämän insinööriyön tarkoitus on selvittää monitoimiareenoihin sovellettavissa olevia ilmanvaihtotapoja ja määrittää ilmanvaihdon ohjaamista tarpeenmukaisesti. Työssä on esitetty olemassa olevien monitoimiareenoiden ilmanvaihtoratkaisuja Suomessa ja maailmalla sekä verrattu eri toteutusvaihtoehtoja toisiinsa. Lisäksi on tutkittu monitoimiareenassa syntyviä kuormia ja suunniteltuun sisäilman laadun asetusarvoihin vaadittavaa ilmanvaihdon määrää tilanteittain.</p> <p>Insinööriyöstä selviää, sekä areenan ilmanvaihto-, jäähdytys- ja lämmitysratkaisujen si-donnaisuudet toisiinsa, että eri toteutuksien vaikutukset tarpeenmukaiseen ohjaukseen. Työssä todetaan ilmanvaihdon käyttäytymisen monitoimiareenassa olevan monimutkaisten keskenään vaikuttavien fysikaalisten ilmiöiden lopputulema, jonka suunnittelu on järkevintä suorittaa dynaamisia simulointiohjelmia käyttäen.</p> <p>Työssä esitetty kokonaisuus osoittaa katsomon ilmanvaihdon, jäähdytyksen sekä lämmit-tyksen toteutustavan valinnan vaikuttavan monitoimiareenan olosuhteisiin ja energian kulu-tukseen. Se esittää, kuinka ilmanvaihtotavan valinta tulee huomioida uusien monitoi-miareenoiden suunnittelussa heti projektin alussa olosuhteiden ja energiakulutuksen opti-moimiseksi. Insinööriyö sopii monitoimiareenan taloautomaation ilmanvaihdon ohjauslogii-kan rakentamisen sekä uusien hallien ilmanvaihdon toteutustavan valinnan pohjatedoksi.</p>	
Avainsanat	monitoimiareena, ilmanvaihto, jäähalli, tarpeenmukainen, CFD-simulointi, energiakulutus, katsomo

Author Title	Sami Kempainen Demand Controlled Ventilation in a Multipurpose Arena
Number of Pages Date	37 pages + 2 appendices 3 February 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Professional Major	HVAC Design
Instructors	Seppo Innanen, Senior Lecturer Kai Lindgren, MSc
<p>The purpose of this this bachelor's thesis was to study different types of air distribution systems used in multipurpose arenas. The goal was to define how to control ventilation by demand to maintain designed indoor conditions.</p> <p>The thesis looked into real life examples of air distribution types used in multipurpose arenas throughout the world. Furthermore, it studied air pollution, humidity and heating/cooling loads created inside multipurpose arenas. The methods included collecting data from relevant literature on the topic, and expert interviews.</p> <p>The results of the project show that ventilation in multipurpose arenas is a complicated topic. Ventilation is influenced by several factors, which all affect each other simultaneously. Therefore, to achieve accurate results in designing ventilation for multipurpose arenas, dynamic simulation software tools are required.</p> <p>In conclusion, this thesis can offer base knowledge for the design and selection of ventilation methods for new multipurpose arenas. In addition, it provides information about how to set parameters in the building automation system to control ventilation in a multipurpose arena.</p>	
Keywords	multipurpose arena, ice hall, demand controlled ventilation, CFD-simulation, bleachers

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tilaaajayritys	1
1.2	Tausta	1
2	Monitoimiareena	2
2.1	Konsepti	2
2.2	Jäähallin erityispiirteet	2
2.3	IIHF:n ohjearvot maksimi-ilmankosteudelle jäähallissa	3
3	Ilmanvaihdon rooli areenan katsomossa	4
4	Ilmanjakotavat	5
4.1	Ilmanjaon toteutus olemassa olevissa halleissa	7
4.2	Monitoimiareenan ilmanvaihtotapojen keskinäinen vertailu	10
5	Monitoimiareenan lämpötilatase	14
5.1	Lämmitystilanne	14
5.2	Jäähdytystilanne	15
5.3	Kuormien muodostuminen	16
5.4	Areenan katsomon lämpötilatase	17
5.4.1	Lämpötilat talvella jääurheilukäytössä	17
5.4.2	Lämpötilat kesällä konserttikäytössä	19
6	Kosteusasapaino	21
7	Ilmavirtojen käyttäytyminen ja lämpötilakerrostuma	24
8	Erikoistilanteet	25
9	Ala- ja yläjakoisten tuloilmajärjestelmien hintaero	25
10	Tampereen areenan ilmanvaihto	26
10.1	Projektin lähtötiedot	26

10.2	Ilmanjakotapa	27
10.3	Tuloilma päätelaitteiden valmistajien näkemys toteutuksesta	29
10.4	Tuloilmalaitteiden valinta ja sijoittelu	30
10.5	Kuivaus- ja poistoilma	31
10.6	Ilmavirtojen ohjaus	31
11	Loppusanat	33
11.1	Yhteenveto	33
11.2	Kiitokset	34
	Lähteet	36
	Liitteet	
	Liite 1. Päätelaitevalmistajien ehdotukset areenan tuloilmanjaosta	
	Liite 2. Ala- ja yläjakoisen ilmanvaihtotavan kanavaosien hintavertailu	

Lyhenteet

CFD	Computational fluid dynamics. Laskennallinen virtausdynamiikka.
IIHF	International ice hockey federation. Kansainvälinen jääkiekkoliitto.
LVIA	Lämmitys, vesi, ilmastointi, automaatio. Talotekniikan eri järjestelmiä kuvaava yleisesti käytettävä lyhenne.
ppm	Parts per million. Miljoonasosa.

1 Johdanto

Insinööri työ on toteutettu Metropolia ammattikorkeakoulun talotekniikan tutkinto-ohjelman LVI-suunnitteluun suuntautuvan linjan päättötyönä. Työn tilaajana toimii Ramboll Finland Oy, jossa kirjoittaja on työskennellyt maaliskuusta 2017.

1.1 Tilaajayritys

Ramboll Group on monikansallinen suunnittelu- ja konsultointipalveluja tuottava säätiöomisteinen yritys. Sillä on toimipisteitä 35 maassa, joissa työskentelee vuonna 2018 13 000 asiantuntijaa. Suomen toiminnasta vastaa Ramboll Finland Oy, jonka palveluksessa on 2 300 työntekijää. (1)

1.2 Tausta

Ramboll Finland Oy toteuttaa Tampereelle rakennettavan uuden monitoimiareenan konsepti, rakenne, LVIA- ja energiasuunnittelun. Areena on osa Kansi ja Areena -nimellä tunnettua rautatien päälle toteutettavaa rakennushanketta. Kannen päälle toteutetaan areenan lisäksi toimisto-, liiketila- sekä asuinrakentamista. Areenan yhteyteen syntyy myös lähes 300 huonetta käsittävä hotelli. (2)

Tampereen areena hanke on esiintynyt mediassa kuluvana vuosikymmenenä useaan otteeseen. Suomessa mittakaavaltaan vastaava monitoimiareena on vain, yli kaksi vuosikymmentä sitten valmistunut, Helsingin Pasilan Hartwall Arena. Omasin kiinnostusta hankkeeseen jo pelkän media uutisoinnin pohjalta ja kuultuani Rambollin toteuttavan talotekniikan suunnittelua kohteeseen selvitin työnantajalta mahdollisuutta tehdä insinööri työ Tampereen Areenaan liittyen. Ramboll esitti aiheeksi hallin katsomo-osan ilmanvaihtoa painottuen tarvittaviin ulkoilmamääriin käyttötilanteittain sekä ilmanjakotapaan.

Työn tavoitteena on tuottaa tietoa monitoimiareenan katsomon ilmanvaihtojärjestelmän suunnitteluun ja käytönaikaiseen ohjaamiseen tarpeen mukaisesti energia- sekä kustannustehokkaasti. Ilmanvaihdon on kyettävä toteuttamaan kaikissa käyttötilanteissa terveellinen ja viihtyisä sisäilmasto hyvät kenttäolosuhteet säilyttäen. Työtä voi soveltaa myös muiden korkeita katsomorakenteita sisältävien tilojen suunnittelun apuna.

2 Monitoimiareena

2.1 Konsepti

Monitoimiareenan konseptina on mahdollistaa useita erilaisia käyttötarkoituksia samalle tilalle. Suuren sisätilakatsomokapasiteetin sisältävän hallin käyttöaste voidaan saada taloudellisesti kestäväälle tasolle tarjoamalla puitteet mahdollisimman monenlaisen tapahtuman tarpeisiin. Areenan yleisimpiä käyttötarkoituksia ovat

- jääurheilu (taitoluistelu, jääkiekko)
- kenttäurheilu (koripallo, salibandy, lentopallo)
- show-tapahtumat (konsertit, puhe-esiintymiset)
- messutapahtumat (kirpputorit, verkkopeli kokoontumiset)
- moottoriajoneuvoja sisältävät show-tapahtumat (monsteriautot, moottoripyörä stunt-show, karting).

Hallin taloteknisten järjestelmien on kyettävä luomaan oikeat olosuhteet kutakin käyttötarkoitusta varten. Jääurheilulla on olosuhteille erityisvaatimuksensa ilmanjaon ja sisäilman kosteuden suhteen. Moottoriurheilu puolestaan tuo sisätilaan pakokaasupäästöjä. Yllä luetelluista käyttötavoista edellä mainittujen ulkopuolelle jääneet ovat olosuhdevaatimuksiltaan perinteisempiä, mutta voivat kuitenkin poiketa toisistaan suurestikin esimerkiksi lämpökuormien suhteen. Tapahtumissa, joissa jää ei ole käytössä, peitetään se päälle sijoitettavilla eristelevyillä. (3)

2.2 Jäähallin erityispiirteet

Jääradan luominen sisätiloihin vaatii erityistekniikkaa sekä toimivan kokonaisuuden luomiseksi eri suunnittelualojen yhteistyötä (4, s. 28). Jään pintalämpötilan suositusarvo on käyttötarkoituksesta riippuen -3 ja -5 °C:n välillä (5, s. 3). Ilman kyky sitoa kosteutta on lämpötilariippuvainen (6), ja jään ylläpidosta aiheutuvat matalat sisälämpötilat vaativat sisäilman kosteuden hallintaa. Liian suuri ilmankosteus voi aiheuttaa: kosteuden tiivistymistä kylmille pinnoille, sumun syntymistä tai mikrobi- ja korroosio-ongelmia. Kosteus ilmassa kondensoituu jään pintaan ja vaikuttaa täten myös jään laadukkuuteen. Optimaalinen määrä vettä ilmassa jään laadun kannalta on $4-5$ g/m³ (5, s. 14). Sisäilman kosteutta voidaan hallita kierrättämällä hallin sisäilmaa erillisen ilmakuivaimen läpi tai

kuivaamalla tuloilma. Jäähallien kylmälaitteiden sekä kosteudenhallinnan tekniikkaa on käsitelty esimerkiksi Eetu Raappanan ja Jesse Maunun opinnäytetyössä Ranuan jäähallin ilmanvaihto- ja energiatehokkuus (7). Jäähallin rakenteiden kosteuskäyttäytymistä puolestaan on kartoittanut Merle Styf 2009 julkaistussa insinöörityössään, Jäähallin rakenteet.

2.3 IIHF:n ohjearvot maksimi-ilmankosteudelle jäähallissa

AIR TEMPERATURE AND HUMIDITY CRITERIA TO AVOID FOG

Table 5

Ice rink air temperature, °C	Maximum relative airhumidity, %
5	90
10	80
15	70
20	60

AIR TEMPERATURE AND HUMIDITY CRITERIA FOR ROT AND MOULD DAMAGES OF WOODEN STRUCTURES

Table 6

	Temperature, °C	Relative humidity, %
Rot	50–5	>90–95
Mould	55–0	>75–95

Kuva 1. Kansainvälisen jääkiekkoliiton ohjearvot sumun muodostumisen ehkäisemiseksi, sekä home- ja lahovahinkojen välttämiseksi (9, s. 44).

IIHF:n ilmoittama 90 %:n suhteellinen kosteus lämpötilassa 5 °C vastaa 5,8 g:aa absoluuttisena veden määränä kuutiossa ilmaa ja 60 % 20 °C:n lämpötilassa puolestaan on 10,5 g/m³, kun ilman tiheytenä käytetään arvoa $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$. Kuvassa 1 esitetty taulukko osoittaa absoluuttisen kosteusmäärän ilmassa olevan kriittinen etenkin matalissa lämpötiloissa. Pääsääntöisesti matalat lämpötilat ovat lähellä jäätä.

$$\rho V \frac{\partial x}{\partial t} = \dot{X}_{ac}(t) + \dot{X}_{aircirc}(t) + \dot{X}_{inf}(t) + \dot{X}_{people}(t) + \dot{X}_{ice}(t) + \dot{X}_{other}(t)$$

x on absoluuttinen ilmankosteus

ρ on ilman tiheys

V on hallin ilmatilavuus

t on ajanjakson pituus

\dot{X}_{ac} on kosteus ilmanvaihdosta

$\dot{X}_{aircirc}$ on kosteus kiertoilmasta (esim. ilmankuivan)

\dot{X}_{inf} on kosteus vuotoilmasta

\dot{X}_{people} on kosteus ihmisistä

\dot{X}_{ice} on jäähän kondensoituva kosteus

\dot{X}_{other} on kosteus muista lähteistä

Yhtälö: hallin kosteustasapaino (10)

3 Ilmanvaihdon rooli areenan katsomossa

Ilmanvaihdon tulee huolehtia epäpuhtauksien kuten hiilidioksidin ja haihtuvien kemiallisten yhdisteiden pitoisuuksien pysymistä haitallisiksi tunnettujen arvojen alapuolella (23). Se myös vastaa ilmankosteuden pysymisestä tavoitearvoissa. Monitoimiareenan katso-moilmanvaihdolla on kaksoisrooli tavanomaisten ilmanvaihdon tehtävien lisäksi myös lämpötilojen hallinnassa.

Rakennuksien sisälämpötila muodostuu sisäisten ja ulkoisten lämpökuormien perusteella. Kuorma on lämpötaseen kannalta joko negatiivinen tai positiivinen suunnittelu-arvoihin nähden. Lämpimän katsomon kannalta lämpötaseeseen negatiivisesti vaikuttavat hallin jää ja kylminä vuodenaikoina rakennuksen vaipan läpi syntyvät lämpöhäviöt. Positiivista kuormaa syntyy esimerkiksi hallissa käytettävästä tekniikasta kuten valaistuksesta ja näytöistä sekä ihmisistä. Lämpimänä vuodenaikana lämpökuormaa syntyy myös vaipan yli ulkoa sisälle. Ilmanvaihdon tehtävänä on tuloilman lämpötilaa ja tilavuusvirtaa ohjaamalla saattaa lämpötase tasapainoon suunniteltujen arvojen mukaisiksi. (10)

Monitoimiareenan vaatimukset ilmanvaihdolle vaihtelevat suuresti sisäisten kuormien, vuodenajan sekä käyttötilanteen tarpeiden mukaan. Suurinta jäähdytyskapasiteettia tarvitaan kesäajan konserttitilanteessa jolloin sisäisten kuormien lisäksi lämpökuormaa tulee myös rakennuksen ulkopuolelta. Suurin lämmitystehontarve on talvella hallin ollessa tyhjänä (10). Yhtälössä alla on esitetty hallin lämpötaseen laskenta.

$$\rho c_p V \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{people}(t) + Q_{light}(t) + Q_{eq}(t) + Q_{AC}(t) + Q_{inf}(t) + Q_{str}(t) + Q_{ice}(t)$$

ρ on ilman tiheys

c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti

T on ilman lämpötila

t on ajanjakson pituus

V on hallin ilmatilavuus

Q_{people} on lämpökuorma ihmisistä

Q_{light} on lämpökuorma valaistuksesta

Q_{eq} on lämpökuorma laitteista

Q_{AC} on lämpökuorma ilmanvaihdosta

Q_{inf} on lämpökuorma vuodoista

Q_{str} on lämpökuorma rakenteista

Q_{ice} on lämpökuorma jäädästä

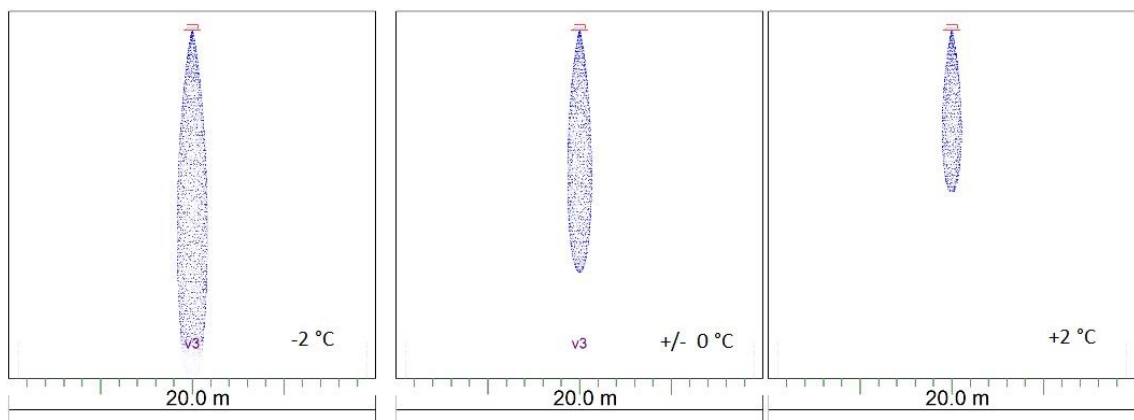
Yhtälö: hallin lämpötase (10)

4 Ilmanjakotavat

Koneellisesti järjestetyn tilan ilmanvaihto voidaan jaotella neljään pääperiaatteeseen: mäntä-, kerrostuma-, vyöhyke- ja sekoitusperiaatteeseen. Mäntäperiaatteessa tilaa huuhdellaan ilmavirralla puhaltamalla se koko huoneen poikki pinta-alalta ja poistamalla se vastakkaiselta sivulta. Kerrostumaperiaate nojaa tilan vertikaaliseen lämpötilakerrostumaan ja tilassa olevan lämpökuormituksen aiheuttamaan nostevirtaan. Vyöhykeperiaatteessa hallitaan oleskeluvyöhykkeiden olosuhteita, mutta sallitaan niiden ulkopuoli-

silla alueilla epäpuhtauksille ja kosteudelle korkeampia arvoja. Sekoittavassa ilmanvaihdossa pyritään tasaiseen olosuhteeseen koko tilassa laimentamalla syntyviä epäpuhtauksia mahdollisimman hyvin tilaan sekoittuvan tuloilman avulla. Tilan ilmanvaihdossa voidaan myös soveltaa edellä esiteltyjen periaatteiden yhdistelmiä. (11, s. 255–257.)

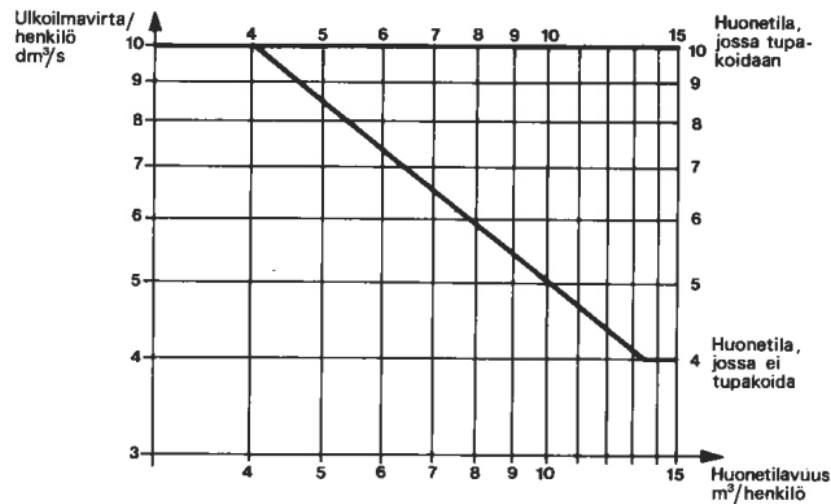
Ilmanjako voidaan jaotella myös puhallusnopeuden mukaan. Suurilla puhallusnopeuksilla tavanomaisissa tapauksissa ilmasuihkut hallitsevat ilman virtausta tilassa. Alhaisilla tuloilmanopeuksilla tilassa lämpökuormien ympärillä syntyvät konvektiovirtaukset ovat hallitsevia. Kuitenkin suurilla sisäisillä lämpökuormilla konvektiovirtaukset voivat olla hallitsevia myös sekoittavassa ilmanvaihdossa, vaikka tuloilman puhallusnopeus olisi korkea (11, s. 257). Ilman virtaamiseen vaikuttavat tilassa olevat pinnat ja niiden lämpötilat sekä huoneilman lämpötilat. Tuloilman lämpötilan suhde huonelämpötilaan vaikuttaa yhdessä ilmanvirran lähtönopeuden päätelaitteessa kanssa merkittävästi suihkun käyttäytymiseen. Etenkin vertikaalisesti suunnatussa suihkussa tuloilman ali- tai ylitämpöisyys on merkittävä tekijä suihkun nopeudelle ja heittopituudelle (kuva 2). Ylitämpöistä ilmaa puhallettaessa ei tiheyseroista johtuva nostevoima saa olla suihkun momenttia suurempi päätelaitteen ja suunnitellun suihkun päätepisteen välillä. (12, s. 145–146.)



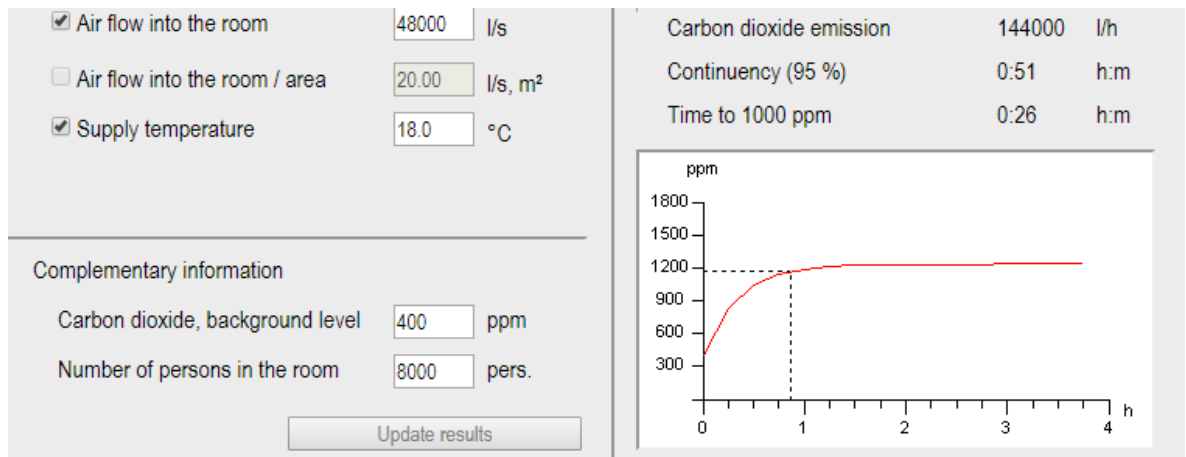
Kuva 2. Havainnekuva vertikaalisesti puhalletun tuloilmasuihkun lämpötilan vaikutuksesta heittopituuteen. Vasemmalta oikealle tuloilman lämpötila suhteessa huonelämpötilaan: alilämpöinen, isoterminen, ylitämpöinen. Kuva: Halton HIT -mitoitushjelma.

4.1 Ilmanjaon toteutus olemassa olevissa halleissa

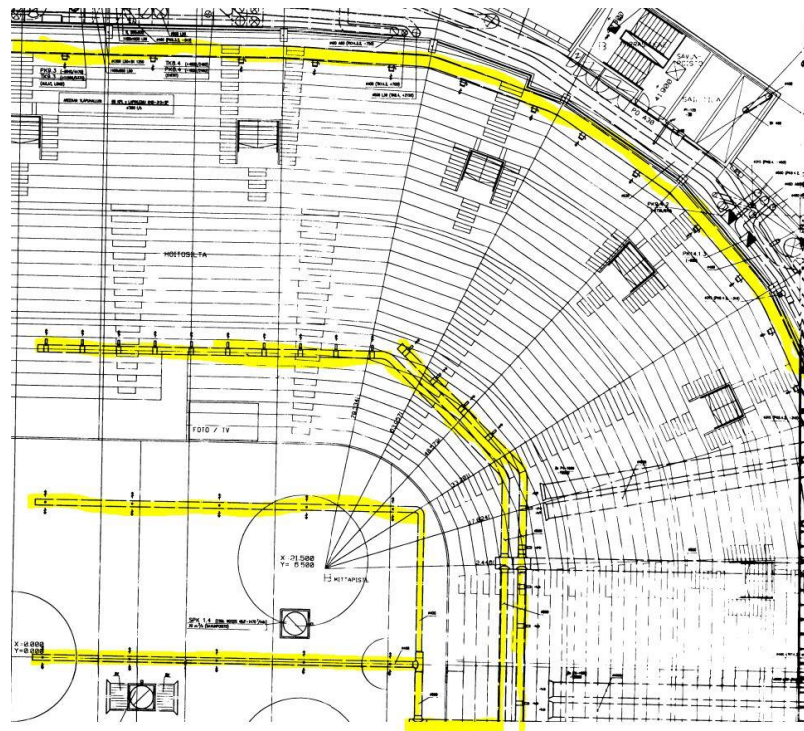
1997 valmistunut Helsingin Hartwall Arena on kirjoitushetkellä katsomokapasiteetiltaan suurin monitoimiareena Suomessa. Alakatsomon ilmanvaihto on toteutettu katsojien lämpökuormaan perustuvien ylösnousevien virtauksien eli pluumien sekä ylhäältä alas suunnattujen impulssipuhallusten varaan. Tuloilma jaetaan hallin alimpien istuinrivien muodostaman siirtokatsomon raoista syrjäyttävän ilmanvaihdon periaatteella ja poistoilma otetaan hallin yläosasta. Hallin lämpötilaoloja tasataan ylhäältä alas katsomoihin suunnattujen impulssipuhalluksien avulla. Lämmittävä impulssipuhallus voidaan suunnata myös kenttäalueelle jään ollessa peitettynä. Yläkatsomon tuloilma jaetaan hallin nurkassa kiertävästä kanavasta suihkusuutinhajoittimilla katsomon kallistuksen suuntaisesti (kuva 5). Ilmaa kuivataan adsorptiokuivaimella ja kuivattu ilma tuodaan halliin sekoitettuna tuloilmaan (14). Mitoitusulkoilmavirtana hallissa on 90-luvulla voimassa olleen Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D2 (1987) mukaisesti $4 \text{ dm}^3/\text{s} / \text{hlö}$ (12). Kumottu D2 antoi mahdollisuuden käyttää nykyisiin mitoitusarvoihin nähden verraten pientä ulkoilmavirtaa henkilölle suuren ilmatilavuuden rakennuksissa (kuvat 3 ja 4).



Kuva 3. Vuoden 1987 SRMK D2:n ohjeistus ulkoilmavirtojen määrittämiseen (12).

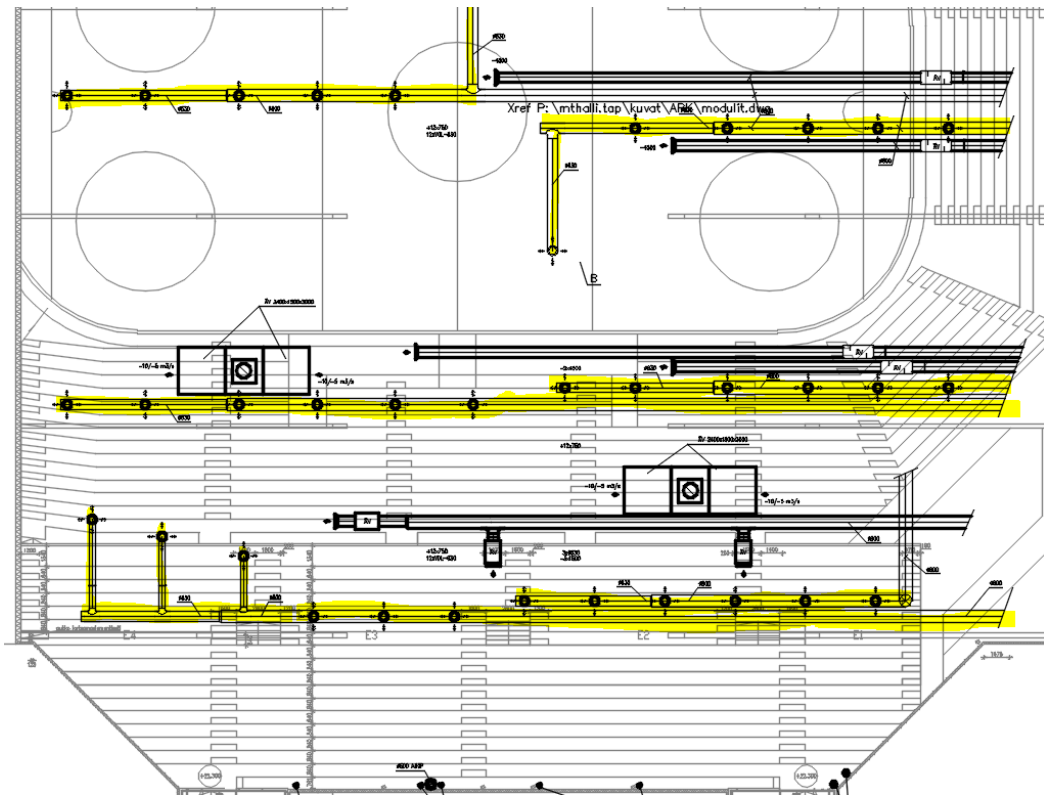


Kuva 4. Havainnollistava esimerkki suuren ilmatilavuuden hallissa hiilidioksidipitoisuuden nousemisesta tasetilaan ajan funktiona. Hallin tilavuutena käytetty Swegon ProAir Web -mitoitusohjelman maksimiarvoa 60 000 m³.



Kuva 5. Hartwall Arenan lämpötilojen hallintaan käytettävien impulssipuhallusten, yläkatsomon tuloilman sekä poistoilman kanavoiteja. Ote alkuperäisestä suunnitelmapiirustuksesta.

Esposseen vuonna 1999 valmistuneen Metro Areenan katsomoilmanvaihto on toteutettu sekoittavan ilmanjaon periaatteella. Ulkoilmavirta mitoituksena on $6 \text{ dm}^3/\text{s} / \text{hlö.}$ ja tuloilma puhalletaan halliin yläkautta pyörrevirtahajottimilla (kuva 6). Kenttäalueelle on oma ilmanvaihtokone, jota käytetään vain kentän ollessa peitettynä.



Kuva 6. Espon Metro Areenan tuloilmakanavistoa. te alkuperäisestä suunnitelmapiirustuksesta.

Vuoden 2014 talviolympialaisia varten rakennettu Iceberg Arena Sotšissa yhdistää katsomoilmanvaihdossa sekoittavan ja syrjäyttävän ilmanvaihdon menetelmiä. 12 000 katsojaa vetävän hallin yläkatsomon tuloilma puhalletaan pyörrevirtahajottimien lävitse. Alakatsomon tuloilma puolestaan tuodaan sen alaosaan sekä 12 metrin korkeudelle rakenteisiin upotettujen säleikköjen läpi. Sotšin arenassa tuloilmaa puhalletaan ylhäältä alas myös kentän kohdalta jään ollessa käytössä. Ilmasuihkun muodostama kuormitus jäähän on ehkäisty kokeellisesti hakemalla tuloilman suihkun lämpötila riittävän korkeaksi, jotta nostevoima ylittää suihkun impulssin ennen jäätasoa. Kentän kohdalle puhallettava

ilma poistetaan suihkuvirtashajottimien yläpuolelta. Katsomon poistoilman säleiköt sijaitsevat katonrajassa ympäri areenan. Hallin tuloilma kuivataan kokonaisuudessaan arvoon 4 g vettä kilogrammassa kuivaa ilmaa (15, s. 46–51). Kastepiste 4 g/kg ilmankosteudelle on alle 1 °C (6).

Pohjois-Amerikassa perinteinen toteutus monitoimiareenan ilmanvaihdolle on sekoittava ilmanvaihtotapa. 2015 Kanadan Quebeciin valmistuneen Centre Videotron areenan suunnittelussa oli otettu lähtökohdiksi energiatehokkuus sekä jään laadulle edullinen 34–45 %:n suhteellinen ilmankosteus. Ilmanvaihtoon käytettävä energia on pyritty minimoimaan lämmöntalteenottoratkaisuiden lisäksi tavoittelemalla riittävien olosuhteiden kattamiseksi pienintä mahdollista ulkoilmavirtaa. Tavoitteen täytyminen on edellyttänyt ilmanvaihdon tehokkuuden optimointia oleskeluvyöhykkeellä. Katsomoilmanvaihdon suunnittelussa on päädytty syrjäyttävän ilmanvaihdon periaatteella toimivaan istuinten alta puhallettavaan tuloilmaan. Suoraan oleskeluvyöhykkeelle tuotava tuloilma mahdollistaa sekoittavaa ilmanvaihtotapaa pienemmällä ilmamäärällä suunnitteluarvojen täyttymisen, koska tilan koko ilmatilavuus ei ole laadun näkökulmasta merkitsevä. (16, s. 35–40.)

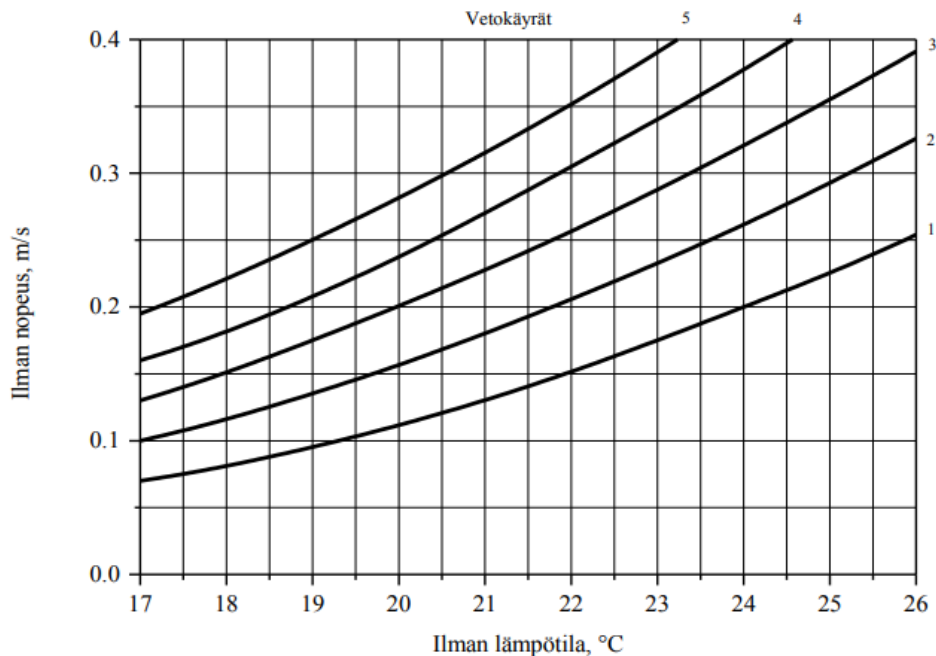
Quebecin areenassa tuloilmaa puhalletaan myös kentän ylle hallin katosta roikkuvan mediakuution sisälle rakennetun kanaviston kautta. Suunnittelussa kentän ylle on pyritty luomaan oman mikroilmasto, jossa muuta hallia viileämmällä tuloilmalla kontrolloidaan jään yläpuolella vallitsevia olosuhteita. Hallin yleisökapasiteetti on 18 310 henkeä jääkiekko-ottelussa ja 20 500 show-tapahtumissa. Hallin katsomo-osan ilmanvaihdolle raitisilmaa on mitoitettu 4 x 18878 l/s ja kentän yläpuolelle yhden 7079 l/s ilmanvaihtokoneen kapasiteetin verran. Suunnittelun lähtökohtana ollut hallin sisäilmaston vyöhykkeellisyysperiaatteen mukaisesti jääkiekko-ottelussa katsojakohtainen raitisilmamäärä on 4,1 l/s. Ilmanvaihtokoneet on varustettu kukin omilla adsorptiokuivaimilla, joilla saavutetaan –13°C:n kastepiste tuloilmalle. Jään lämpötilaa alhaisempi kastepiste estää ilmankosteuden kondensoitumista jään pintaan, mikä edesauttaa jään laadukkaana säilymistä. (16, s. 35–40.)

4.2 Monitoimiareenan ilmanvaihtotapojen keskinäinen vertailu

Monitoimiareenan vaihtuvat käyttöolosuhteet vaikuttavat vaihtelevasti eri ilmanvaihtotapoihin. Hallin sisäisten ja ulkoisten kuormien muodostama lämpötase voi olla suunnitteluarvoihin nähden negatiivinen tai positiivinen. Jotta suunnitellut olosuhteet toteutuvat,

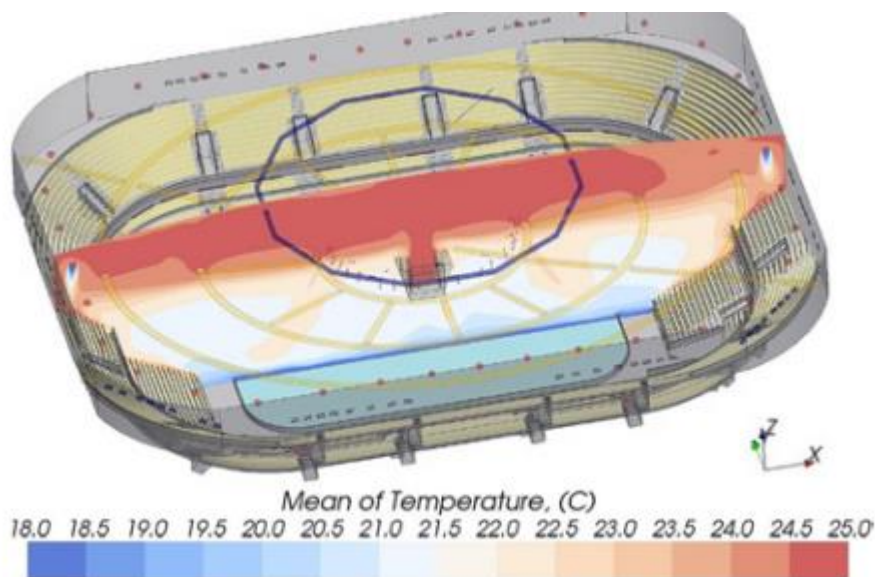
tulee hallia joko jäähdyttää tai lämmittää. Monitoimiareenassa on yleisesti käytössä ilmalämmitys ja -jäähdytys.

Ilmanjakotavat voidaan jaotella kahteen ryhmään: oleskeluvyöhykkeen yläpuolelta jaettavaan sekä oleskeluvyöhykkeen tasalta tai sen alapuolelta tapahtuvaan tuloilmanjakkoon. Oleskeluvyöhykkeen tasalta tai sen alta syrjäyttävän ilmanvaihdon periaatteella jaettavaan tuloilmaan ei monitoimiareenan muuttuvilla sisäolosuhteilla ole toiminnallisesti ratkaisevaa merkitystä. Tuloilma tuodaan oleskeltavalle vyöhykkeelle suoraan eikä yli- tai alilämpöisyys vaikuta vyöhykkeen saavutettavuuteen. Suunnittelussa on kuitenkin huomioitava etenkin alilämpöistä ilmaa puhallettaessa vetoisuuden tunteen ehkäiseminen. Ilman liikenopeuden vaikutus oleskeluvyöhykkeen viihtyisyyteen on riippuvainen ympäröivän ilman lämpötilasta (23). Istuinkatsomon lisäksi on permannon käyttö yleisötilana huomioitava raitisilmakapasiteetin mitoituksessa. Kentän sivuun jaettu tuloilma on permantokatsojan näkökulmasta sitä epäedullisempi, mitä suurempi etäisyys kentän laidalle on. Ilmanjakotavan eduksi voidaan katsoa tuloilmalaitteiden piiloutuminen rakenteisiin ja helppo säädettävyys kuormitustilanteen mukaan. (Kuva 7.)



Kuva 7. Ilman liikenopeuden vaikutus epäviihtyvyyteen eri lämpötiloissa (23).

Yläjakoinen tuloilma sekoittavan ilmanvaihdon periaatteella on syrjäyttävää ilmanjakoa alttiimpi areenan vaihteleville olosuhteille. Tuloilman nopeuteen vaikuttaa sen lämpötila suhteessa ympäröivän ilman lämpötilaan, ja täten yhdellä kiinteällä tilanteella/asennuksella ei ole mahdollista saavuttaa vakio-olosuhteita. Ilmanjaon päätelaitevalinnassa on hyvä huomioida säätömahdollisuus heittopituudelle, jolloin tarvittaessa esimerkiksi jäähdytys- ja lämmityskaudelle on mahdollista käyttää erilaisia asetuksia. Monitoimiareenan suuresta yleisökapasiteetista ja muista mahdollisista väliaikaisista lämpökuormista johtuen lämmityskaudellakin esiintyy jäähdytystarvetta ja täten kiinteällä asennuksella ei ole saavutettavissa optimaalista ratkaisua erilaisiin kuormitustilanteisiin. Suoraan vertikaalisesti ylhäältä alas jaettavan ilman nopeus on myös riippuvainen paikasta kaltevassa katsomossa. Ylhäällä lähellä tuloilmalaitetta ilman nopeus on korkeampi kuin alemmilla katsomoriveillä. Korkeassa monitoimiareenassa syntyvä lämpötilakerrostuma vaikuttaa osaltaan tuloilmasuihkun käyttäytymiseen. Kuvassa 8 esitetyn kaltaisen lämpötilakerrostuman vuoksi tuloilman suihku voi olla hallin yläosassa alilämpöinen sekä alhaalla yli-
lämpöinen ja täten käyttäytymisen kannalta hankalasti tarkasti määritettävissä.



Kuva 8. Sotšin areenan lämpötilakerrostuma simulaation perusteella (15).

Ilmanjakolaitteita on saatavilla myös moottorisäätöisinä, jolloin esimerkiksi pyörrevirtahajottimien lapakulmaa on mahdollista säätää tilanteen mukaisesti ja täten vaikuttaa ilman nopeuteen oleskeluvyöhykkeellä. Monitoimiareenan suuresta tuloilmatarpeesta johtuen tarvittavien päätelaitteiden määrä on suuri, ja moottoritoimisten toimilaitteiden investointikustannus nousee huomattavaksi. Useiden liikkuvien osien tuominen nostaa lisäksi järjestelmän vikaantumisherkkyyttä ja vaatii enemmän huoltoa. Mekaanisilla moottoreilla on myös tietty käyttöikänsä, jonka jälkeen ne on uusittava. Yläjakoisessa tuloilmanjaossa päätelaitteiden sijainti voi olla huollon kannalta vaikeasti tavoitettavissa. Hallin kattoon asennettavat kanavat ovat myös esteettisesti näkyvillä sekä vaikuttavat osaltaan tilan akustiseen käyttäytymiseen. Hallin kattoon asennettavien kanavien ripustuksessa ja kannatuksessa on myös huomioitava asennuksien turvallisuusnäkökulmat.

Yläjakoisessa ilmanjakotavassa isotermistä tai lämmitettyä ilmaa korkeaan tilaan puhallettaessa tarvitaan päätelaitteella suuri lähtönopeus, jotta tuloilmasuihku saavuttaa oleskeluvyöhykkeen. Tämän vuoksi tuloilman määrää ei ole mahdollista radikaalisti vähentää lämmityskaudella tarvittavan raitisilmakapasiteetin mukaan, vaan ilmanvaihtokoneen puhaltimien on käytävä teholla, jolla saavutetaan tuloilmalle riittävä lähtönopeus päätelaitteella. Raitisilmamäärää on kuitenkin mahdollista vähentää ilmanvaihtokoneen kiertoilmapellin avulla, jolloin ulkoilmavirran lämmittämiseen tarvittava energia kyetään minimoimaan. Yläjakoisesti ilmalla lämmitettäessä on myös huomioitava, että tuloilman ja sisäilman lämpötilaero on mitoitettava niin ettei, lämpimän ilman nostevoima rajoita lämmitettävän vyöhykkeen saavuttamista.

Katsomon tasalta tai sen alta tuotava tuloilmaa voidaan ohjata raitisilma- sekä lämmitystarpeen mukaisesti. Lämmitystehoa voi kasvattaa nostamalla tuloilman lämpötilaa, jolloin yläjakoiseen järjestelmään verrattuna puhaltimien tarvitsema sähköenergia on pienempi. Ympäristöministeriön asetus 1009/2017 rakennuksen ilmanvaihdosta määrää raitisilmamäärän minimiksi $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ henkilöä kohden (24). Luvussa 4.1 käsitellyn Quebecin tapauksen mukaisesti voidaan kuitenkin todeta, että ilmanjakotavalla on merkitystä, millä raitisilmamäärällä suunniteltu olosuhde täyttyy oleskeluvyöhykkeellä. Alhaalta jaettavan ilmanjaon tapauksessa voi olla aiheellista harkita erikoisluvan hakemista rakennusvalvonnasta pienemmälle raitisilmamitoitukselle, mikäli suunnitellut olosuhteet voidaan todentaa esimerkiksi CFD-simuloinnin avulla. Mikäli pienemmällä ilmamäärällä saavutetaan myös riittävä jäähdytys- ja lämmitysteho, on ilmanvaihtokoneiden sekä kanaviston

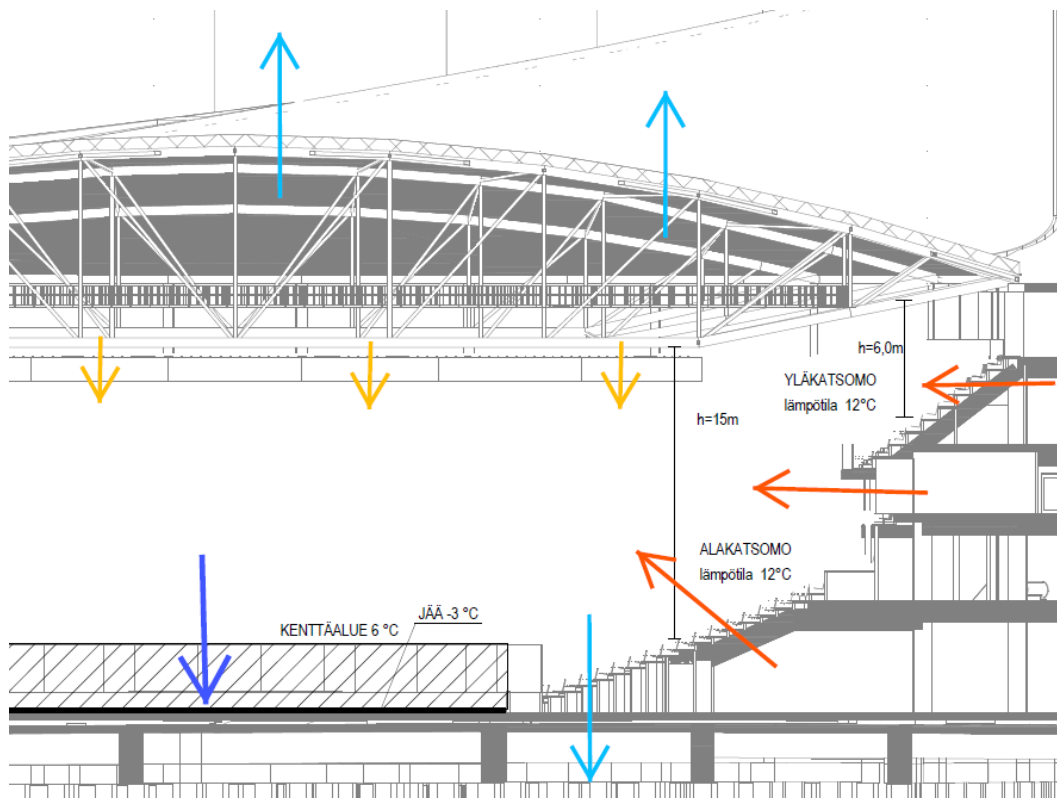
mitoituksessa mahdollisesti investointikustannuksissa säästettävissä pienempien kokojen myötä. Pienemmät ilmanvaihtokoneet ja kanavat ovat myös tilantarpeen näkökulmasta helpommin sijoitettavissa halliin.

Monitoimiareenassa on myös mahdollista käyttää vyöhykeperiaatteen mukaisesti eri ilmanjakotapoja. Yläkatsomo on alakatsomoa helpommin tavoitettavissa yläjakoisella tuloilmalla lyhyemmän etäisyytensä vuoksi. Areenassa syntyvän lämpötilakerrostuman vuoksi yläkatsomo on alakatsomoa helpommin lämmitettävissä ilmalla, mutta puolestaan jäähdytystilanteessa alttiimpi liialliselle lämmölle etenkin kesäaikaan. Alakatsomossa taas on syrjäyttävän ilmanvaihdon tuloelimille luontainen sijoituspaikka alimpien rivien siirtokatsomoiden alla, kun puolestaan yläkatsomossa syrjäyttävä ilmanvaihtotapa vaatisi reitit tuloilmalle katsomolankkuihin. Permannelle tasaiset olosuhteet voidaan luoda kentän päälle kattavasti sijoitelluin tuloilmalaittein. Mikäli permannelle jaetaan omalla järjestelmällä tuloilmaa, mahdollistaa se myös haluttaessa jään yläpuolisen alueen ilman kontrolloinnin katsomotilasta poikkeavin arvoin. Ilmanvaihtokoneiden vaikutusalueet on syytä suunnitella niin, että koneita voidaan ohjata tarpeenmukaisesti. Mikäli täyttä yleisökapasiteettia ei tarvita, voidaan esimerkiksi yläkatsomo sulkea/peittää yleisöltä. Mikäli ilmanvaihtokoneiden vaikutusalueet on järkevästi jaoteltu, voidaan tällöin osaa koneistoa ohjata asetuksessa sallitun minimi raitisilmamäärän mukaisesti.

5 Monitoimiareenan lämpötilatase

5.1 Lämmitystilanne

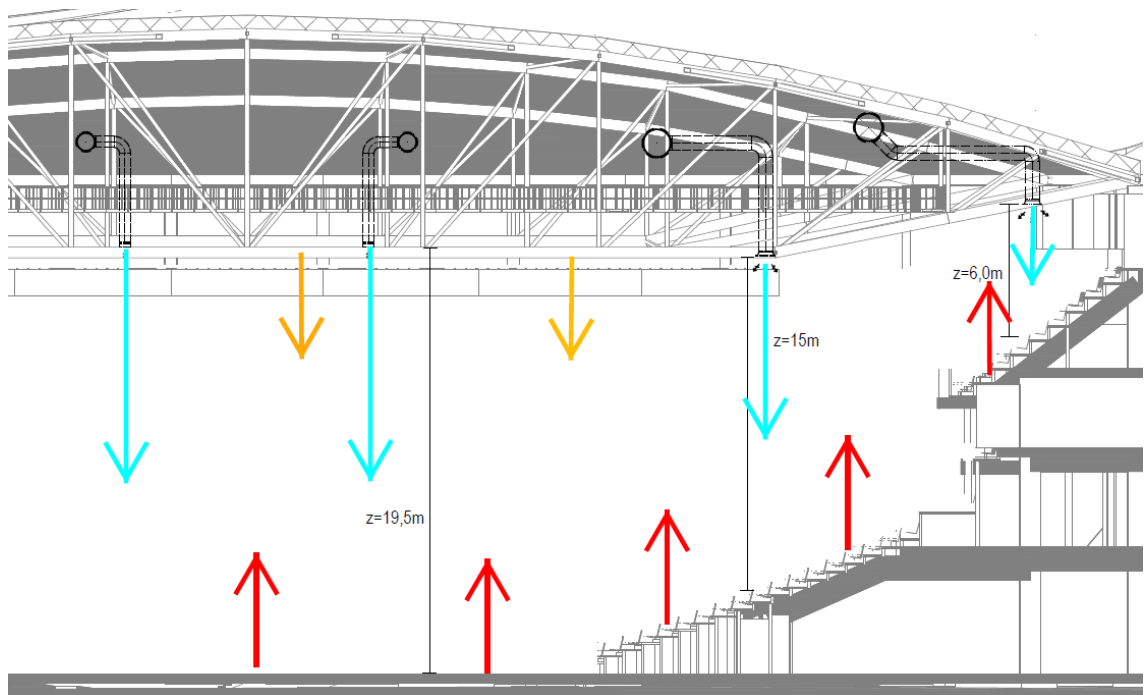
Monitoimiareenan suurin lämmitystarve muodostuu talvella hallin käyttöaikataulujen ulkopuolella jään ollessa avoimena. Tällöin areenan rakenteiden läpi lämpöhäviöt ovat suurimmillaan. Areenaa jäähdyttää jää sekä ala- ja yläpohjan lämpövuodot. Mikäli katsomo mitoitetaan lämpötilaltaan ympäröiviä tiloja matalammaksi, syntyy lämpövuotoa muista tiloista kohti areenaa (kuva 9). Samassa tilanteessa mahdolliset avoimet aukot muihin tiloihin synnyttävät oviaukkovirtauksien kautta tilaa lämmittäviä ilmapvirtauksia areenaan. Mikäli katsomon ulkopuolisten tilojen poistoilmaa johdetaan areenan kautta, tulee myös nämä ilmapirratt huomioida lämmittävinä tekijöinä. Lisäksi areenassa vaikuttaa sähköisten laitteiden, etenkin valaistuksen, muodostama lämpökuorma. Monitoimiareenassa jäähallin tavoin esiintyy lämmitystarvetta läpi vuoden, kun jää on käytössä.



Kuva 9. Tyhjän monitoimiareenan katsomoon vaikuttavat lämpövirrat talvella. Kuvassa keltaisilla nuolilla kuvataan valaistuksesta syntyvää kuormaa, sinisillä jään vaikutusta sekä lämpöhäviötä vaipan yli ja oranssilla ympäröivien tilojen lämmittävää vaikutusta.

5.2 Jäähdytystilanne

Suurin jäähdytyskapasiteetin tarve katsomotilassa on kesäajan konserttitilanteessa. Tällöin lämpökuormaa tuottaa lämpövuoto katon ja sekä alapohjan läpi, mikäli jää on sulattuna ja rakennuksen alla on ulkoilmaa. Jäähdytystarvetta lisäävät erityisesti katsojat sekä konsertissa erikseen käytettävät pääasiassa ääni- ja valokalustosta koostuvat sähkölaitteet. (Kuva 10.)



Kuva 10. Monitoimiareenan lämpövirrat kesän konserttitilanteessa, kun katsomoa ympäröivät tilat ja ulkoilma ovat sisälämpötilojen kanssa yhtäläiset. Punaisilla nuolilla yleisöstä syntyvä lämpökuorma, keltaisilla valaistuksen osuus (lava- tai kattovalot) ja sinisellä tuloilman viilentävä vaikutus.

5.3 Kuormien muodostuminen

Monitoimiareenassa katsomon lämmityskapasiteetin tarve muodostuu suurimmaksi osaksi jään jäähdyttävästä vaikutuksesta. Jään ylläpitoon vaadittavan koneikon teho on yleisesti kapasiteetiltaan 300–350 kW (18, s. 5). Hartwall Arena on rakennusvaiheessa varustettu yhteensä 500 kW:n tehon ratakylmälle mahdollistavilla kompressoreilla (14, s. 16). Jäähän sitoutuu lämpöä konvektion, ilmankosteuden kondensoitumisen sekä säteilylämmönsiirron kautta (18, s. 13). Tyhjässä hallissa vaadittava jäädytystehon voidaan päätellä olevan vain osa täydestä kapasiteetista. Vaipan yli tapahtuvat lämpöhäviöt ovat verrattain pienessä osassa areenan katsomon lämmitystarvetta. Esimerkiksi yläpohjan läpi tapahtuva lämpöhäviö on kylmimmillään keleillä uudisrakennuksessa vain reilut 10 kW.

Yleisömäärä on merkittävin lämpökuorman lähde areenassa. Rauhallisesti istuva ihminen tuottaa 105 W lämpöä konvektion, säteilyn sekä hengitysilmaan sitoutuneen kosteuden kautta (17, s. 24). Lisäksi lämpökuormaa tulee pääasiassa valaistuksesta ja muista sähkölaitteista. Hartwall Arenan alkuperäinen valaistus on toteutettu noin 90:llä 2 kW:n monimetalliheittimellä (14, s. 7). Nykyään käytettävillä led-valaisimilla saavutetaan kuitenkin vastaava valaistusvoimakkuus noin 50 % pienemmällä sähköteholla (19).

5.4 Areenan katsomon lämpötilatase

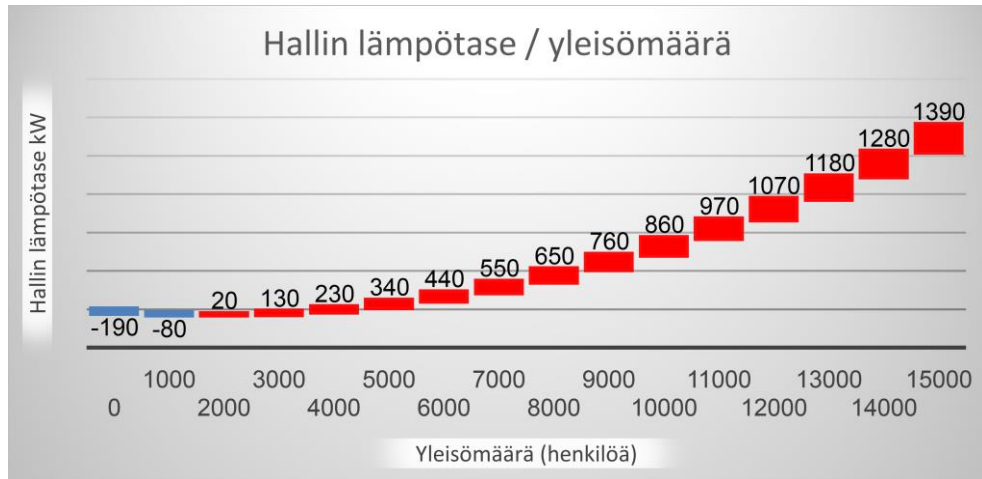
5.4.1 Lämpötilat talvella jääurheilukäytössä

Arvio pohjakuormasta (valaistus yms.)	90	kW
Jään teho	-250	kW
Katon U-arvo	0,09	W/(m ² K)
Katon pinta-ala	8000	m ²
Ulkolämpötila	-29	°C
Katsomon lämpötila	12	°C
Lämpöhäviö yläpohjasta	-29,5	kW
Lämpökuorma/katsoja	0,105	kW
Ilmamäärä/katsoja	6	dm ³ /s

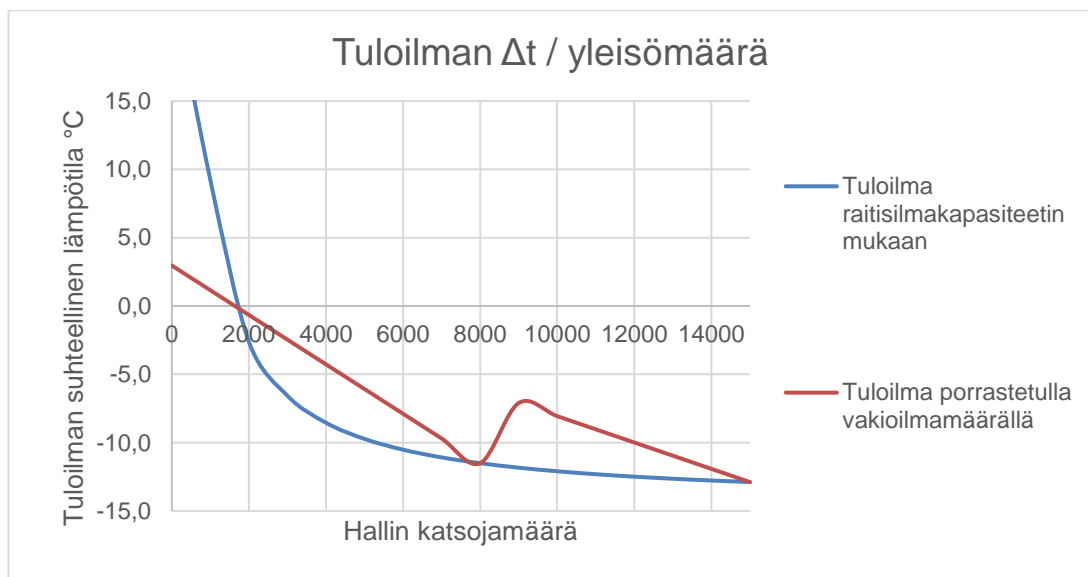
Kuva 11. Valitut lähtöarvot talviajan lämpötilojen määrittämiseen.

Hallin lämpötilakäyttäytymiseen on valittu sisä- ja ulkolämpötiloiksi Tampereen kansi- ja areena hankkeessa käytössä olevat mitoitustiedot. Kuvassa 11 on esitetty lähtötiedot laskentaa varten. Mallia on yksinkertaistettu esimerkiksi jättämällä huomioitta ilmavuodot, kylmäsilat sekä alapohjan että muiden ympäröivien tilojen lämpövuodot. Ratakylmän sekä valaistuksen tehot ovat arvioita tunnettujen kapasiteettien perusteella. Mallissa huomioitta on jätetty valaistuksen sekä ratakylmän muuttuva teho. Esimerkiksi katsojilta suljetussa areenassa ei ole tarve täyteen valaistuskapasiteettiin, kun puolestaan täydessä hallissa ratakylmäkoneisto joutuu käymään suuremmalla jäähdytysteholla.

Laskua on myös yksinkertaistettu jättämällä hallin ilmatilavuuden muodostama puskuri huomiotta. Ilman tiheytenä on kaikissa lämpötiloissa käytetty likiarvoa $1,2 \text{ kg/m}^3$ ja ominaiskapasiteettina 1 kJ/kg K .



Kuva 12. Hallin lämpökuorma yleisömäärän mukaan ilman ilmanvaihdon vaikutusta.



Kuva 13. Lämpötaseen tasaava tuloilman lämpötilaero suhteessa suunnitteluarvoon eri katsojamäärillä. Kuvaajan sinisen käyrän ilmavirtana on käytetty henkilöperustaista mitoitusta $6 \text{ dm}^3/\text{s}$. Punaisessa käyrässä on vakioilmavirtana $8\ 000$ katsojaan asti $48 \text{ m}^3/\text{s}$ ja sen jälkeen $90 \text{ m}^3/\text{s}$ $15\ 000$:n katsojan mukaan. Punainen käyrä esittää katsomon jakautumista ala- ja yläkatsomoihin ja ilmanvaihdon ohjaamista konekohtaisesti käytettävän katsomokapasiteetin mukaan.

Kuvista 12 ja 13 yllä on havaittavissa yleisömäärän olevan jään ohella merkittävin lämpötilataseeseen vaikuttava osa. Kylmimmillä talvi-ilmoillakin jäädytyksen tarve syntyy noin 2 000 katsojan määrästä. Kuvan 13 kuvaajasta sininen sopii alajakaiselle ilmanjatkavalle ja punainen ylhäältä jaettavalle ilmalle.

5.4.2 Lämpötilat kesällä konserttikäytössä

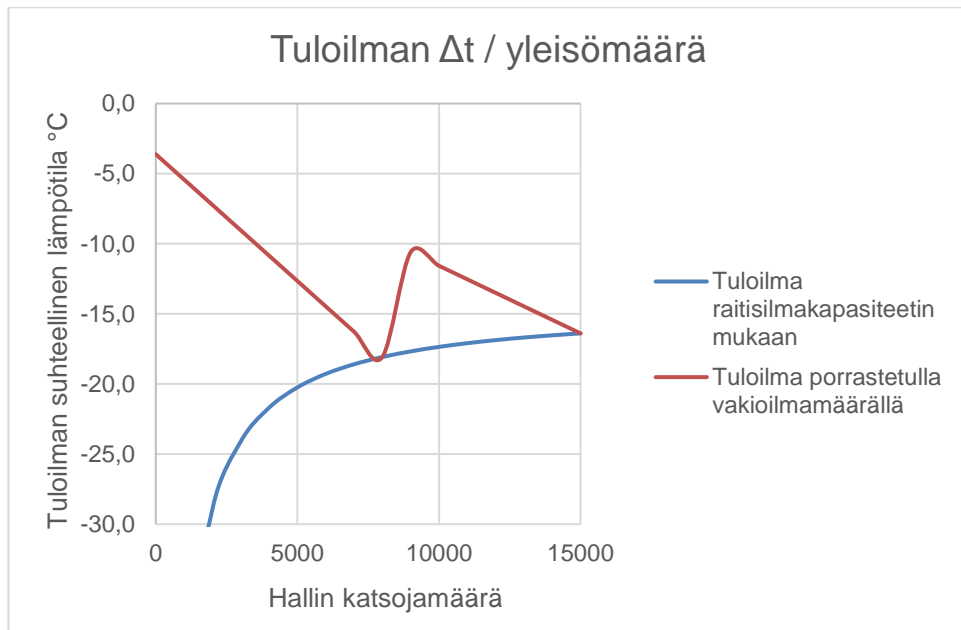
Arvio pohjakuormasta (valaistus yms.)	10	kW
Arvio kuormasta (show-valaistus, ääni yms.)	200	kW
Katon U-arvo	0,09	W/(m ² K)
Katon pinta-ala	8000	m ²
Ulkolämpötila	25	°C
Katsomon lämpötila	25	°C
Lämpöhäviö yläpohjasta	0	kW
Lämpökuorma / katsoja	0,105	kW
Ilmamäärä / katsoja	6	dm ³ /s

Kuva 14. Valitut lähtöarvot kesäajan lämpötilojen määrittämiseen konserttitilanteessa.

Jääurheilutilanteesta poiketen kesäajan esiintymistilanteessa olevia lämpövuotoja ei ole huomioitu lainkaan. Myös mahdollinen jään peittolevyjen läpi tapahtuva lämpöhäviö on sivuutettu. Valittu show-tekniikan lämpökuorma on arvio keskimääräisestä tehosta konserttitilanteessa ja pohjakuorma pimeän hallin valaistukseen liittymättömistä sähkölaitteista. (Kuva 14.)



Kuva 15. Hallin lämpökuorma yleisömäärän mukaan ilman ilmanvaihdon vaikutusta konserttitilanteessa.



Kuva 16. Lämpötaseen tasaava tuloilman lämpötilaero suhteessa suunnitteluarvoon eri katsojamäärillä. Kuvaajan sinisen käyrän ilmavirtana on käytetty henkilöperustaista mitoitusta $6 \text{ dm}^3/\text{s}$. Punaisessa käyrässä on vakioilmavirtana 8 000 katsojaan asti $48 \text{ m}^3/\text{s}$ ja sen jälkeen 15 000 katsojan mukaan $90 \text{ m}^3/\text{s}$.

Konserttitilanteen lämpökuormat muodostuvat jääurheilua suuremmaksi (kuva 15). Jääurheilutilanteesta poiketen konserttitilanteen tuloilmaa ei voi määrittää pelkästään raitisilman tarpeen mukaan (kuva 16). Tavallisilla ilmanvaihdon jäähdytysratkaisuilla, kuten kaukokylmällä tai vedenjäähdytyskoneella, ei kyetä tuottamaan suunniteltuun katso-molämpötilaan nähden, kuin noin 10–15 °C:n alilämpöisyys. Kylmän sään aikana tätä suurempikin lämpötilaero on teoreettisesti mahdollinen, mutta oleskeluviihtyvyyden vuoksi ja etenkin vetoisuuden vuoksi ei kannattava.

Lämpökuormien tasaamiseen vaadittavat ilmavirrat lasketaan tehon yhtälöstä:

$$\rho c_p q_v \Delta T = Q$$

ρ on ilman tiheys

c_p on ilman ominaislämpökapasiteetti

ΔT on ilman lämpötilaero

q_v on ilman tilavuusvirta

Q on lämpökuorma

Yhtälö: Teho

6 Kosteustasapaino

Monitoimiareenassa kosteus ilmassa on lähtöisin pääasiassa tulo- ja kiertoilmasta, sekä ihmisistä. Aikuinen ihminen tuottaa huoneilmaan levossa noin 50 grammaa tunnissa kosteutta hengitysilman ja hikoilun kautta. Huomattavaa on, että ympäröivään ilmaan ihmisen uloshengityksen kosteuskuormitus on riippuvainen sisään hengitetyn ilman suhteellisesta kosteudesta ja ulos hengitetyn ilman lämpötilasta, sillä ilman suhteellisen kosteuspitoisuuden maksimi on 100 %. (20)

Raitisilman teoreettinen maksimi kosteuskuorma on se absoluuttinen vesimäärä, jonka tuloilma sisältää suhteellisen kosteuden ollessa 100 %. Kaukokylmällä jäähdytetyssä il-

manvaihdoissa tuloilma on alimmillaan n. 16 °C ja se sisältää maksimissaan 11,4 g kosteutta kilogrammaa kuivaa ilmaa kohden (21, s. 346). Täten raitisilmamäärämitoituksella 6 dm³/s katsojaa kohden syntyvä kosteuskuorma tunnissa on

$$1,2 \text{ kg/m}^3 * 0,006 \text{ m}^3/\text{s} * 11,4 \text{ g} * 3600 \text{ s} + 50 \text{ g} = 413 \text{ g}$$

Sekuntia kohden ilmankosteus ihmisistä lisääntyy 50 g / 3600 s = 0,014 g/s, kun taas raitisilmasta edellä käsitellyillä luvuilla on 1,2 kg/m³ * 0,006 m³/s * 11,4g = 0,082 g/s. Raitisilmamäärään sidottuna ihminen lisää absoluuttista kosteutta kuution kuivaa ilmaa vastaavaan summan 0,014 g /s / (1,2 kg/m³ * 0,006 m³/s) = 1,95 g.

Erillisen kuivausilman määrä voidaan laskea seuraavasta yhtälöparista:

$$q_{mi\ 1} = \frac{qv_{kok}}{x_s - x_1}$$

$$q_{mi\ 2} = \frac{qv_{kok}}{x_s - x_2}$$

jolloin

$$q_{mi\ 2} = \frac{qv_{mi\ 1} * (x_s - x_1)}{x_s - x_2}$$

qv_{kok} on tuloilmavirrat yhteensä

$q_{mi\ 1}$ on raitisilmavirta

$q_{mi\ 2}$ on kuivaava ilmavirta

x_s on suunniteltu sisäilman absoluuttinen kosteus

x_1 on raitisilman + kosteuskuorman absoluuttinen kosteus

x_2 on kuivausilman absoluuttinen kosteus

Yhtälö: kosteustasapaino (21, s. 198)

Koska kosteus ilmassa tasaantuu kohti pienintä vesihöyryn osapainetta, täytyy hallin kosteustasapaino suunnitella pienimmän sallitun vesihöyryn osapaineen mukaan. Alla on yhtälö ilman suhteellisen kosteuden määrittämiseen vesihöyryn osa- ja kyllästymispaineen avulla.

$$\varphi = \frac{P_h}{P_{hs}}$$

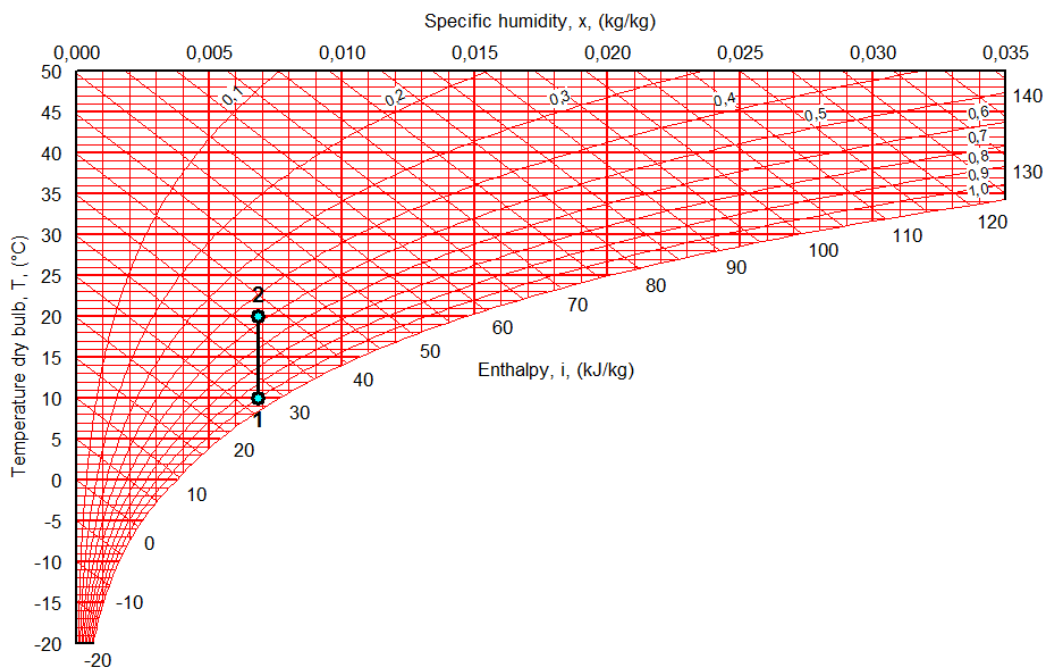
φ on suhteellinen kosteus

P_h on vesihöyryn osapaine

P_{hs} on vesihöyryn kyllästymispaine

Yhtälö: Ilman suhteellinen kosteus (21, s. 198)

Täten esimerkiksi 90 %:n suhteellinen ilmankosteus 10 °C:n lämpöisessä ilmassa muodostaa vesihöyryn osapaineen $0,9 \cdot 1,2280 \text{ kPa} = 1,1052 \text{ kPa}$. Vastaava vesihöyryn osapaine 20 °C:n lämpötilassa vastaa ilman suhteellista kosteutta $1,1052 \text{ kPa} / 2,3389 \text{ kPa} = 47,25 \%$. (21, s. 345.)



Kuva 17. 10 °C 90 % sekä 20 °C 47,25 % ilma Mollier-diagrammiin sijoitettuna.

Kuvan 17 Mollier-diagrammi havainnollistaa absoluuttisen kosteuden ilmassa pysyvän vakiona vesihöyryn osapaineen ollessa sama eri lämpötiloissa.

Ihmisten sekä tuloilman lisäksi kosteustasapainoon vaikuttaa luvussa 2.3 esitetyt tekijät, jotka on jätetty tässä luvussa asian käsittelyn ulkopuolelle.

7 Ilmavirtojen käyttäytyminen ja lämpötilakerrostuma

Monitoimiareenan ilmavirtojen käyttäytyminen ja halliin muodostuvat lämpötilat ovat monimutkaisten toisiinsa vaikuttavien tekijöiden lopputulos. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm: säteily- ja konvektiolämmönsiirto, lämpöhäviöt muista tiloista, ilmanvaihdon päätelaitteiden sijainti ja ilmavirtojen määrä sekä lämpö- ja kosteuskuorma. Koska tilanteet vielä vaihtelevat merkittävästi eri kuormitustilanteiden mukaan, ovat dynaamiset simulointiohjelmat ainoa keinoa etukäteen hahmottaa sisäolosuhteiden käyttäytymistä. CFD-simuloinnilla on mahdollista mallintaa hallin ilmavirtojen käyttäytymistä ja kokeilla erilaisia ilmanvaihtoratkaisuja. (10)

Piia Sormunen, Tom L. Sundman ja Sami Lestinen ovat artikkelissaan The Design Challenges of Multipurpose Arenas päätyneet CFD-analyysin pohjalta seuraaviin johtopäätöksiin: Katsomolle sopivin tuloilmaratkaisu on kahden eri ilmanjakotavan yhdistelmä. Alakatsomolle alhaalta jaettava syrjäyttävä ilmanvaihto yhdessä yläkatsomon sekoittavan ilmanvaihdon kanssa tuottaa parhaan lopputuloksen. Käyttöaikojen ulkopuoliseen ylläpitoon puolestaan parhaiten toimii jään ulkopuolelle ympyrämuotoon sijoitettujen suihkuvirtaussuuttimien vertikaalinen tuloilmasuihku. (10)

Yläjakoisessa ilmanjakotavassa alakatsomon ilmavirtojen käyttäytymistä on vaikeaa arvioida, sillä katsojien muodostamat lämpimien ilmavirtojen ylös kohoavat pluumit kohtaavat vertikaalisesti alas puhalletun tuloilman. Mikäli tuloilman lisäksi katsomossa on erillinen kuivausilmajärjestelmä, vaikuttaa se osaltaan ilmavirtojen käyttäytymiseen. Näiden ilmavirtojen ohjautumiseen ja sekoituspisteiden muodostumisen ainoa keino ennalta määrittämiseen on CFD-simulointi.

8 Erikoistilanteet

Monitoimiareenassa voidaan myös järjestää tapahtumia, joiden kuormitus poikkeaa tavanomaisista sisäilman kuormituslähteistä. Polttomoottorillisia ajoneuvoja sisältäviin tapahtumiin ilmanvaihdon kapasiteettia on mahdollista lisätä erillispuhaltimin. Suuret areenat vaativat koneellisen savunpoistojärjestelmän, joten katsomotilaan vaikuttavia poistopuhaltimia on valmiiksi käytettävissä. Mikäli nämä puhaltimet yhdistetään myös ilmanvaihdon automaatiojärjestelmään, voi niiden avulla lisätä ilmanvaihtokapasiteettia erikoistilanteissa. Tällöin sisäilman laatua on syytä erikseen mitata ja käynnistää puhaltimia tarpeen mukaan. Puhaltimien tarvitsema korvausilma huomioidaan lastauskäytävien kautta ulos auki pidettävien oviaukkojen kautta.

9 Ala- ja yläjakoisten tuloilmajärjestelmien hintaero

Liitteessä 2 on toteutettu alakatsomon ilmanvaihdolle hintavertailu ylä- ja alajakaisen tuloilma järjestelmien kanavaosien välillä. Laskelman pohjana on käytetty Tampereen Areenan yhden ilmanvaihtokoneen osuutta, joka vastaa ¼:aa alakatsomon ilmanvaihtotarpeesta. Yläjakoinen ilmanvaihtotapa perustuu pyörrevirtahajottimille, ja alajakoisessa syrjäyttävät tuloilmalaitteet on sijoitettu alimpien katsomorivien alle. Tuloilmakone laskennassa sijaitsee areenan katossa ja alajakaisen ilmanjaon kanavat siirtyvät ylhäältä alas areenan ulkoseinällä. Kanavaosat on piirretty 3D-mallina MagiCad-ohjelmalla, josta on kummallekin tilanteelle tulostettu osaluettelo. Osaluettelon pohjalta on rakennettu hintavertailu, jossa on käytetty Lindabin vuoden 2018 ilmastointituotteiden hinnastoa (22). Syrjäyttävien tuloilmalaitteiden hintaperusteena on käytetty suurimman päätelaitteen suurinta käytettäväksi arvioitua ilmamäärää suhteessa listahintaan. Näin on arvioitu hinta tuloilma litraa kohden.

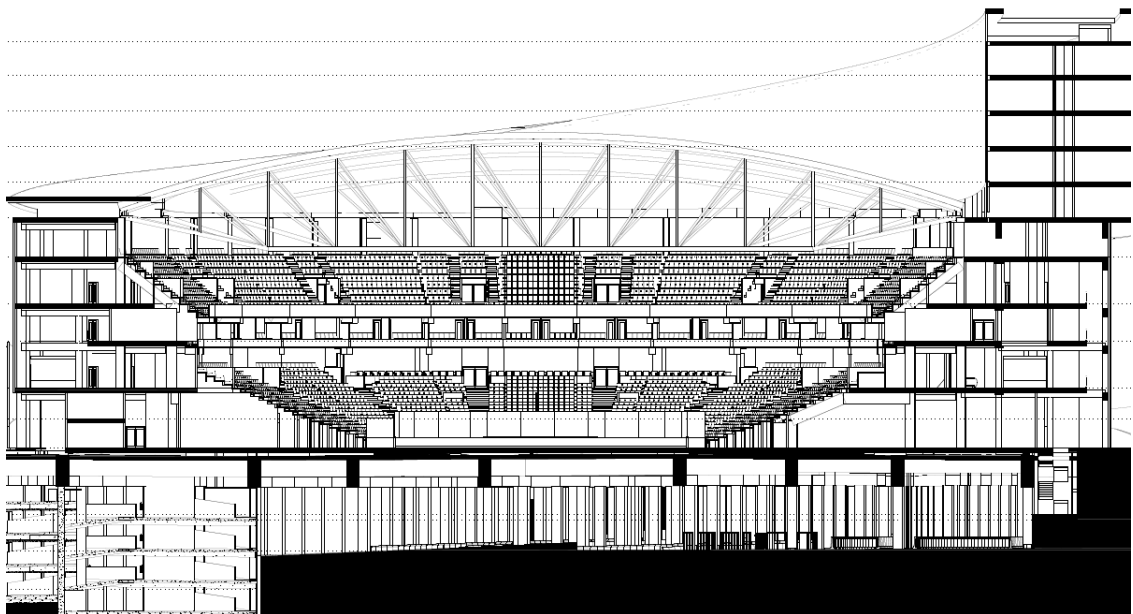
Laskelma osoittaa, että kahden erilaisen ilmanjakotavan kanavaosat ovat investointikustannuksiltaan lähellä toisiaan. Yhden ilmanvaihtokoneen tuloilmakanaviston osuuksien hintasuhde on laskelmassa yläjakaisen ilmanjakotavan hyväksi n. 72 t€ / 83 t€. Alajakaisen tuloilman suurin kustannus muodostuu suurien kanavakokojen pitkistä vedoista. On merkillepantavaa, että laskelmassa ilmanvaihtokoneen sijainti on areenan katossa, joka on kanavapituuksien suhteen epäedullinen sijoituspaikka alajakaiselle tuloilmalle. Käytännössä hintaero katoaa, mikäli ilmanvaihtokoneen sijainti on areenaa kiertävässä talotekniikalle varatussa kerroksessa.

Ala- ja yläjakoisen tuloilmatavan suurin kustannusero muodostuu käytöstä syntyvistä kustannuksista, mikäli hallin lämmitys tapahtuu tuloilmalla. Luvun 5.4.1 lämpötilataseeseen pohjautuen tyhjä halli vaatii n. 3 °C:n lämpötilaerolla tuloilmavirran 48 m³/s. Jos hallin puhaltimet käyvät ominaissähköteholla 1,8 kW / m³/s kuluu tällöin jokaista ylläpito-vuorokautta kohden sähköä 24 h * 1,8 kW / m³/s * 48 m³/s = 2073 kWh. Alajakoisessa ilmanajakotavassa voidaan käyttää merkittävästi suurempaa ilman yllämpöisyyttä, jolloin pienempi tuloilmavirta kattaa lämpöhäviöt ja puhaltimien käyttämästä sähköteho on merkittävästi pienempi.

10 Tampereen areenan ilmanvaihto

10.1 Projektin lähtötiedot

Tampereelle rakennettava uusi monitoimiareena sisältää kaksi rakenteellista ominaisuutta, jotka erottavat sen muista vastaavista kohteista Suomessa. Areena toteutetaan rautatien päälle rakennettavalle kansitasolle, ja sen itäisivulle tulee areenan katsomon ylimmän kerroksen tasalta nouseva hotelli (kuva 18). Hotellin alimman kerroksen arenan puoleiset huoneet avautuvat katsomoon, ja niistä on mahdollisuus seurata areenassa järjestettäviä tapahtumia.



Kuva 18. Tampereen areenan leikkauskuva.

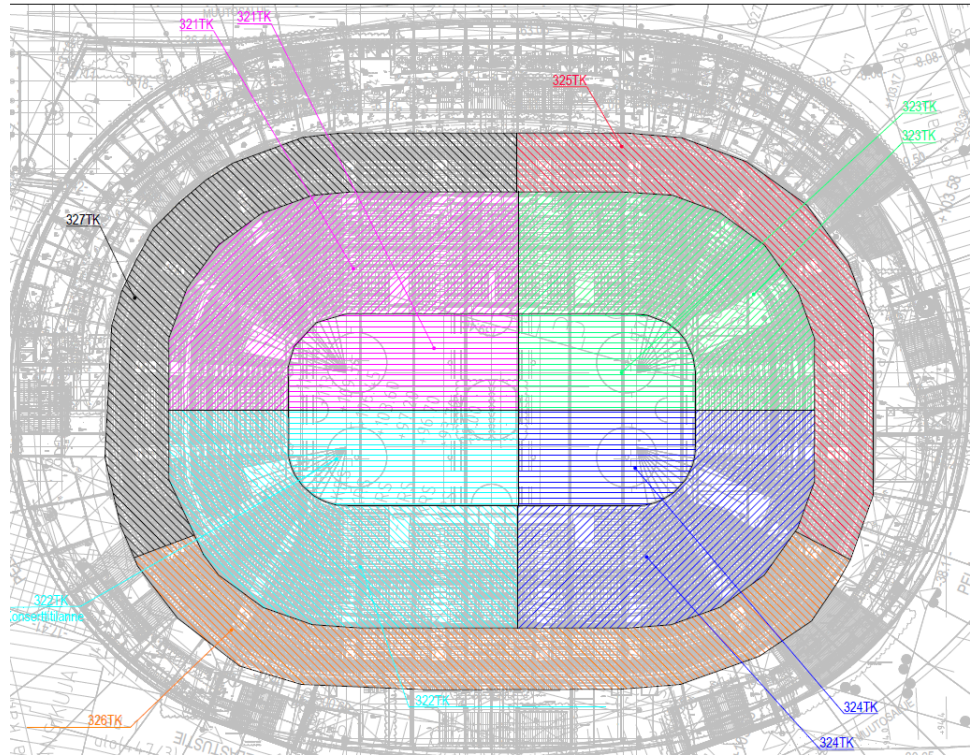
Kannen päälle rakennettava areena hotellisiivellä vaatii tavanomaista monitoimiareenaa vahvemmat kantavat rakenteet. Talotekniseen suunnitteluun tämä vaikuttaa käytettävissä olevaa tilaa rajaavana tekijänä. Lisäksi hotellin tarvitsema talotekniikka kulkee osittain Areenan puolella. Esimerkiksi Hartwall Areenan ylin kerros on kokonaisuudessaan varattu hallin tekniikalle, jolloin iv-koneet on voitu sijoitella tasaisesti sille rakennuksen osalle, josta kanavointi on helpoiten toteutettavissa. Tampereelle rakennettavan areenan ylimmästä kerroksesta suuri osa on täysin hotellin käytössä, ja talotekniikalle varatut tekniset tilat ovat sijainniltaan hajaantuneemmin. Teknisten tilojen kohdalla on myös jouduttu käyttämään luovuutta esimerkiksi sijoittamalla hallin katon ristikkoväleihin ilmanvaihtokonehuoneita.

Tätä lukua seuraavissa alajaksoissa on kerrottu Tampereen Areenan projektiin suunnitelmista sellaisena, kuin ne ovat olleet ennen talotekniikan urakkalaskentavaihetta.

10.2 Ilmanjakotapa

Edellisessä luvussa esitetyt tekijät rajaavat Tampereen Areenan katsomon ilmanvaihtotavan valintaa. Koska areenaa kiertävissä kerroksissa tilaa on rajoitetusti ja ilmanvaihtokonehuoneiden sijainti on painottunut toiselle sivustalle, eivät alajaksoisen ilmanvaihtotavan vaatimat kanavoinnit ole areenaan toteutettavissa. Hotellin areenaan avautuvat huoneet puolestaan rajaavat ylimmän tason seinälle ripustettavan kanavoinnin mahdollisuuden pois. Edellä käsitellyistä rajoitteista johtuen vain yläjakoinen, areenan katsomon katon ristikkoväleihin sijoitettava ilmanvaihtotapa on mahdollinen. Katsomolle on varattu seitsemän ilmanvaihtokonetta, joista neljä palvelee alakatsomoa sekä permantoa/kenttäaluetta ja kolme yläkatsomoa. Neljä alakatsomon iv-konetta varustetaan kiertoilmapellein ja niillä hoidetaan käyttöaikojen ulkopuolinen ylläpito. Kaksi koneista on sijoitettu katon ristikkoväleissä sijaitseviin konehuoneisiin ja kaksi areenan eteläpäätyyn. Yläkatsomon kolmea ilmanvaihtokonetta käytetään vain tarpeen mukaisesti, ja ne on varustettu pyörivällä lämmöntalteenottokiekolla, mutta muista koneista poiketen ilman kiertopeltiä. Alakatsomon tasalle tulee lämmitysputkivaraukset, jotka mahdollistavat jälkikäteen asennettavat kiertoilmalämmittimet areenan lämmitystä varten. (Kuva 19.)

Raitisilmamäärä areenassa on $6 \text{ dm}^3/\text{s}$ katsojaa kohden. Hallin maksimikapasiteetin on paloteknisten suunnitelmien mukaan arvioitu olevan 15 900 henkeä konserttitilanteessa ja 13 200 katsojaa jääurheilutapahtumassa. Hallin kuivaaminen hoidetaan erillisellä ilmankuivaimella (kuva 20).



Kuva 19. Katsomon ilmanvaihdon vyöhykkeet iv-konekohtaisesti.

Tapahtuma	Konversio	Perus -hlö määrä	Pääty pois	Areena -taso	Yhteensä
Jääkiekko	Koko areena	13200			13200
Konsertti päätylava	Istuimet areenatasolla	13200	2480	2100	12820
Konsertti päätylava	Seisomapaikat areenatasolla	13200	2480	3500	14220
Konsertti keskilava	Istuimet areenatasolla	13200		1800	15000
Konsertti keskilava	Seisomapaikat areenatasolla	13200		2700	15900
Teatteriversio	Lyhennetty areena	13200	10720		2480
Konsertti tms. puoliareena	Koko areena	13200	6340		6860
Lentopallo	Koko areena	13200			13200
Koripallo	Koko areena	13200			13200
Sulkapallo	Koko areena	13200			13200
Käsipallo	Koko areena	13200			13200
Voimistelu	Koko areena	13200			13200
Tennis	Koko areena	13200			13200
Salibandy	Koko areena	13200			13200
Jäähshow	Koko areena	13200	2480		10720
Horseshow	Koko areena	13200	2470		10730

Kuva 20. Arvio hallin yleisökapasiteetista eri tapahtumissa (10.12.2018).

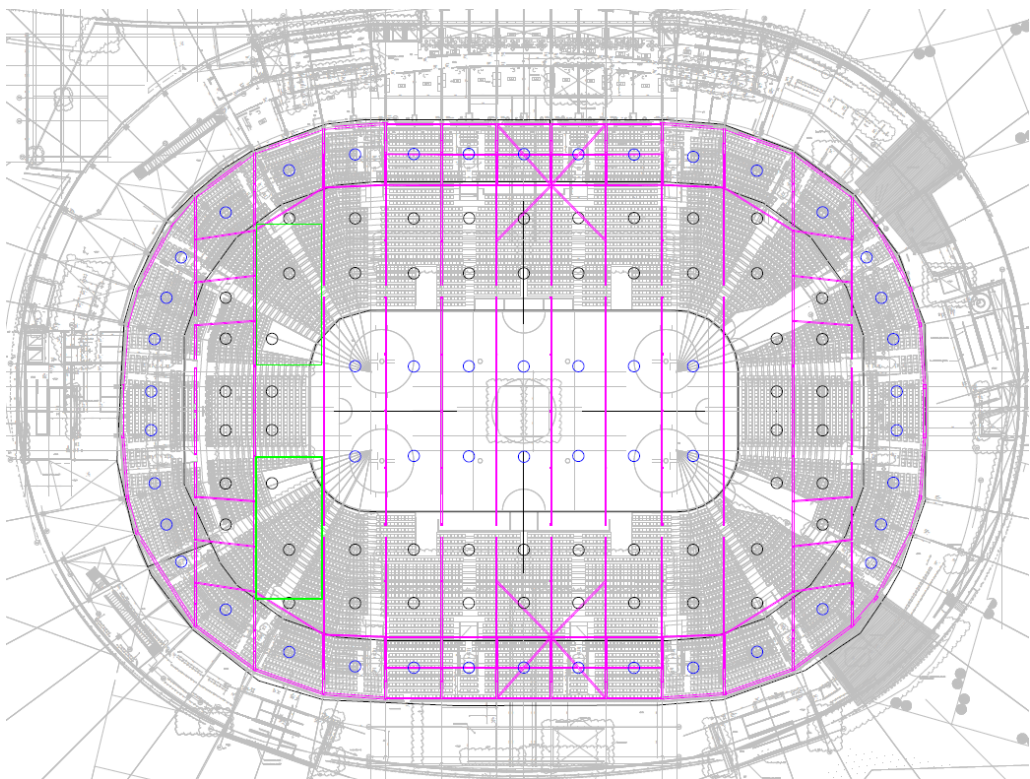
10.3 Tuloilma päätelaitteiden valmistajien näkemys toteutuksesta

Keväällä 2017 lähestyimme neljää tunnettua ilmanvaihdon päätelaitevalmistajaa ja pyysimme heiltä näkemyksen, kuinka he omilla tuotteillaan toteuttaisivat areenan ilmanvaihdon esittämillämme rajoitteilla. Jokaiselle valmistajalle erikseen pitämässämme projektin esittelyssä painotimme toimivan kokonaisuuden lisäksi ratkaisujen kustannustehokkuutta. Halton, Fläktwoods, Climecon ja Lindab vastasivat kaikki omilla ehdotuksillaan. Valmistajien päätelaitetoteutukset olivat hyvin lähellä toisiaan, ja kaikilla ehdotuksissa oli suurimmassa roolissa pyörrevirtahajotin. Yksi valmistaja ehdotti yläkatsomon tuloilmalaitteeksi kartiohajotinta. Liitteessä 1 on vertailu eri valmistajien ehdotuksista.

10.4 Tuloilmalaitteiden valinta ja sijoittelu

Suunnittelun edetessä tuloilmalaitteiden määrää ja sijoittelua haarukoitiin lisää hallin arkkitehtuuriin sopiviksi. Hallissa päätettiin käyttää kauttaaltaan pyörrevirtahajottimia ja sijoittaa tuloilmalaitteet areenan katsomon katon teräksisen kattotuolijaon mukaisiin väleihin (kuva 21). Tarvittavaan päätelaitteiden lukumäärään vaikuttaa tuloilmalaitteiden heittokuvio, sekä painehäviö ja ääniominaisuudet.

Alakatsomossa ja permannolla käytetään pyörrevirtahajottimia pisimmän heittopituuden asetuksella. Yläkatsomoissa pyörrevirtahajottimien lapakulma säädetään laajemmalle heittopituudelle niin, ettei ilman nopeus oleskeluvyöhykkeellä nouse vetoisuuden kannalta epämiellyttäväksi. Tuloilmalaitteiden suuren määrän vuoksi niitä ei kustannustehokasta varustaa lapakulmaa säätävillä moottoreilla. Ilman nopeuden vaihtelua oleskeluvyöhykkeellä eri lämpökuormatilanteissa siedetään kustannustehokkuuskompromissin vuoksi.

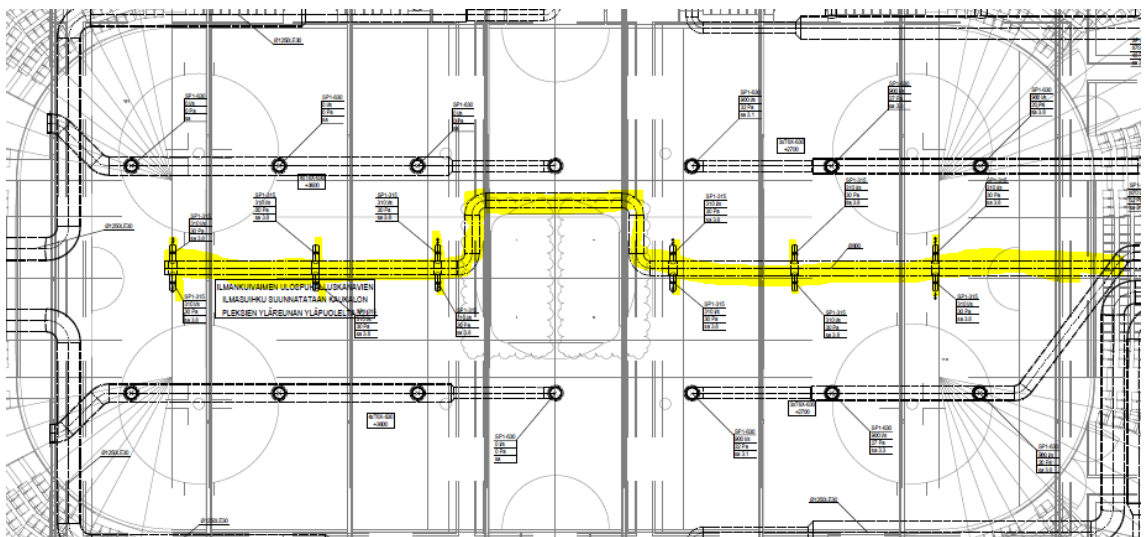


Kuva 21. Katsomon tuloilmalaitteiden sijoittelu. Kuvassa mustilla ympyröillä alakatsomoon vaikuttavat tuloilmalaitteet ja sinisillä permanto sekä yläkatsomo.

10.5 Kuivaus- ja poistoilma

Hallin ilmaa kuivataan erillisellä adsorptiokuivaimella. Kuivain kierrättää hallin ilmaa eikä vaikuta raitisilmakapasiteettiin. Kuivattu ilma puhalletaan suurella impulssilla hallin kattoon kenttätason keskelle sijoitetusta kanavista kaukalon laitojen yläpuolelle suunnatusti (kuva 22).

Poistoilmaa katsomosta pyritään ottamaan mahdollisimman paljon korkeimmalta kohdalta katsomon kupolikattoa, jonne ennalta arvioidaan muodostuvan korkeimmat lämpötilat. Osa poistoilmasta imetään ylimpien istuinrivien päältä kanavoinnin vaatiman tilan puutteen vuoksi.



Kuva 22. Kuivausilmakanava keltaisella korostettuna.

10.6 Ilmavirtojen ohjaus

Hallin katsomon ilmanjako on suunniteltu kolmeen vyöhykkeeseen perustuen. Ala- ja yläkatsomo muodostavat omat vyöhykkeensä ja permanto/kenttä omansa. Ala- ja yläkatsomoa ohjataan konekohtaisesti. Permannon kanavat ovat on/off-pellin takana, ja Hartwall Arenan sekä Espoon Metro Areenan tavoin ne pidetään jääurheilussa suljettuina. Kuivausilma puhalletaan jään päältä laitojen yläpuolelle, jolloin sen vaikutus kohdentuu parhaiten kriittisimmälle matalien lämpötilojen alueelle.

Tarvittavan tuloilmamäärän ratkaisee hallin lämmitys/jäähdytystarve. Raitisilmamäärään puolestaan vaikuttavat hallissa syntyvät epäpuhtaudet eli pääasiassa hiilidioksidi sekä ulko- ja sisäilman kosteussuhde. Jotta ilmanvaihtoa voidaan ohjata energiatehokkaasti, on hallista mitattava sisäilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta sekä hiilidioksidipitoisuutta. Lämpötilakerrostuman sekä mahdollisen epätasaisen lämpökuorman ja epäpuhtauslähteiden vuoksi on antureita sijoitettava useaan paikkaan hallissa.

Yläjakoisessa ilmanjakotavassa jään ollessa avoimena tuloilmaa joudutaan puhaltamaan suurilla määrillä, jotta ilmasuihkun lämmittävä vaikutus saadaan yltämään hallin alaosiin. Tyhjässä hallissa suurella impulssilla puhallettava kuivausilma auttaa osaltaan hallin katsomon alimpien rivien lämmitystarvetta. Tuloilman lämpötilaa täytyy ohjata suhteessa hallin alakatsomon lämpötilaan, jotta ylhäältä puhallettavan ilman nostevoima ei kasva liian suureksi ja lämmittävä vaikutus jää vain hallin yläosaan. 3–4 °C:n yllämpöisyys alakatsomon tuloilmalle on jo merkittävä heittopituutta lyhentävä tekijä isothermiseen ilmaan nähden. Hallin yläosan korkea lämpötila vaikuttaa myös energiatehokkuuteen sen nostaessa säteilylämmönsiirron osuutta jään ja katon välillä. Kun hallissa vallitsee lämpöhäviöitä ja jäätä suurempi lämpökuorma, on mahdollista pienentää tuloilman määrää, sillä alilämpöinen ilma ei ole puhallusnopeuden suhteen yhtä kriittinen yllämpöiseen ilmaan verrattuna. Jään ollessa sulatettuna tai peitettynä on tuloilmavirtaa mahdollista pienentää, jos sisäiset lämpökuormat ovat lämpövuotoja suuremmat. Tuloilman alilämpöisyydessä on syytä huomioida vedontunteen syntyminen. Olli Seppänen ym. suosittavat teoksessaan Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto, ettei normaalikorkuisessa huoneessa tulisi vedon vuoksi ylittää 12 °C:n alilämpöisyyttä (21, s. 198).

Raitisilmamäärää voi ohjata tarpeenmukaisesti hiilidioksidipitoisuuteen perustuen. Alakatsomoiden raitisilmamäärää on kannattavaa kuormitustilanteessa lisätä myös, mikäli ulkoilman absoluuttinen kosteuspitoisuus on pienempi kuin hallissa vallitsevan sisäilman kosteus. Tällöin saavutetaan kosteustasapainoon nähden kuivaava vaikutus. Raitisilmamäärää puolestaan kannattaa rajoittaa ohjautuvan vain hiilidioksidipitoisuuden mukaan, kun ulkoilman absoluuttinen ilmankosteus ylittää hallin sisäilman arvot. Näin vältetään tarpeeton ilman kuivaaminen.

Ilmanvaihtoa ohjaavassa taloautomaatiojärjestelmässä tulee huomioida eri tilanteet avoimelle sekä peitetulle jälle. Peitetyn jään tilanteessa permanttoa palvelevat tuloilmakanavat avataan ilmapirrille. Ilman avointa jäätä myöskään hallin sisäilman kosteus ei ole yhtä merkitsevä tekijä, ja hieman korkeampi suhteellinen kosteuspitoisuus voidaan

sallia. Yläkatsomoita palvelevat ilmanvaihtokoneet voidaan ylläpitotilanteessa pitää kokonaan suljettuina, edellyttäen että alakatsomon ilmavaihtokoneiden raitisilmamäärän minimi mitoitus kattaa koko katsomon osalta ympäristöministeriön asetuksen vaatimukset vähimmäisilmavirroille. Tuloilman ohjauksessa suhteellinen lämpötila asetusarvon, sisäilman ja tuloilman välillä on merkitsevä. Alilämpöistä ilmaa halliin tuotaessa on tuloilmamäärää mahdollista vähentää ja näin säästää puhaltimien käyttämästä sähköenergiasta. Raitisilmamäärälle asetetaan minimiasetus, jota kasvatetaan hiilidioksidi- ja kosteusantureiden mittatiedon ylitettyä raja-arvot 800 ppm hiilidioksidissa tai 55 % suhteellisessa kosteudessa. Alilämpöistä ilmaa tuotaessa raja-arvojen ylittymiseen reagoi ensin alakatsomoiden iv-koneiden kiertoilmapelti. Kiertoilmapeltien täysin auki ollessa tuloilmapuhaltimien kierrosnopeutta säädetään niin, että asetusarvot täyttyvät. Ylilämpöistä ilmaa halliin tuotaessa puhallusnopeus on vakio, ja kiertoilmapelti ohjautuu hiilidioksidi- ja kosteusantureiden antaman tiedon mukaan pyrkien asetusarvoihin. Tuloilman lämpötila on sidoksissa sisälämpötilan asetusarvon lisäksi alakatsomon lämpötilaan niin, että se on maksimissaan 3–4 °C ylilämpöistä. Yläkatsomon koneita ei ole varustettu kiertoilmapellein, ja niiden puhaltimien kierrosnopeutta ohjataan tarpeen mukaisesti hiilidioksidi- ja lämpötilaantureiden datan perusteella. Yläkatsomon ilmanvaihdon lämpötilasäätö ei saa olla ristiriidassa alakatsomon kanssa niin, että yläkatsomoa jäähdytettäisiin merkittävästi samalla, kun alakatsomossa on lämmitystarvetta. Halliin syntyvän lämpötilakerrostuman vuoksi yläkatsomolle on syytä sallia alakatsomoa korkeampi lämpötila, sillä yhtäaikainen lämmitys ja jäähdytys aiheuttaa tarpeetonta energiakulutusta. Kun hallissa on kauttaaltaan jäähdytystarvetta, voidaan jokaisella vyöhykkeellä pyrkiä samoihin sisälämpötilan asetusarvoihin.

11 Loppusanat

11.1 Yhteenveto

Monitoimiareenan katsomoilmanvaihdon suunnittelu on haastava prosessi, jossa lopputuloksen ennakointi ilman dynaamisia simulointimenetelmiä on erittäin haastavaa. Ilmanvaihtoratkaisulla on merkittävä osa hallin lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa sekä energian kulutusta. Uuden areenan suunnittelun yhteydessä tulisi heti alussa huomioida ilmanvaihtotavan valinta, jotta sisäilman laadun ja energiakulutuksen osalta on mahdollista kohteeseen valita sopivimmat sekä kustannustehokkaimmat ratkaisut.

Olemassa olevia monitoimiareenoita on toteutettu erilaisin ilmavaihtoratkaisuin. Ilmanvaihtotavat jakaantuvat kahden pääkategorian alle: katsomon alta syrjäyttävän ilmanvaihdon sekä ylhäältä sekoittavan ilmanvaihdon periaatteella jaettaviin tuloilmajärjestelmiin. Samassa areenassa on mahdollista käyttää useaa ilmanvaihtotapaa vyöhykkeittäin.

Monitoimiareenan katsomon ilmanvaihto- ja lämmitystavan valinta vaikuttaa tuloilman ohjaukseen. Lämpö-, jäähdytys-, epäpuhtaus- ja kosteuskuormien hallinta on suunniteltava kokonaisuutena. Kuormitustilanteet areenassa vaihtelevat merkittävästi ja ilmanvaihdon tarpeenmukainen ohjaus on rakennettava niin, että kussakin tilanteessa käytetään pienintä mahdollista energiamäärää. Ilmanvaihdon ohjauksessa on huomioitava sisä- ja tuloilman lämpötilojen suhde, sisä- ja ulkoilman kosteussisältö sekä hallissa syntyvät epäpuhtaudet. Monitoimiareenassa ilmavirtojen liikkeet ovat vaikeasti suunniteltavissa ilman dynaamisia simulointimenetelmiä. Katsomon viihtyisyyteen vaikuttavat tilan sekä tuloilman lämpötila, ilman liikenopeus ja ilman kosteussisältö. Ilmanvaihdon suunnittelulla ja ilmanvaihtotavan valinnalla on merkittävä vaikutus saavutettavissa oleviin olosuhteisiin. Ilmanvaihtokokonaisuudella on myös merkityksensä hyvien jääturheiluolosuhteiden mahdollistamisessa.

11.2 Kiitokset

Lopuksi tahdon kiittää seuraavia insinööriyötä ohjanneita sekä siinä mukana olleita henkilöitä:

Seppo Innanen	Metropolia AMK
Kai Lindgren	Ramboll Finland
Eero Lukkarinen	Ramboll Finland
Jarno Hämäläinen	Ramboll Finland
Antti Rytivaara	Climecon Oy
Eetu Koskimäki	FläktGroup Finland Oy

Tuukka Karlsson FläktGroup Finland Oy

Mikko Toivonen Halton Group

Pasi Sauvolainen Lindab Ab




Lähteet

- 1 Yritys. Verkkoaineisto. Ramboll Finland Oy. <http://www.ramboll.fi/ramboll_finland_oy>. Luettu 19.7.2018
- 2 Kansi ja Areena. Verkkoaineisto. SRV. <<https://www.srv.fi/kaupunkien-kehittaja/kansi-ja-areena/>>. Luettu 19.7.2018
- 3 Hyvärinen, Mikko. 2010. Hartwall Arena floorball floor assembly Timelapse. Verkkoaineisto. Youtube <<https://youtu.be/Me5qiOzolag>>. Luettu 23.7.2018
- 4 Jäähallien lämpö- ja kosteustekniikka suunnittelu- ja rakennuttamisopas. 2007. Teknillinen korkeakoulu. Suomen jääkiekkoliitto. Tampere: Rakennustieto Oy
- 5 Jäähallien jään laatu -tutkimus. 2018. Suomen Jääkiekkoliitto ry, Suomen Taitoluisteluliitto ry, Suomen Kaukalopallo- ja Ringetteliitto ry ja Suomen Curlingliitto Ry. Helsinki: Opetus- ja kulttuuriministeriö
- 6 Mollier-diagrammi. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/434356/mod_resource/content/1/Mollier-diagram.pdf>. Luettu 23.7.2018
- 7 Raappana, Eetu; Maunu, Jesse. 2016. Ranuan jäähallin ilmanvaihto ja energiatehokkuus. Opinnäytetyö. Lapin ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 8 Styf, Merle. 2009. Jäähallin rakenteet. Insinööriä. Metropolia ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 9 IIHF ice rink guide. Verkkoaineisto. IIHF. <http://www.iihf.com/fileadmin/user_upload/PDF/Rink_Guide/IIHF_Ice_Rink_Guide_web_pdf.pdf> Luettu 23.7.2018
- 10 Sormunen, Pia; Sundman, Tom L.& Lestinen, Sami. 2007. The Design Challenges of Multipurpose Arenas. Olof Granlund Ltd, Finland
- 11 Sandberg, Esa. 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus, Ilmastointitekniikka osa 2. Tampere: Talotekniikka-Julkaisut Oy
- 12 Seppänen, Olli; Hausen, Alvar; Hyvärinen, Kalevi. 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy
- 13 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 1987. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö.

- 14 Eskola, Tapani. 1997. PR76 projektilehti: Helsinki: Kustannus Oy Projektilehti
- 15 Air distribution in indoor ice skating rinks. 2017. Verkkoaineisto. Rehva. < https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2017/RJ4/RJ1704_WEB.pdf> Luettu 12.10.2018
- 16 Innovative Strategies For Ice Hockey Rink. 2018. Verkkoaineisto. Ashrae Journal, < http://www.nxtbook.com/nxtbooks/ashrae/ashraejournal_201804/index.php#/36> Luettu 18.10.2018
- 17 Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. Verkkoaineisto. FINVAC ry, < https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/finvac_opas-ilmanvaihdon-mitoitukseen-muissa-kuin-asuinrakennuksissa_2017-11-30.pdf> Luettu 26.12.2018
- 18 Mazzotti, Willem. 2014. Secondary Fluids Impact on Ice Rink Refrigeration System Performance. Master of Science Thesis. L KTH School of Industrial Engineering and Management.
- 19 LED vs Metal Halide Lighting: 9 Reasons LED Wins. Verkkoaineisto. DRK Enterprises LLC. < <https://www.myledlightingguide.com/blog-led-vs-metal-halide-lighting>> Luettu 28.12.2018
- 20 TenWolde, Anton; Pilon, Crystal L. 2007. Verkkoaineisto. The Effect of Indoor Humidity on Water Vapor Release in Homes. Ashrae. < <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.547.9688&rep=rep1&type=pdf>> Luettu 2018
- 21 Seppänen, Olli. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Helsinki. Suomen LVI-liitto ry.
- 22 Lindab Ilmastointituotteet, Hinnasto 1.10.2018. Verkkoaineisto. Lindab. < http://www.lindab.com/fi/Documents/Ilmastointi/esitteet%20ja%20dokumentit/Lindab_Ilmastointihinnasto_01_10_2018.pdf> Luettu 2.1.2019
- 23 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. 2008. Suomen rakentamismääräyskoelma, osa D2. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 24 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. 2017. 1009/2017. Helsinki: ympäristöministeriö.


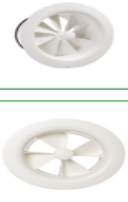


Alakatsomo										
Alakatsomo	Tyyppi	Mitoitustilanne 44,60 m ³ /s	Äänitaso	Δpt / pa	kpl	Tehostustilanne 52 m ³ /s	Äänitaso	Δpt / pa	Muuta	Kytkentäkanava
Lindab RCW 500-A RCW	pyörrehajotin	745 dm ³ /s per päätelaite	36 db/(A)	38	60	865 dm ³ /s per päätelaite	43 db/(A)	50	Asennetaan 75° lapakulmaan	500 60 kpl
<p>Tuotekuvaus RCW on erityisesti korkeisiin huoneiloihin tarkoitettu pyörrehajotin. Laitteessa on säädettävät silvet, jolla puhalluskuvio voidaan vaihtaa pystysuorasta vaakasuoraksi. Siipien säätö voidaan tehdä käsin tai automaattisesti erityyppisillä moottoreilla. Siipien käsisäädöllä varustettu RCW toimitetaan vakiona 30° siipikulmalla. Moottorisäätöiset mallit toimitetaan vakiona 30°–75° siipikulmalla. Moottorisäätöiset RCW:t voidaan toimittaa sähköisesti on/off-ohjatuilla moottoreilla, moduulivalla moottorilla tai termostaattisella säätölaitteella (puhalluskuvio muuttuu puhalluslämpötilian mukaan).</p>										
<p>Huomioita Vetoisuusvaatimus keskimmaisella paikalla ei toteudu viiden kelvinin lämpötilaerolla Ylimmällä rivillä vetoisuusvaatimus ei toteudu yli yhden kelvinin lämpötilaerolla Tehostustilanteen äänenpainetaso ylittää hyväksytyä laitekohtaisen arvon Kahden kelvinin yllämpi tilanteessa ilmasuihku ei saavuta oleskeluvyöhykettä kauttaaltaan Koko vaihdettu Lindabin ehdotuksesta poiketen 400 > 500 jotta tehostustilanne ei ole aivan mahdoton Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)</p>										
<p>Haltson TSA 500 (C) Pyörrehajotin</p>										
<p>Haltson TSA Pyörrehajotin</p>										
<p>Lisävarusteet</p> <ul style="list-style-type: none"> Vaakatasuuntainen radiaalipyörresuihku tai pystysuuntainen kompakti pyörresuihku. Soveltuu myös lämmityslaitteisiin. Soveltuu hyvin myös suuriin ja korkeisiin tiloihin. Tuloilman virtauskuvioita voidaan säätää käsin tai ohjata toimilaitteen avulla. Tehokkaasti indusoivan pyörreilmasuihkun ansiosta ilman sekoittuminen on tehokasta ja ilmasuihkun nopeus laskee nopeasti. <p>Lisävarusteet</p> <ul style="list-style-type: none"> Liitäntälaatikko, joka on varustettu säätötoiminnolla (PLC) tai säätö- ja mittaus toiminnolla (TRI) Toimilaitte (sähköinen 24 VAC:n käyttöjännitteellä ja suhteellisella 0...10 VDC:n säätösignaalilla tai itseaktivoituva vahapatruuna) ilmasuihkun virtauskuvion säätämiseksi. 										
<p>Huomioita Vetoisuusvaatimus ongelmat Lindabin päätelaiteen huomioissa mainittujen kaltaisia Isoteremisellä ilmalla keskimmäisen paikan ilmannoopes 20 m/s Konserttitilanteessa päätelaiteen ilmanvirtauskuhu ei yllä oleskeluvyöhykkeelle Säätämällä heittokuvion väliarvolle ilman nopeutta mahdollista hidastaa, mutta HIT-mallinnoksella ei ole tälle asetusta jolla tilannetta voisi tarkastella Itseohjautuva vahapatruuna ei ole soveltuva Areena käytössä Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)</p>										



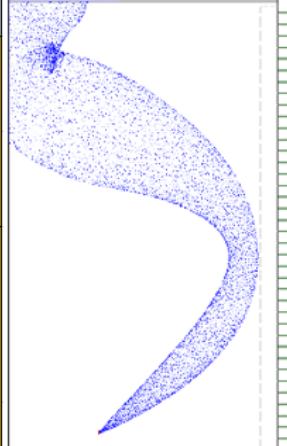
Alakatsomo	Tyyppi	Mitoitustilanne 44,60 m ³ /s	Äänitaso	Δpt / pa	kpl	Tehostustilanne 52 m ³ /s	Äänitaso	Δpt / pa	Muuta	Kytkenäkanava
Ehdotus joka täyttäisi paremmin vaihtuvien tilanteiden olosuhteet:										
Halton TSA 500 (C)		600 dm ³ /s per päätelaite	34 db/(A)	15	74	700 dm ³ /s per päätelaite	40 db/(A)	20	Kapea suihku suoraan alas	500 74 kpl
										
<p>Huomioita</p> <p>Vetoisuvaatimus ongelmat Lindabin päätelaitteen huomioissa mainittujen kaltaisia</p> <p>Isotermisellä ilmalla keskimmäisen palkan ilmannoisuus 20 m/s</p> <p>Konserttitilanteessa päätelaitteen ilmanvirtausiikka ei yllä oleskeluvyöhykkeelle</p> <p>Säättämällä heittokuvion väliarvolle ilman nopeutta mahdollista hidastaa, mutta HIT-mallinnoksella ei ole tälle asetusta jolla tilannetta voisi tarkastella</p> <p>Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)</p>										
Fläktwoods ODZA-63-1-1	Pyöreävirrahajotin	610 dm ³ /s per päätelaite	24 db/(A)	22	74	700 dm ³ /s per päätelaite	27 db/(A)	28	säädetään testaamalla	630 74 kpl
 <p>Tuotetiedot</p> <ul style="list-style-type: none"> Säädettävä pyöreähajottaja ODZA Heittosuunta portaattomasti Säädettävissä vaaka- ja pystysuoran puhalluksen väliä Erittäin pitkä heittopituus Erittäin tehokas lämmittämään korkeita tiloja Asennus katon tasalle tai vapaasti kattoon Liitäntä suoraan kanavaan tai taseauslaatikkoon <p>Pyöreähajottaja ODZA on tarkoitettu vilkkaasti käytettyihin julkisiin tiloihin, kuten kauppahalleihin, tavarataloihin ja varastoihin.</p> <p>Hajottajan toiminnan voi säätää kesä- ja talviolosuhteisiin sopivaksi.</p> <p>Virtauskuviota voi vaihdella lamellien kulmaa muuttamalla. Lamelleista puolet ovat kiinteitä ja puolet käännettäviä. Ääniasennossa käännettävät lamellit koskettavat kiinteitä lamelleja.</p> <p>Tällöin kiinteiden ja käännettävien lamellien väliin syntyy aukkoja, jotka muodostavat "suuttimia". Näin saadaan aikaan erittäin pitkä heittopituus pystysuoralla puhalluksella.</p> <p>Pyöreähajottaja ODZA on suunniteltu ilmavirta-alueelle 39-2500 l/s (140-9000 m³/h) ja heittopituudelle 3-28 m.</p> <p>Säätö voidaan tehdä käsin, tai siihen voidaan käyttää sähkö- tai termomootoria.</p> <p>Lämpötilaero jäähdytyksessä enintään Δt = 12 K.</p> <p>Lämpötilaero lämmityksessä enintään Δt = 15 K.</p>										
										
<p>Huomioita</p> <p>Tuotekoodin hajottaja on manuaalisesti säädettävä malli</p> <p>Ilmanopeus tietoja oleskeluvyöhykkeellä ei saatavilla. Oletetaan edellisten tuotteiden kaltaisiksi</p> <p>Heittopituus isotermisenä ääriolosuhteissa noin 23m (pisin esitetyistä malleista)</p> <p>Fläktwoods in ehdotuksesta poiketen kappalemäärä muutettu vastaamaan 44,60 dm³/s kokonaisilmavirtaa</p> <p>Mahdollisesti voisi kasvattaa ilmamäärää ja pienentää kappalemäärää</p> <p>Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)</p>										

Yläkatsomo		Mitoitustilanne 33,45 m ³ /s	Äänitaso	Δpt / pa	kpl	Tehostustilanne 39 m ³ /s	Äänitaso	Δpt / pa	Muuta	Kytkenäkkanava
Yläkatsomo	Tyyppi	560 dm ³ /s per päätelaite	21 db/(A)	25	60	650 dm ³ /s per päätelaite	35 db/(A)	34	Asennetaan 60° lapakuulmaan	500
Lindab RCW 500-A	pyörrehajotin									60 kpl
RCW		<p>Huomioita</p> <p>Vaatimukset vedolle eivät täyty. Isotermisellä puhalluksella keskimmäisen paikan kohdalla ilmamnopeus 0,26m/s</p> <p>Sopivampi voisi olla 45° lapakuuma, mutta tällöin painehäviö ja äänenpainetasot poikkeavat ilmoitetusta, sekä yllämmiin tuloilma ei tavoita oleskeluvyöhykettä</p> <p>Kokoluokan kasvattaminen 500--> 630 mahdollisesti vaihtoehto</p> <p>Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)</p>								
Fläktwoods ODZA-63-1-1	pyörrehajotin	560 dm ³ /s per päätelaite	32 db/(A)	19	60	650 dm ³ /s per päätelaite	22 db/(A)	25	säädetään testaamalla	630
Fläktwoods ODZA-63-1-1		<p>Huomioita</p> <p>Veto-ongelmat oletettavasti edellisen esimerkin kaltaisia.</p> <p>Suurempi ilmamäärä ja pienempi kappalemäärä mahdollisesti vaihtoehto. Ilmamnopeus dataa ei saatavilla.</p> <p>Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)</p>								
Halton TRB-500 (R)	kartiokattohajotin	600 dm ³ /s per päätelaite	23 db/(A)	24	56	695 dm ³ /s per päätelaite	38 db/(A)	32		500
Halton TRB kartiokattohajotin		<p>Huomioita</p> <p>Kaksiasentoinen säätö. Leveä radiaalisuihku toimii oikeastaan vain voimakkaasti allämpöisenä.</p> <p>Kapeassa compact asennossa isotermisellakin ilmalla suuret ilmamnopeudet. Keskimmäisellä paikalla 0,50m/s</p> <p>Soveltuu huoneitten tuotteista tarkoitukseensa.</p> <p>Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)</p>								



Permanto		Mitoitustilanne 44,60 m ³ /s		Tehostustilanne 52 m ³ /s		Kyt Kentänkanava	
RCW	Tyyppi	Äänitaso	Δpt / pa	Äänitaso	Δpt / pa	Muuta	Kyt Kentänkanava
Lindab RCW 400-A	pyörrehajotin	400 dm ³ /s per päätelaite	28 db/(A)	28 db/(A)	60 db/(A)	Asennetaan 75° lapakulmaan	400 20 kpl
	Huomioita						
	Isoterminenä ilmavirran oleskeluvyöhykkeelle yltäminen on kyseenalainen Tehostustilanteessa äänenpainetaso ylittää suunnitteluvaatimukset Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)						
Fläktwoods ODZA-50-1-1	pyörrehajotin	400 dm ³ /s per päätelaite	24 db/(A)	24 db/(A)	55 db/(A)	Pystysuora puhallus	500 20 kpl
	Huomioita						
	Suurin heittoptuus ehdotetuista tuotteista Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)						
Halton ei ehdottanut permannolle mitään. Pyörrevirtahajottimella arvot:							
Halton TSA-400 (C)	pyörrehajotin	400 s per päätelaite	37 db/(A)	36 db/(A)	82 db/(A)	Kapea suihku suoraan alas	400 20 kpl
	Huomioita						
	Isoterminenä ilmavirran oleskeluvyöhykkeelle yltäminen on kyseenalainen Tehostustilanteessa äänenpainetaso ylittää huomattavasti suunnitteluarvot, painehäviöt suuret Halton ei ollut ehdottanut permannolle päätelaitetta. Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)						
Ehdotus joka täyttäisi paremmin vaihtuvien tilanteiden olosuhteet:							
Halton TRS 500 (CN)	Pyörrehajotin	400 dm ³ /s per päätelaite	27 db/(A)	22 db/(A)	49 db/(A)	Kapea suihku suoraan alas	500 74 kpl
	Huomioita						
	Hyvä heittoptuus Vetoisuusvaatimus ei täyty. Isoterminenä 0,30m/s Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)						

Kuivauskanava		Mitoitustilanne 3,90 m ³ /s		Äänitaso		Apt / pa		kpl		Muuta		Kytöntäkanava			
Kuivauskanava Lindab DAD-315		325 dm ³ /s per päätelaite		43 db/(A)		150		12		250 koko vaihtoehtona		315 15			
AREENAN KUIVAUSILMA															
Suosittelemme kuivausilman puhallukseen suunnattavaa DAD-suutinta.															
Yliämpöisen ilman puhallukseen vaaditaan korkeaa kanavapainetta. Esimerkiksi laitekoko 315 ja ilmavirta 325 l/s (1170 m ³ /h) aiheuttaa noin 150 Pa painehävion.															
Suutinkulmalla 70-astetta vaakatasosta alas 8 K yliämpöinen tuloilma liikkuu päätelaitteesta alaspäin noin 15 metriä ja vaakaan 8 metriä ennen kääntymistään ylöspäin.															
Laittekoolla 250 mm ja ilmavirralla 250 l/s ilmasuihkua saadaan alaspäin n. 16 m ja vaakaan n. 9 m. Laitteen painehäviö on noin 200 Pa.															
Halton PRA/N-315 (S)		Säätöpeltili		485 s per päätelaite		33 db/(A)		30		8		30° pystysuorasta sivuun		500 56 kpl	
Huomioita															
Ei suunnattavissa jälkikäteen															
315 koolla asennustiheys on harva n.8,5m															
Pienempi koko ja useampi päätelaita voisi sopia paremmin lämmitystilanteen apuilmavirraksi															
Esim. Pra/N-250(S) 325 l/s 12 kpl. 37dB(A) 44Pa															
Mikäli suihku halutaan säilyttää koko kuivauskanavan mitalta samanlaisena kauttaaltaan tulee varustaa vielä erillisellä säätölaitteella															
Pelkällä PRA-säätöpellillä ilman nopeus pelin yli vaihtelee aukon suuruuden ja kanavapaineen mukaan															
Fläktwoods KHDA-40-1-1		Säätöpeltili		325 dm ³ /s per päätelaite		<20 db/(A)		5		12		suunnattavissa 20°		500 56 kpl	
Huomioita															
Tarvitsee lisäksi säätöpellin (ei laskettu hintaan)															



KHDA soveltuu käytettäväksi korkeiden ja suurten tilojen, kuten teollisuus-, uhrilei- ja varastohallien ilmanjakolaitteena. Hajotin voidaan asentaa kattoon, seinään tai vapaaseen tilaan. Heittokuvio voidaan vaihtaa kapeasta leveään kääntämällä sisäkartio 180°. Suihkun maksimi poikkeama perussuunnasta on ±20° kapealla heittokuvuilla ja ±15° leveällä heittokuvuilla.

Tuotetiedot

- Tarkoitettu suuriin tiloihin
- Muunneltava heittokuvio
- Säädettävä puhallussuunta
- Viisi kokoa

Kanavaosien hintavertailu

Project: Alakatsomon yläjakoinen ilmanvaihtotapa

Date: 02.01.2019

1/4 alakatsomon ilmanvaihdosta

Class	Size	N	L\[m]	€/m	€/kpl	€
Duct	630		159,4	68,9		10982,7
Duct	800		7,6	96,3		731,9
Duct	1000		37,4	153,4		5737,2
Duct	1250		30,6	214		6548,4
Bend-45	1000	2			90,5	181,0
Bend-90	630	10			143,3	1433,0
Bend-90	1000	2			584,5	1169,0
Bend-90	1250	3			857,2	2571,6
T-branch-90	630/630	12			226,5	2718,0
Outlet	800/630	1			128,1	128,1
Outlet	1000/630	7			160,6	1124,2
Outlet	1250/630	3			78,4	235,2
Reducer/Expander	800/630	1			305,1	305,1
Reducer/Expander	1000/630	2			285,8	571,6
Reducer/Expander	1250/800	1			476	476,0
Plug	630	7			99,7	697,9
Supply air device	630	19			1 092,70	20761,3
Flow damper	630	19			753,7	14320,3
Flow damper	1000	1			1 107,00	1107,0
					TOTAL	71799

Project: Alakatsomon alajakoinen ilmanjakotapa

Date: 02.01.2019

1/4 alakatsomon ilmanvaihdosta

Class	Size	N	L\[m] q _v (m ³)	€/m	€/m ³	€/kpl	€
Duct	1000		310,6		153,4		47646
Bend-45	1000	12				90,5	1086
Bend-90	1000	9				584,5	5260,5
T-branch-90	1000/1000	3				927,6	2782,8
Flow damper	1000	3				1 107,00	3321
Supply air device (arvio)	custom		15,2		1491,6		22672,3
					TOTAL	82769	