

Tuomas Attila


MODULAARISEN LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHTORATKAISUJEN KEHITTÄMINEN

Opinnäytetyö
Talotekniikan koulutusohjelma

Huhtikuu 2014



KUVAILULEHTI

| | | | |
|---|--|---|--|
|  MAMK University of Applied Sciences | | Opinnäytetyön päivämäärä 30.04.2014 | |
| Tekijä(t) Tuomas Attila | | Koulutusohjelma ja suuntautuminen Talotekniikka | |
| Nimeke Modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtoratkaisujen kehittäminen | | | |
| Tiivistelmä <p>Päätavoitteena opinnäytetyössäni oli kehittää yhteistyössä hankkeen muiden osapuolten kanssa toteutuskelpoinen ilmanvaihtoratkaisu modulaariseen leikkaussaliin. Ilmanvaihtoratkaisun kehittäminen on osa suurempaa osin TEKES:n rahoittamaa hanketta, jossa on mukana useita eri alojen ammattilaisia. Suomessa ei ole aikaisemmin lähdetty kehittämään modulaarista leikkaussalia ja siksi tällaiselle tutkimus- ja kehitysprojektille on Suomessa kiinnostusta paitsi laite- ja järjestelmävalmistajien keskuudessa niin myös eri sairaaloilla.</p> <p>Suuntaviivat ilmanvaihtoratkaisun kehittämiseksi ja suunnittelulle antoi uusi sairaalailmanvaihtoa koskeva CEN -standardi, joka on vielä luonnosvaiheessa, mutta josta jo löytyy tärkeimmät leikkaussalin sisäilmastoa koskevat vaatimukset. Uusi standardi eroaa nykyisin Suomessa käytössä olevista määräyksistä ja ohjeista siten, että ilmanvaihdon mitoittavaksi tekijäksi on standardissa määritetty operaation tyypistä riippuva operaation aikainen ilman mikrobipitoisuuden raja-arvo, jonka yksikkö on CFU/m³. Suunnittelussa ja mallinnuksessa hyödynnettiin MagiCAD- ja NavisWorks-ohjelmistoja sekä ilman virtauskuvioiden ja nopeusjakauman tutkimiseen CFD-simulointia. Lisäksi tutkimuksessa tehtiin paljon manuaalista laskentaa.</p> <p>Modulaarisen leikkaussalin prototyyppiin ilmanjakotavaksi valittiin sekoittava ilmanjako, mutta sali voidaan myös vaihtoehtoisesti toteuttaa laminaarisella ilmanjakotavalla. Opinnäytetyössäni perehdytään myös sekoittavan ja laminaarisen ilmanjaon eroja käsitteleviin tutkimuksiin, joiden tuloksista ilmeni, että laminaarisella ja sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutettujen salien leikkauksen aikaisten infektioiden esiintyvyydessä ei ollut merkittäviä eroja. Ruotsalaisiin tutkimuksiin perustuvilla manuaalisen laskennan menetelmillä pystyttiin havainnollisesti määrittämään ilmanvaihdon tarve leikkaussaliin. Tutkimuksista tuli ilmi leikkaussalin epäpuhtausemissioiden minimoinnin suuri vaikutus ilmapuhtautukseen.</p> <p>Erilaisten leikkaussalivaatetusten vaikutus salin mikrobipitoisuuteen oli ilmeinen ja sekoittavalla ilmanjaolla toteutetun leikkaussalin tarvittava ilmapuhtaus oli riippuvainen salissa olevien henkilöiden lukumäärästä sekä vaatetuksesta riippuvasta, ihmisten tuottamasta kokonaisepäpuhtausemissiosta. Näin ollen tärkeimpänä salin alhaiseen mikrobipitoisuuteen vaikuttavana tekijänä voidaan pitää epäpuhtausemissioiden minimointiin tähtääviä toimia, joista leikkaussalivaatetuksella on merkittävin osuus. Salin mikrobipitoisuus korreloi esiintyvien leikkausinfektioiden kanssa ja sairaalainfektioiden aiheuttamat ylimääräiset kustannukset nousevat Suomessa vuositasona jopa 100 miljoonaan euroon. Tämän takia olisi erittäin tärkeää, että sairaaloissa asiaa aletaan käsitellä ja panostetaan leikkaussalihenkilökunnan asianmukaiseen informointiin sekä vaatetukseen.</p> | | | |
| Asiasanat (avainsanat) Leikkaussali, modulaarinen, ilmanvaihto, sekoittava ilmanjako, leikkaussalivaatetus, puhdistila | | | |
| Sivumäärä 88 (19) | | Kieli Suomi | |
| URN | | | |
| Huomautus (huomautukset liitteistä) | | | |
| Ohjaavan opettajan nimi Jukka Räisä | | Opinnäytetyön toimeksiantaja Granlund Kuopio Oy | |

DESCRIPTION

| | | | |
|---|--------------------------------|---|--|
|  <div style="display: inline-block; vertical-align: middle;"> <div style="font-size: 2em; font-weight: bold; margin: 0;">MAMK</div> <div style="font-size: 0.8em; margin: 0;">University of Applied Sciences</div> </div> | | Date of the bachelor's thesis 30.04.2014 | |
| Author(s) Tuomas Attila | | Degree programme and option Building services Engineering | |
| Name of the bachelor's thesis Development of a ventilation system in a modular operating room. | | | |
| Abstract <p>The main goal in my thesis was to develop a practicable ventilation solution for modular operating room together with other parties of the project. Development of the ventilation solution is part of larger project which is partly funded by TEKES and which involves a number of professionals from different fields. In Finland there haven't been any previous development projects regarding modular operating rooms. Therefore in Finland many component & system manufacturers and hospitals have shown a great interest in such R&D project.</p> <p>The main guidelines for developing and hpac planning were given by new CEN-standard which is still in draft state but where the most important regulations for indoor climate of operating room can already be found. The regulations of new standard differ from currently used regulations and instructions in Finland. New standard defines operation type dependable microbe concentration limit values during operation as a main dimensioning factor for ventilation designing. Unit for this is CFU/m³. For operating room planning and modelling was used MagiCAD and Navisworks programs and for examination of airflow patterns and air velocity range in operating room was used CFD-simulation. In addition there was also much of manual calculation in this research.</p> <p>For modular operating rooms air distribution system, dilution mixing system was chosen but also laminar air distribution system is considered as an option. My thesis also focused on different kinds of research information that concerned differences of infection occurrence during operation in laminar and mixing air distribution operating rooms. Results of those studies showed that there was no big difference in infection occurrence during operation between these two airdistribution system operating rooms. The manual calculation methods based on Swedish studies made possible to define the need of airflow rate to operating room. Studies showed that measures for minimizing contaminant emissions had significant influence for need of airflow rate.</p> <p>The influence of different kinds of operating room clothing systems to microbe concentration of operating room was obvious. In operating room that is carried out with dilution mixing air distribution system, requisite airflow rate was dependent on the number of people and total contaminant emission of the people which is as for dependent of used clothing system. Because of this the most important factor that affects the low microbe concentration of operating room is measures whose aim is to minimize contaminant emissions and for this the clothing system plays most important role. There is a correlation between microbe concentration and occurrence of infections in operating room and nosocomial infections annual expenditure for health-care system rise up to even 100 million euros in Finland. Because of this it is very important that hospitals take this matter under discussion and start to focus on informing and providing proper clothing for operating room staff.</p> | | | |
| Subject headings, (keywords) Operating theatre, modular, ventilation, mixing, clothing, cleanroom | | | |
| Pages 88 (19) | Language Finnish | URN | |
| Remarks, notes on appendices | | | |
| Tutor Jukka Räisä | | Bachelor's thesis assigned by Granlund Kuopio Oy | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 1 |
| 2 | SISÄILMASTON PERIAATTEET JA TARKOITUS..... | 2 |
| 2.1 | Ilman ominaisuuksia | 2 |
| 2.2 | Sisäilmastoon vaikuttavat tekijät | 4 |
| 2.3 | Yleistä ilmanvaihdosta | 10 |
| 2.4 | Ilmanvaihdon tehokkuudesta ja hyötysuhteesta | 13 |
| 2.5 | Yleisimmät sisäilmastoa koskevat viranomaismääräykset ja ohjeet Suomessa | 15 |
| 3 | LEIKKAUSSALI OSANA SAIRAALAYMPÄRISTÖÄ | 18 |
| 3.1 | Sairaalaympäristö ja leikkaussali | 20 |
| 3.2 | Katsaus standardeihin..... | 23 |
| 3.2.1 | SFS-EN ISO 14644-1:2000..... | 23 |
| 3.2.2 | CEN/TC 156/WG 18..... | 26 |
| 4 | VAATIMUKSET LEIKKAUSSALIN SISÄILMASTOLLE JA ILMANVAIHDOLLE..... | 28 |
| 4.1 | Lämpöolot..... | 28 |
| 4.2 | Kosteus | 29 |
| 4.3 | Suodatus | 30 |
| 4.4 | Epäpuhtauslähteet ja niiden hallinta..... | 32 |
| 4.4.1 | Vaatetus..... | 32 |
| 4.4.2 | Leikkausprosessi..... | 34 |
| 4.4.3 | Ovien käyttö | 34 |
| 4.5 | Ilmavirtojen hallinta ja ilmanjako | 36 |
| 4.5.1 | Ilmanvaihtokerroin..... | 37 |
| 4.5.2 | Poisto- ja kierrätysilma | 38 |
| 4.5.3 | Sekoittava ilmanjako | 38 |
| 4.5.4 | Laminaarinen ilmanjako..... | 41 |
| 4.5.5 | Yhdistelmäilmanjako | 42 |
| 4.5.6 | Leikkaussalin tiiveys..... | 43 |
| 4.5.7 | Tutkimuksia sekoittavan ja laminaarisen ilmanjakotavan eroista ... | 44 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | CEN/TC 156/WG 18 -STANDARDIN MÄÄRITTÄMÄT YLEISET SUORITUSKYKYKRITEERIT ILMASTOINNILLE JA VAATIMUKSET SISÄILMASTOLLE SEKÄ SUUNNITTELULLE | 46 |
| 5.1 | Yleiset suorituskriteerit..... | 46 |
| 5.2 | Yleiset vaatimukset sisäilmastolle | 48 |
| 5.3 | Ilman virtaus- ja painesuhteet leikkausosastoilla..... | 49 |
| 5.4 | Suunnittelukonseptit ilmanjaolle | 50 |
| 5.5 | Ilmastointijärjestelmän rakenteesta..... | 53 |
| 6 | MODULAARISEN LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHTORATKAISUN SUUNNITTELU JA TULOKSET..... | 58 |
| 6.1 | Modulaarisia leikkaussaliratkaisuja maailmalla | 58 |
| 6.2 | High-Tech sairaalan leikkaussalihanke | 60 |
| 6.3 | Tavoite..... | 62 |
| 6.4 | Suunnittelu- ja mallinnusmenetelmät..... | 62 |
| 6.4.1 | Suunnittelumenetelmät ja suunnittelun eteneminen | 62 |
| 6.4.2 | Mallinnusmenetelmät..... | 63 |
| 6.5 | Modulaarisen leikkaussalin rakenne ja koko..... | 63 |
| 6.6 | Ilmavirtojen valinta ja ilmanjakotapa..... | 64 |
| 6.6.1 | Painesuhteet..... | 65 |
| 6.6.2 | Epäpuhtauslähteet | 66 |
| 6.6.3 | Lämpökuormat..... | 67 |
| 6.6.4 | Ilmanvaihtokerroin ja toipumisaika | 70 |
| 6.7 | Laitteisto, sijoitus ja mitoitus..... | 73 |
| 6.7.1 | Kiertoilma- ja make-up -kone | 73 |
| 6.7.2 | Kanavisto ja laitteet | 75 |
| 6.7.3 | Päätelaitteet | 76 |
| 6.8 | Ilmanvaihdon äänitaso..... | 77 |
| 6.9 | CFD-simulointi | 79 |
| 6.9.1 | Tuloilman päätelaitteet..... | 81 |
| 6.9.2 | Leikkaussalin ilman nopeus- ja lämpötilajakauma..... | 81 |
| 7 | YHTEENVETO..... | 82 |
| 7.1 | Vaatetus ja ilmavirta..... | 83 |
| 7.2 | Modulaarinen leikkaussali..... | 84 |
| 7.3 | Jatkokehitys | 85 |

LIITTEET

- 1 RakMk osan D2 määrittämät hoitolaitosten ilmanvaihdon ohjearvot ja sairaalan ilmanvaihdon ohjeellisia suunnitteluarvoja
- 2 CEN/TC 156/WG 18 -standardin mukaiset suorituskykykriteerit leikkaussalille
- 3 CEN/TC 156/WG 18 -standardin mukainen leikkaussalin sisäilman tila-alue
- 4 High risk -operaatiossa leikkaussalin operational -tilan vähimmäisilmavirrat sekä at rest -tilan toipumisajat
- 5 Normal risk -operaatiossa leikkaussalin operational -tilan vähimmäisilmavirrat sekä at rest -tilan toipumisajat
- 6 High risk -operaatiossa leikkaussalin kokonaisilmavirta henkilömäärän funktiona riippuen vaatetuksesta
- 7 Normal risk -operaatiossa leikkaussalin kokonaisilmavirta henkilömäärän funktiona riippuen vaatetuksesta
- 8 Modulaarinen leikkaussali yläkulmaperspektiivistä
- 9 Modulaarinen leikkaussali sisäperspektiivistä
- 10 Modulaarisen leikkaussalin yksinkertaistettu pohjapiirustus
- 11 Modulaarisen leikkaussalin make up -ilman ilmavirtasäädin
- 12 Modulaarisen leikkaussalin tuloilman päätelaitteiden säätöpelti
- 13 Modulaarisen leikkaussalin tuloilman päätelaite
- 14 Modulaarisen leikkaussalin poistoilman päätelaitteet
- 15 DHN -pätelaitteiden suutinasennot, nopeusjakauma ja heittokuvio 97 dm³/s ilmavirralla
- 16 Leikkaussalin heittokuvio- ja ilman nopeusjakauma 0,5 m/s ylittävillä alueilla
- 17 Leikkaussalin ilman lämpötila- ja nopeusjakauma leikkauspöydän alueella

1 JOHDANTO

Kehittyneiden teollisuusmaiden suurin infektiio-ongelma on sairaalainfektiot ja näin ollen sairaaloiden yksi keskeisimpiä laatukriteereitä on infektioiden ilmaantuvuus, koska tämä vaikuttaa suoraan potilaiden turvallisuuteen ja hoidon tarpeeseen. Investointeja sairaalainfektioiden ehkäisyyn pidetäänkin yhtenä kannattavimmista ehkäisevän terveydenhuollon toimista. Ilmanvaihto on yksi tärkeä tekijä sairaalainfektioiden minimoinnissa.

Modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtoratkaisujen kehittäminen on osa suurempaa osin TEKES:n rahoittamaa hanketta, jossa on mukana useita eri osaamisalueiden ammattilaisia. Suomessa ei ole koskaan aikaisemmin lähdetty kehittämään ja rakentamaan modulaarista leikkaussalia, vaikka muualla maailmassa ajatusta modulaarisuudesta on viety jo melko pitkälle. Tämän takia tällaiselle tutkimus- ja kehitysprojektille on Suomessa kiinnostusta paitsi laite- ja järjestelmävalmistajien keskuudessa niin myös eri sairaaloille.

Suomessa ei ole toistaiseksi ollut standardia sairaalailmanvaihdesta. Nyt ollaan kuitenkin laatimassa eurooppalaista CEN-standardia, johon tulee määräykset leikkaussalin ilmanvaihdon ja sisäilmaston vaatimuksista. Standardityöryhmän työ on edennyt hyvin ja aikaiseksi on saatu jo luonnos tulevasta standardista, josta tässä vaiheessa jo löytyy määräykset tärkeimmistä leikkaussalin sisäilmastoa koskevista vaatimuksista. Modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtoratkaisujen kehittämiseen liittyvässä tutkimuksessa on saatu käyttöön tulevan CEN-standardin luonnos, koska tämän tutkimuksen teettävän yrityksen, Granlund Kuopio Oy:n toimitusjohtaja Jukka Vasara toimii yhtenä Suomen edustajana CEN-standardityöryhmässä.

CEN-standardi määrittää leikkaussalin ilmanvaihdon mitoittavaksi tekijäksi leikkaussalin tasapainotilan CFU-pitoisuuden. Näin ollen tutkimuksessa tulee esille leikkaussalin CFU-lähteiden emission minimoinnin tärkeys ja sen merkittävä vaikutus suoraan tarvittavan ilmavirran määrään sekoittavalla ilmanjakotavalla. Tuore vuonna 2013 julkaistu ja tässä tutkimuksessa esille tuleva ruotsalaistutkimus on kehittänyt laskentamallin, jolla leikkaussalin tarvittava ilmamäärä voidaan määrittää sekoittavalla ilmanjaolla toteutettuun saliin epäpuhtauslähteiden summavoimakkuuden ja halutun tasapainotilan CFU-pitoisuuden perusteella. Esille tulee myös tutkimustietoa laminaa-

risen ja sekoittavan ilmanjakotavan eroista ja siitä, kuinka sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutetun leikkaussalin CFU-pitoisuus laskentamallin mukaan käyttäytyy, kun epäpuhtauslähteiden minimointiin kiinnitetään erityistä huomiota.

2 SISÄILMASTON PERIAATTEET JA TARKOITUS

Tässä luvussa selvitetään ilman oleelliset ominaisuudet sekä selvitetään tekijöitä, jotka vaikuttavat sisäilmastoon huonetiloissa ja siihen kuinka sisäilmasto vaikuttaa tiloissa oleskeleviin ihmisiin. Lisäksi luvussa perehdytään yleisimpiin rakennusten ilmanvaihtoa koskeviin viranomais määräyksiin ja ohjeisiin Suomessa.

2.1 Ilman ominaisuuksia

Ilma koostuu useiden eri kaasujen seoksesta. Kuivan ilman tilavuudesta normaalissa ilmanpaineessa on typpeä n.78 % ja happea n. 21 %. Jäljelle jäävä prosentti koostuu argonista, hiilidioksidista, neonista, heliumista, metaanista, kryptonista ja vedystä. /1./ Ilman oleellisia ominaisuuksia on sen tiheyden muuttuminen ja kosteuden sitomiskyky lämpötilasta ja kokonaispaineesta riippuvana. Ilman tiheyden muutos normaalissa ilman kokonaispaineessa on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Ilman tiheys eri lämpötiloissa ja normaalissa ilman kokonaispaineessa 101,3 kPa /2/

| Lämpötila [°C] | Tiheys [kg/m ³] |
|----------------|-----------------------------|
| -20 | 1,40 |
| -10 | 1,34 |
| 0 | 1,29 |
| +10 | 1,24 |
| +20 | 1,20 |
| +30 | 1,16 |

Kosteuden sitomiskyky ilmalla on riippuvainen ilman lämpötilasta niin, että mitä lämpimämpää ilma on, sitä enemmän se kykenee sitomaan kosteutta /3/. Tiheyden muutos tulee huomioda suunniteltaessa ilmastointilaitoksia, joissa ilmapvirta on suuri ja ilmamäärän tulee olla juuri oikea.

Ilman kosteutta kuvataan kahdella eri suureella, jotka ovat

| | |
|----|--|
| x | Absoluuttinen kosteussisältö [g/kg _{k.i.}] |
| RH | Suhteellinen kosteus [%] |

Absoluuttisen kosteuden suure x kuvaa veden määrän grammoina yhtä kuivaa ilmaki-
loa kohti. Suhteellisen kosteuden suure RH kuvaa ilman sisältämän kosteuspitoisuu-
den prosentteina suhteessa siihen kosteussisältöön, jonka ilma tarkastelulämpötilassa
voi maksimissaan sisältää ilman, että saavutetaan kastepiste, jolloin kosteuden kon-
densoitumista kylläisestä höyrystä nesteeksi tapahtuu. /3./ Näin ollen sama absoluutti-
nen kosteus eri lämpötiloilla tarkoittaa erisuuria suhteellisen kosteuden pitoisuuksia
/4/. Kastepisteessä eli suhteellisen kosteuden ollessa 100 %, veden haihtumisen ja
tiivistymisen välillä vallitsee kyllästystila, jolloin haihtumista ja tiivistymistä tapahtuu
yhtä paljon ja vesihöyryn osuus ilmassa säilyy vakiona. /5; 6./

Suhteellinen kosteus voidaan selvittää myös vesihöyryn osapaineen ja samassa tarkas-
telulämpötilassa olevan kylläisen vesihöyryn paineen suhteesta. Vesihöyryn osapaine
on osa ilman kokonaispainetta. Ilman kokonaispaineen muodostaa ilmassa olevien eri
kaasujen yhteispaine eli kuivan ilman muodostama osapaine sekä vesihöyryn muodos-
tama osapaine. Normaali ilman kokonaispaine on 101325 Pa, josta pieni osa on vesi-
höyryn osapainetta. /3./

Ilman kosteussisältö vaikuttaa myös oleellisesti ilman kykyyn sitoa lämpöä, koska
veden ominaislämpökapasiteetti (~4,19 kJ/kg°C) on huomattavasti suurempi kuin il-
malla (~1,006 kJ/kg°C). Ominaislämpökapasiteetti vedellä vaihtelee hieman eri läm-
pötiloissa, mutta ilman ominaislämpökapasiteetin muutos lämpötila-alueella, jossa
yleensä ilmanvaihdossa toimitaan, on niin pieni, että on tarkoituksenmukaista käyttää
laskennassa yhtä keskimääräistä ominaislämpökapasiteettia ilmalle normaalissa ilman
kokonaispaineessa. /7./ Ilmalla on aina tietty absoluuttisesta kosteussisällöstä, suhteel-
lisesta kosteudesta ja lämpötilasta riippuva ominaislämpösisältö eli ominaisentalpia.
/8./

| | |
|-------|---|
| h_i | kuivan ilman ominaisentalpia [kJ/kg _{k.i.}] |
|-------|---|

Kuivan ilman ominaisentalpia on energiamäärä, joka on sitoutunut yhteen kiloon kuivaa ilmaa. Myös ilmaan sitoutuneella vesihöyryllä on ominaisentalpia ja näin ollen ilmamassan entalpia muodostuu kuivan ilman ominaisentalpian eli vapaan lämpöenergian ja kuivan ilman massan tulon sekä vesihöyryn ominaisentalpian eli latentin lämpöenergian ja vesihöyryn massan tulon summasta. /8./

Vesihöyryn ja kuivan ilman yhteinen ominaisentalpia eli kostean ilman ominaisentalpia saadaan laskettua kaavalla 1. /8./

$$h = 1,006t + x(2501 + 1,85t) \quad (1)$$

jossa

| | |
|---|---|
| h | kostean ilman ominaisentalpia [kJ/kg] |
| t | kostean ilman lämpötila [°C] |
| x | ilman absoluuttinen kosteussisältö [kg/kg k.i.] |

Kaavassa 1. lukuarvo 1,006 on ilman ominaislämpökapasiteetti. Lukuarvo 2501 on veden ominaislatenttilämpö 0 °C:ssa ja lukuarvo 1,85 on vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti. /8./

2.2 Sisäilmastoon vaikuttavat tekijät

Päättöarvokseen hyvän sisäilmaston luomisella on tilojen käyttöarvokseen mukaan vähentää sairauksia ja niihin liittyviä oireita, parantaa työtehoa sekä lisätä viihtyvyyttä. Sisäilmaston huonetilassa muodostaa erilaisten fysikaalisten ja kemiallisten vaikutusten luoma olosuhdekokonaisuus. Ilmastoinnilla ja sen osana ilmanvaihdon on merkittävin vaikutus hyvän ja tilojen käyttöarvokseen mukaisten vaatimusten täyttävän sisäilmaston luomiseen. Ilmastoinnin ja ilmanvaihdon määritelmät ovat seuraavat. /8./

| | |
|-------------|---|
| Ilmastointi | "Ilman käsittelyä ilmastointikoneessa lämmittämällä, jäähdyttämällä, kostuttamalla, kuivattamalla tai puhdistamalla sekä käsitellyn ilman johtamista huonetiloihin." /8./ Ilman ominaisuuksien muuttamista ilmankäsittelyprosessien avulla. |
| Ilmanvaihto | "tapahtuma, jossa tilaan tulee ja sieltä poistuu ilmaa. Ilmanvaihdon tarkoituksen on ylläpitää tilassa sopivaa ilmanlaatua". Ilman siirtämistä huonetilaan ja poistamista sieltä hallitusti. |

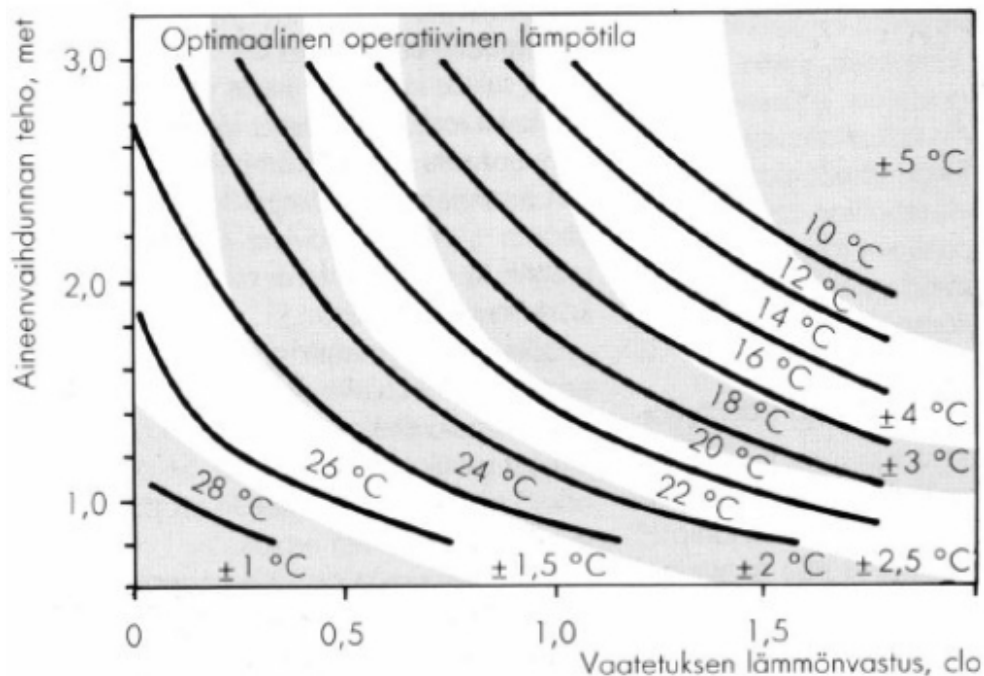
Ilmastoinnin näkökulmasta tarkasteltuna keskeisimmät sisäilmastoon vaikuttavat fyysiset ja kemialliset tekijät ovat. /8; 9./

- lämpöolosuhteet
- ilman laatu
- ääniolosuhteet
- valaistusolosuhteet

Näistä merkittävin tekijä on lämpöolosuhteet. Liian korkeat lämpötilat huonetiloissa aiheuttavat fyysisen ja henkisen suorituskyvyn laskua sekä aiheuttavat muita terveydellisiä haittoja. Näitä haittoja ovat pahimmillaan sydänkohtaukset etenkin iäkkäämällä ihmisillä ja lämpöhalvaukset. Liian alhaiset lämpötilat puolestaan lisäävät riskiä vedon tunteeseen ja aiheuttavat kankeutta lihaksistoon. Keho hyödyntää lämpötapainon ylläpitämiseen ja lämmön siirtämiseen konvektiota ja säteilyä. Se, kuinka paljon lämmöstä siirtyy konvektiona, riippuu ilman lämpötilasta ja ilman nopeudesta huoneen oleskeluvyöhykkeellä. Säteilynä siirtyvän lämmön määrään vaikuttaa huonetilan pintojen pinta-aloilla painotettu keskilämpötila eli säteilylämpötila. Ihmisen aistimaa säteilyn ja konvektion yhteisvaikutuksesta syntyvää lämpötilaa kutsutaan operatiiviseksi lämpötilaksi, joka on keskimäärin säteilylämpötilan ja ilman lämpötilan keskiarvo. /8; 9./

Huonetilan käyttäjien aktiivisuudesta riippuva aineenvaihdunnan teho sekä käyttäjien vaatetuksen lämmönvastus vaikuttavat oleellisesti optimaaliseen operatiiviseen lämpötilaan, joka huoneessa tulisi vallita. Tämä tulee esille kuvasta 1 suhteellisen kosteuden

ollessa 50 %. Talvisin suhteellisen kosteuden alittaessa 50 % nousee optimilämpötilan arvo $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ jokaista suhteellisen kosteuden 10 % -yksikön suuruista alenemaa kohden. Aineenvaihdunnan tehoa levossa kuvataan yksiköllä met, joka SI-järjestelmän mukaisesti ilmoitettuna on 1 met (metabolic rate) = $58,2\text{ W/m}^2$. 1,75 m pitkän 75 kg:n painoisen ihmisen ihon pinta-ala on n. $1,8\text{ m}^2$. Kirjallisuus antaa esimerkiksi kevyttä seisomatyötä tekeväälle henkilölle lämpötehoarvon, joka on 1,6 met. SI-järjestelmän mukaisena lämpötehona tämä tarkoittaa $1,6\text{ met} * 58,2\text{ W/m}^2 * 1,8\text{ m}^2 = 169\text{ W}$. Vaate-
tuksen lämmönvastusta kuvataan yksiköllä clo, joka SI- järjestelmän mukaisesti ilmoitettuna on $1\text{ clo} = 0,155\text{ m}^2\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Kirjallisuudessa on eritelty lämmönvastukset erilaisille vaatteille ja vaatetuskokonaisuuksille. /8; 20, s. 57./



KUVA 1. Optimaalinen operatiivinen lämpötila aineenvaihdunnan tehon ja vaatetuksen lämmönvastuksen funktiona suhteellisen kosteuden ollessa 50 % /11/

Tilaan sopivalla ja tarkoituksenmukaisella ilmastoinnilla voidaan merkittävästi vaikuttaa tilan lämpöoloihin. Mitoituksessa huomioitavia tekijöitä ovat ilman lämpötila, tilassa olevien pintojen lämpötilat sekä pinnoista säteilevä lämpö, lämpötilaerot ja -vaihtelut, ilman liike ja ilman kosteus. Ilman kosteus vaikuttaa suuresti paitsi lämpöoloihin niin myös ilman laatuun ja puhtauteen. /8./

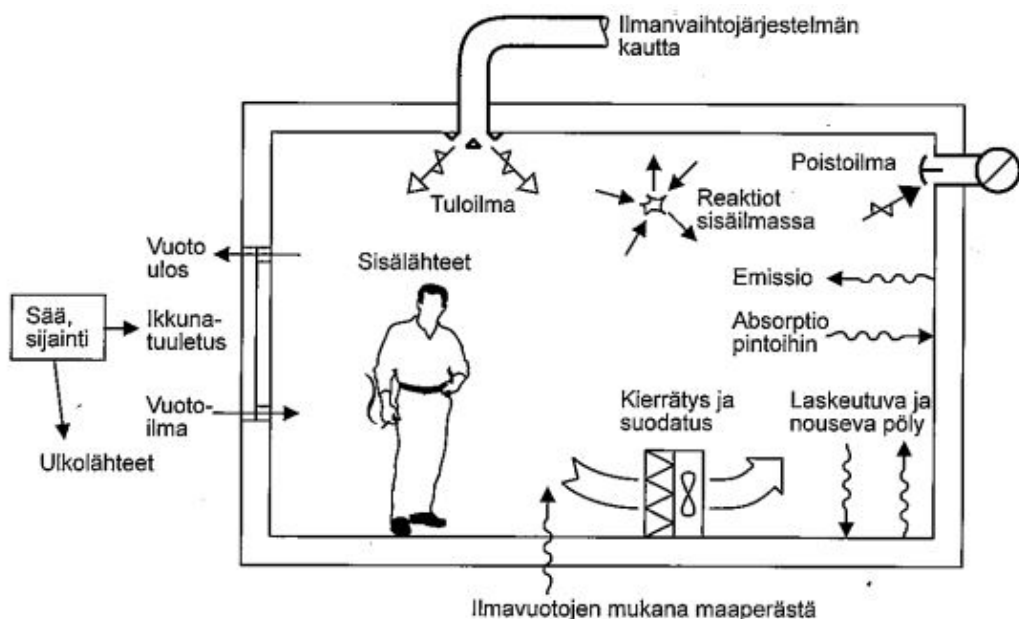
Toinen merkittävä tekijä sisäilmaston kannalta on sisäilman laatu ja puhtaus. Huonetilan käyttötarkoitus määrittää vaatimukset sisäilman laadulle ja puhtaudelle /8/. Sisäilman on oltava riittävän puhdasta ja täyttää tilakohtaiset puhtausvaatimukset. Vaati-

muksia määrittäviä tekijöitä voivat olla rakenteelliset, ihmislähtöiset eli terveydellisyys- ja viihtyisyystekijät tai tilassa tapahtuvien työprosessien asettamat vaatimukset. Lähtökohtaisesti kuitenkin niin, että terveydelliset vaatimukset ovat ensisijainen mitoittava tekijä huonetilan käyttötarkoituksen mukaiselle ilmastoinnille, kun kyseessä on ihmislähtöinen suunnittelu. Tiloissa tapahtuvilla työprosesseilla voi myös olla tiukkojakin vaatimuksia ilman puhtaudelle ja kosteudelle. Tästä hyvä esimerkki on leikkaussalit, joissa ilmassa olevien hiukkasmaisten epäpuhtauksien ja ilman kosteuden hallintaan on kiinnitettävä erityistä huomiota. /8./

Tilojen epäpuhtaudet voivat olla lähtöisin useasta eri lähteestä, kuten rakennusperäisistä lähteistä (rakennusmateriaalit ja sisustus), ulkoilmasta, ilmanvaihtolaitteista, tilassa tehtävien kiinteiden toimenpiteiden tuotoksena ja ihmisestä itsestään. /10; 12./

Tilassa, jossa kiinteiden toimenpiteiden aiheuttamat epäpuhtauslähteet eivät ole poistettavissa, on epäpuhtauksien hallinta toteutettava asianmukaisella ilmastoinnilla. Tässä tärkeimpään osaan nousevat ilmanvaihto ja -suodatus sekä tarvittaessa ilman kostutus. Kokonaistaloudellisuuden kannalta olisi kuitenkin aina pyrittävä minimoimaan tai poistamaan epäpuhtauslähteet huonetilasta esimerkiksi eristämällä päästölähde. Jos tämä ei ole täysin mahdollista, tulisi huonetilan epäpuhtaudet laimentaa suurempaan ilmamäärään tai poistaa päästölähteen epäpuhtaudet paikallispoistolla. /10; 12./

Kuvassa 2 on esitetty sisäilman laatuun ja puhtauteen vaikuttavia tekijöitä. /10, s. 21/.



KUVA 2. Sisäilman laatuun ja puhtauteen vaikuttavia tekijöitä /10, s. 21/

Ihmisestä lähtöisin olevista epäpuhtauksista merkittävä on hiilidioksidi, jota vapautuu uloshengitysilmaasta, mutta uloshengitysilmaasta vapautuu huoneilmaan myös paljon muita epäpuhtauksia, kuten mikrobeja ja nestepartikkeleita. Ihmisen iholta irtoaa huoneilmaan myös erilaisia mikrobeja ja hiukkasia. /12, s. 3./

Merkittäviä ilmastoinnilla hallittavia sisäilman epäpuhtauksia ovat /8./

- Orgaaniset hiilivedyt (VOC = volatile organic compounds)
- Hiilidioksidi (CO₂)
- Radon
- Orgaaniset yhdisteet
- Hiukkasmaiset epäpuhtaudet
- Allergeenit
- Biologiset epäpuhtaudet (Bioaerosolit)
- Epäorgaaniset kaasut

Ääni- ja valaistusolosuhteet vaikuttavat myös koettuun sisäilmastoon. Ilmastoinnin näkökulmasta tarkasteltuna valaistus aiheuttaa tuottamansa lämmön takia konvektiovirtauksia, jotka täytyy ottaa huomioon ilmastoinnin ja ilmanvaihdon suunnittelussa. Lisäksi valaisimet voivat ilmavirran tiellä ollessaan muuttaa ilmanvaihdon päätelaitteiden heittokuvioita ei halutuiksi, joten myös tämä tulee suunnittelussa huomioida. /8./

Oikeat ääniolosuhteet huonetilaan saadaan luotua oikeanlaisella akustisella suunnittelulla sekä toteutuksella. Tavoitteena on luoda oleskeluvyöhykkeelle tilaan sopiva akustinen ympäristö ja huolehtia siitä, että äänenpainetaso ei nouse liian suureksi. Tällöin on tunnettava akustiset ominaisuudet eri äänilähteistä, äänen etenemisreiteistä sekä tilan akustiikasta. Ilmastoinnissa äänilähteitä ovat ilmanvaihdon puhaltimet ja ilman virtaus kanaviston eri osissa sekä ilmanvaihdon päätelaitteet. /13./

Puhaltimen ääni muodostuu puhaltimen moottorista ja sen resonoinnista sekä ilmavirran paineen vaihtelusta puhaltimessa. Puhaltimen resonointi siirtyy lopulta kanavistoon ja tilan rakenteisiin, josta aiheutuu ääntä. Paineen vaihtelut puhaltimessa aiheuttavat ääntä, jonka taajuus on riippuvainen kierrosnopeudesta ja puhaltimen siipien lukumäärästä. Ilman virtauksesta johtuva kanavistoa pitkin siirtyvä virtausääni aiheu-

tuu ilman nopeuden muutoksista ja turbulentsisuudesta kanaviston eri osissa, kuten koon ja muodon muutoskohdissa, säätöpelleissä, venttiileissä, haaroissa, mutkissa sekä mahdollisissa vuotokohdissa, joissa ilman nopeudet voivat nousta hyvin suuriksi. /13./

Ääni myös vaimenee ilmanvaihtolaitteistoissa. Erilaisia rakenteita ja runkoja pitkin kulkeva runkoääni vaimenee etäisyyden kasvaessa äänilähteeseen, koska etäisyyden kasvu on suoraan verrannollinen äänitehon pienenemiseen. Kanaviston ilmassa kulkeva ilmaääni vaimenee äänenvaimentimien, pääte- ja huonevaimennuksen, äänitehon hajaantumisen ja kanavan poikkipinnan muutosten seurauksena. /13./

Myös suunnan ja poikkipinnan muutokset kanavistossa voivat vaimentaa ääntä, mikäli muodon tai suunnan muutos ei aiheuta merkittävää turbulenssia ja ilman nopeus pysyy riittävän pienenä. Tällöin rakenneosan vaimentava vaikutus jää ääntä voimistavaa vaikutusta suuremmaksi. Haaroissa tapahtuva äänitehon vaimentumisessa eli haara- vaimentumisessa niin ilmavirta kuin äänitehokin jakautuu haarautuvien kanavien pinta-alojen suhteessa. Ilmanvaihdon päätelaitteissa tapahtuu päätevaimentumista, joka koostuu päätelaitteen vaimennuksesta ja pääteheijastuksesta. Pääteheijastuksessa osa äänitehosta heijastuu takaisin kanavaan ja siihen vaikuttaa kanavan pinta-ala, päätelaitteen sijainti tilassa ja äänen taajuus. /13./

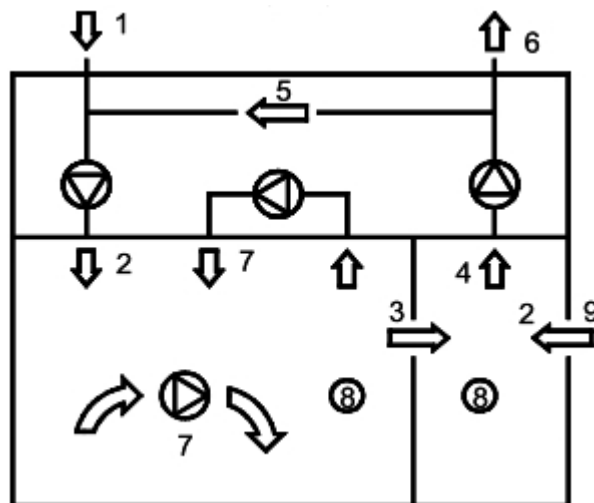
Äänen tullessa huonetilaan alkaa se absorboitua tilassa oleviin ääntä absorboiviin pintoihin ja esineisiin. Tätä kutsutaan huonevaimennukseksi, ja sen suuruus on riippuvainen huoneen kokonaisabsorptioalasta. Äänen vaimentimien päätarkoitus on absorboida äänilähteessä syntynyt ääniteho ja näin vaimentaa ääntä. Ilman äänen vaimentimien ääniteho kuitenkin lopulta absorboituu johonkin pintaan ja vapauttaa energiansa lämpönä. /13./

Suunnittelussa tulee alusta alkaen ottaa huomioon tilan äänitekniset vaatimukset, koska päätarkoitus on luoda tarkoituksenmukainen sisäilmasto huonetilaan. Ilmanvaihdon kannalta tärkeä tavoiteltava asia on tasapainoinen kanavisto eli runko- ja haarakanavien välinen paine-ero olisi mahdollisimman pieni. Tällainen mahdollisimman symmetriseksi rakennettu tasapainoinen kanavisto pienentää säädön eli painehäviöiden tasoituksen tarvetta ja näin vähentää äänen syntymistä. /13./

Toinen ilmanvaihdon kannalta tärkeä asia on tavoitella mahdollisimman alhaista painetasoa kanavistoon. Tässä rajoittavana tekijänä on usein tilanvaraus, koska alhainen painetaso vaatii väljemmän kanavan eli suuremman tilanvarauksen. Kanavistoon kuitenkin aina tulee säätölaitteita ja toimiakseen luotettavasti säätölaitteet tarvitsevat tietyn kanavapainetason. /13./

2.3 Yleistä ilmanvaihdosta

Tarkoituksena ilmanvaihdolla on korvata huonetilassa oleva vanha likainen ilma uudella puhtaalla ilmalla ja näin poistaa epäpuhtauslähteiden emissioista syntyvät epäpuhtaudet huonetilasta tai tilan käyttötarkoituksen mukaan laimentaa niitä riittävästi oleskeluvyöhykkeellä /8, s.153/. Ilmanvaihtojärjestelmässä ilmaa liikkuu kanavistoissa ja huonetiloissa eri reittejä pitkin, ja tämän takia on tarkoituksenmukaista eritellä nämä ilmavirrat, jotka ilmenevät kuvasta 3.



KUVA 3. Ilmanvaihtojärjestelmän ilmavirrat /14/

Kuvan 2 ilmavirtojen nimitykset ovat /14/

| | | | |
|---|--------------|---|------------------------|
| 1 | ulkoilma | 6 | jäteilma |
| 2 | tuloilma | 7 | kierrätysilma |
| 3 | siirtoilma | 8 | sisäilma |
| 4 | poistoilma | 9 | ulkoilma (korvausilma) |
| 5 | palautusilma | | |

Hyvä ilmanvaihto vaatii myös hyvän ja huolellisesti suunnitellun ilmanjaon. Ilman jaosta huolehtivat oikein sijoitetut tulo- ja poistoilmalaitteet, jotka luovat huonetilaan käyttötarkoituksen mukaisen ilman virtauksen. Huonosti suunnitellulla ilmanjaolla voidaan pilata koko ilmastointilaitoksen toiminta, vaikka laitos muuten olisi hyvin suunniteltu ja rakennettu. /8, s.153./

Ilmanjakotavat voidaan yleisesti jaotella kolmeen eri lajiin toimintaperiaatteen mukaan. Nämä ovat /8/

- sekoittava ilmanjako
- laminaariseen "mäntä"-virtaukseen perustuva ilmanjako
- syrjäyttävään virtaukseen perustuva ilmanjako

Sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutetussa ilmanjaossa tuloilma tuodaan huoneeseen tuloilman päätelaitteen kautta suhteellisen suurella nopeudella. Ilmasuihku kulkee yleensä katon rajassa törmäten vastakkaiseen seinään tai muuhun esteeseen, jossa sen nopeus huomattavasti pienenee ja virtaussuunta muuttuu kohti oleskeluvyöhykettä. Tuloilman päätelaitteen valmistaja ilmoittaa yleensä päätelaitteen heittopituuden eri ilmavirroille, joka tarkoittaa ilmavirran suoraa etäisyyttä päätelaitteesta pisteeseen, jossa ilman nopeus on $\leq 0,2$ m/s. Ilmasuihku imeytyy coanda -ilmiön vaikutuksesta katon rajaan tuloilman päätelaitteen ollessa maksimissaan 0,3 m päässä katosta. Saapuessaan oleskeluvyöhykkeelle ilman nopeuden tulee olla riittävän suuri, jotta lämmönlähteistä johtuvat konvektiovirtaukset eivät estä tuloilmavirran saapumista oleskeluvyöhykkeelle, mutta toisaalta virtausnopeus ei saa olla liian suuri, koska tällöin vedon tunteen riski oleskeluvyöhykkeellä kasvaa. Tulo- ja poistoilmalaitteet tulee sijoittaa niin, ettei ns. oikosulkuvirtausta pääse tapahtumaan eli tuloilman virtausta suoraan poistoilmalaitteeseen sekoittumatta ensin huoneilmaan. Sekoittavassa ilmanjaossa poistoilman tila on yleensä sama kuin sisäilman. /8, s. 153-154; 9./

Täydellisessä laminaarisessa ilmanjaossa ilma tuodaan huoneeseen ja poistetaan huoneesta suurta pinta-alaa ja ilmavirtaa käyttäen. Ilman virtausnopeuden tulee olla veto-riskin takia suhteellisen pieni, mutta kuitenkin riittävän suuri, jotta epäpuhtaudet ja konvektiovirtaukset saadaan kulkemaan katosta kohti lattiaa tai seinästä seinään. /8, s.154; 9./ Tuloilmalaitteena voi toimia esimerkiksi alakatossa oleva huonetilan kokoinen kammio, josta tuloilma johdetaan tasaisena vertikaalisena "mäntänä" kohti lattiaa

työntäen edellään huonetilassa syntyneet epäpuhtaudet konvektiiviset lämpökuormat. Tällöin lattiarakenteessa tulee olla poistoilmalaitteena toimiva huonetilan kokoinen kammio, jota kautta poistoilma johdetaan ulos huoneesta. Ilmanjako voidaan toteuttaa myös vastakkaisille seinille asennettavilla tulo- ja poistoilmakammioilla eli horisontaalisena virtauksena. /8, s.154; 9./

Laminaarisen ilmanjaon periaatetta käytetään yleensä silloin, kun tilassa on pistemäisiä paljon epäpuhtauksia tuottavia epäpuhtauslähteitä, halutaan tarkka lämpöolojen säätö ja huonetilan epäpuhtauspitoisuudet mahdollisimman pieneksi. Tällöin tuloilma on usein myös tehokkaasti suodatettua ja puhdasta. Suuren tilaan johdetun ja sieltä poistetun ilmamäärän takia ilman vaihtuvuus eli ilmanvaihtokerroin n (1/h) huonetilassa on myös suuri. Laminaarisessa ilmanjaossa halutun oleskeluvyöhykkeen alueen sisäilman tila on miltei sama kuin tuloilman, ja näin ollen poistoilma on likaisempaa. /8, s.154; 9./

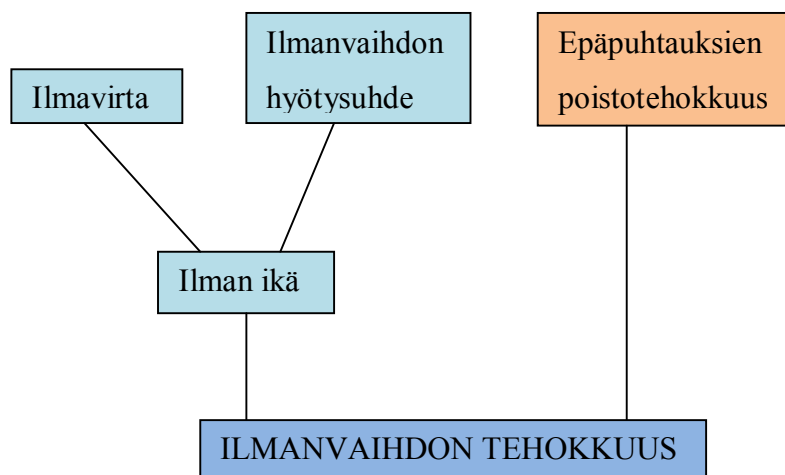
Syrjäyttävän ilmanjaon periaatteena on tuoda tuloilma tilaan suurten päätelaitteiden kautta pienellä nopeudella. Päätelaitteita kutsutaankin usein piennopeuslaitteiksi. Tällä ilmanjakotavalla tuloilman tulee olla hieman alilämpöistä. Alilämpöinen puhdas ilma jää oleskeluvyöhykkeelle ja syrjäyttää likaisen lämpimämmän ilman ylemmäs, pois oleskeluvyöhykkeeltä, jolla tarkoitus on luoda vain oleskeluvyöhykkeelle hyvät olosuhteet. Tämä johtuu ilman lämpötiloista riippuvasta tiheyserosta, jolloin ilman tiheys lämmitessään pienenee ja siitä tulee kevyempää. Näin ollen oleskeluvyöhykkeen ulkopuolella ilman epäpuhtauspitoisuudet ja lämpötila voivat nousta suuriksikin. Veto-riski tällä ilmanjakotavalla on suuri, koska ihminen reagoi alilämpöisen ilman liikkeisiin paljon herkemmin, ja siksi on tärkeää sijoittaa päätelaitteet tilaan oikein ja huolehtia oikeasta ulospuhallusnopeudesta. Syrjäyttävää ilmanjakoa käytetään eniten korkeissa tiloissa, joissa on paljon päästölähteitä. Syrjäyttävässä ilmanjaossa oleskeluvyöhykkeen sisäilman tila on oleskeluvyöhykkeen alaosassa miltei sama tuloilman kanssa ja yläosassa hieman likaisempaa, mutta silti hyvälaatuinen ja näin ollen poistoilma on huomattavasti likaisempaa. /8, s.154; 9./

Sekoittavassa ilmanjaossa pyritään sekoittamaan koko huoneessa oleva ilmamäärä ja näin olosuhteet ovat miltei samat huoneen joka osassa. Laminaarisessa ilmanjaossa olosuhteet huoneessa ovat kauttaaltaan hyvät. Laminaarista ilmanjakoa voidaan hyödyntää myös paikallisemmin johonkin tiettyyn kohteeseen, jossa tarvitaan erittäin hy-

viä olosuhteita. Tällöin huoneen muissa osissa ilmanvaihto voi olla sekoittava. Hyvällä suunnittelulla näitä ilmanjakotapoja voidaan hyödyntää yhdessä. /8, s.153 - 154; 9./

2.4 Ilmanvaihdon tehokkuudesta ja hyötysuhteesta

Ilmanvaihdon tehokkuus huonetilassa riippuu ilman iästä ja epäpuhtauksien poistotehokkuudesta. Ilman ikä kuvaa ilman korvautumisnopeutta huoneen tarkastelupisteessä, ja se puolestaan riippuu ulko- tai tuloilmavirrasta, joka huonetilaan joko pinta-alatai henkilömääräperusteisesti tuodaan sekä ilmanvaihdon hyötysuhteesta. Kuvassa 4 on havainnollistettu tekijät, jotka vaikuttavat ilmanvaihdon tehokkuuteen.



KUVA 4. Ilmanvaihdon tehokkuuteen vaikuttavat tekijät /8/

Ilman ikä on siis aika, joka ilmalla kuluu kulkiessaan tuloilman päätelaitteesta tarkastelupisteeseen. Ilma ei kuitenkaan liiku suoraviivaisesti ja vain yhtä reittiä pitkin ja tämän takia ilmalle on laskettava keski-ikä huonetilan tarkastelupisteessä. Ilman keski-ikä on puolet ilman vaihtumisnopeudesta eli nimellisaikavakiosta ja pienimpiä nämä ovat laminaarisessa mäntävirtauksessa samalla nimellisilmavirralla /8, s. 321; 9./

Hyötysuhde ilmanvaihdolle voidaan määrittää ilman laminaarisen mäntävirtauksen vaihtumisnopeuden eli lyhimmän mahdollisen vaihtumisnopeuden ja todellisen ilman vaihtumisnopeuden eli kaksinkertaisen ilman keski-ikä osamäärästä. Tämä tulee ilmi kaavasta 2. /8, s. 322; 9./

$$\epsilon_a = \frac{\tau_n}{2 < \tau >} 100\% \quad (2)$$

jossa

| | |
|--------------|------------------------------------|
| ϵ_a | ilmanvaihdon hyötysuhde [%] |
| τ_n | ilmanvaihdon nimellisaikavakio [h] |
| $< \tau >$ | ilman keski-ikä huoneessa [h] |

Ilmanvaihdon nimellisaikavakio voidaan puolestaan määrittää huoneen tilavuuden ja ilman tilavuusvirran osamäärästä tai huoneen nimellisilmanvaihtokertoimen käänteisluvusta. /8, s.321./ Tämä tulee ilmi kaavasta 3.

$$\tau_n = \frac{Q}{V} = \frac{1}{n} \quad (3)$$

jossa

| | |
|----------|---|
| τ_n | ilmanvaihdon nimellisaikavakio [h] |
| V | huoneen tilavuus [m ³] |
| Q | ilman tilavuusvirta [m ³ /h] |
| n | ilmanvaihtokerroin [1/h] |

Ilmanvaihdon hyötysuhteena ilman laminaarisella mäntävirtauksella ja ilman sekoittavalla virtauksella, jossa sekoittuminen on täydellistä, voidaan pitää seuraavia.

/8, s.322./

| | |
|----------------------------------|-----------------------|
| Laminaarinen mäntävirtaus | $\epsilon_a = 100 \%$ |
| Täydellisesti sekoittava virtaus | $\epsilon_a = 50 \%$ |

Ilmanvaihdon hyötysuhteeseen vaikuttaa myös ilmanvaihdon tulo- ja poistoilmalaitteiden sijoitus ja tuloilman lämpötila /10, s.137/.

Toinen ilmanvaihdon tehokkuuden määrittämiseen tarvittava tekijä ilman iän lisäksi on epäpuhtauksien poistotehokkuus. Pistemäisestä epäpuhtauslähteestä epäpuhtaudet eivät jakaudu huoneeseen tasaisesti vaan muodostavat epäpuhtauskentän, joka eroaa tuloilman muodostamasta ilmavirtauksesta. Kun kyseessä on jokin tietty epäpuhtaus-

lähde, käytetään ilmanvaihdon mitoittavana kriteerinä usein epäpuhtauksien poistotehokkuutta. /8, s.323./

Epäpuhtauksien poistotehokkuus voidaan määrittää poistokanavan epäpuhtauspitoisuuden ja oleskeluvyöhykkeen epäpuhtauspitoisuuden osamäärästä kaavan 4 mukaan. /8, s.323./

$$\epsilon_c = \frac{C_e}{C_o} \quad (4)$$

jossa

| | |
|--------------|--|
| ϵ_c | epäpuhtauksien poistotehokkuus [0...∞] |
| C_e | poistoilman epäpuhtauspitoisuus [määrä/m ³] |
| C_o | oleskeluvyöhykkeen ilman epäpuhtauspitoisuus [määrä/m ³] |

Teoreettisesti tarkasteltuna täydellisessä sekoittumisessa poistotehokkuuden arvoksi tulee 1, ja kun epäpuhtaudet saadaan poistettua täydellisesti paikallispoistolla, poistotehokkuuden arvoksi tulee ääretön. Käytännössä suoraan teoreettiseen tilanteeseen ei kuitenkaan päästä, vaan epäpuhtauksien poistotehokkuuteen vaikuttaa myös ilmanjakotapa, ja usein epäpuhtauslähteitä on useampi kuin yksi, joilla sijainti, muoto, lämpötila ja epäpuhtausvirta ovat erilaisia. Hyvällä ilmanjaon suunnittelulla ja toteutuksella voidaan epäpuhtauksien poistotehokkuus saada kuitenkin hyvin suureksi.

2.5 Yleisimmät sisäilmastoa koskevat viranomaismääräykset ja ohjeet Suomessa

Suomessa yleiset määräykset rakennusten sisäilmastolle ja ilmanvaihdolle asettaa rakennusmääräyskokoelman osa D2 2012, joka astui voimaan 1.7.2012. D2:n määräykset ja ohjeet koskevat pääasiassa uudisrakennusten sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa, mutta joiltakin osin sitä voidaan soveltaa myös korjausrakentamiseen. /14./

D2:n lisäksi ilmanvaihdon suunnittelulle ja ominaisuuksille on rakennusmääräyskokoelmassa muitakin noudatettavia määräyksiä ja ohjeita, jotka ilmenevät taulukosta 2.

TAULUKKO 2. RakMK D2 ohella rakennusten ilmanvaihdon suunnittelussa ja toteutuksessa noudatettavat viranomaismääräykset Suomessa /15/

| | | |
|----------|------|---|
| RakMK E1 | 2011 | Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet. |
| RakMK E7 | 2004 | Ilmanvaihtolaitosten paloturvallisuus, ohjeet. |
| RakMK C1 | 1998 | Ääneneristys ja meluntorjunta rakennuksissa. Määräykset ja ohjeet. |
| RakMK D3 | 2012 | Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet. |
| RakMK D4 | 1978 | LVI-piirrosmerkit, ohjeet. |
| RakMK D5 | 2012 | Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystarpeen laskenta, ohjeet. |

Hyvin merkittävä ohje hyvän sisäilmaston ja sen suunnittelun kannalta on sisäilmastoluokitus 2008. Kuten D2, sisäilmastoluokitus 2008 on tarkoitettu pääasiassa uudisrakentamiseen, mutta soveltuvien osien sitäkin voidaan hyödyntää korjausrakentamisessa. Luokitus on tarkoitettu täydentämään rakennusmääräyksiä antamalla sisäilmastolle suunnittelu- ja tavoitearvot kumoamatta kuitenkaan rakennusmääräyksiä tai niihin liittyviä tulkintoja miltei osin, koska kyseessä on ohje eikä määräys. /16./

Luokituksen määrittämät sisäilmaston laatuluokat S1...S3 määrittävät sisäilmaston laatutason seuraavasti:

S1 Yksilöllinen sisäilmasto

- Ilman laatu tilassa on erittäin hyvä
- tiloissa tai rakenteissa ei ole ilmanlaatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä
- lämpöolot viihtyisät, ei vetoa tai ylikuumuutta
- lämpöolot yksilöllisesti hallittavissa

- hyvät ja tilan käyttötarkoituksen mukaiset ääni- ja yksilöllisesti säädettävissä olevat valaistusolosuhteet

S2 Hyvä sisäilmasto

- ilman laatu tilassa hyvä eikä tilassa häiritseviä hajuja
- tiloissa tai rakenteissa ei ole ilmanlaatua heikentäviä vaurioita tai epäpuhtauslähteitä
- lämpöolot hyvät, vetoa ei yleensä esiinny, mutta ylikylmyä voi esiintyä kesäpäivinä
- ääni- ja valaistusolosuhteet hyvät ja tilan käyttötarkoituksen mukaiset

S3 Tyydyttävä sisäilmasto

- tilan sisäilmasto täyttää rakennusmääräysten vähimmäisvaatimukset

Sisäilmastoluokitus määrittää puhtausluokat myös rakennustöille ja ilmanvaihtojärjestelmille (P1, P2) sekä rakennusmateriaaleille ja ilmanvaihtotuotteille (M1, M2). P1-puhtausluokkaa tulee noudattaa aina, kun tavoitellaan S1- ja S2- luokan sisäilmastoa tai parempaa ja tällöin tulee myös käyttää M1- luokan rakennusmateriaaleja ja ilmanvaihtotuotteita. P2- luokkaa tulee puolestaan noudattaa, kun pyritään S3- luokan sisäilmastoon. /16./

Ilmanvaihdossa tuotteiden puhtausluokituksen (M1, M2) tarkoitus on minimoida tai poistaa ilmanvaihtotuotteista johtuva uuden järjestelmän läpi virtaavan tuloilman kontaminoituminen (mikrobit, kuidut, hiukkaset ja hajut). Käytännössä ilmanvaihtotuotteet joko ovat puhtausluokiteltuja (M1) tai eivät ole (M2). Ilmanvaihtojärjestelmien suodattimet, jotka ovat luokiteltuja, ovat aina M1- puhtausluokkaa. Suodattimien välinen jaottelu tapahtuu hiukkaserotusasteen perusteella. /16./

Haasteita S1- ja S2-luokan sisäilmaston suunnitteluun ja rakentamiseen luo Euroopan unionin ilmasto- ja energiapolitiikan sitoumus kasvihuonepäästöjen vähentämisestä 20 %:lla ja uusiutuvien energianlähteiden loppukulutuksen käyttöosuuden nostaminen 20 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Suomen osuus tässä on kuitenkin uusiutuvien energianlähteiden loppukulutuksen käyttöosuuden osalta vielä tiukempi 38 %, koska jo vuonna 2005 tämä osuus Suomella oli 28,5 %. /17./

S1- ja S2-luokan sisäilmasto vaatii suurempia ilmavirtoja kuin viranomaisten vähimmäisvaatimukset, joten tämä lisää myös huomattavasti energiankulutusta. Näin ollen uusien energiantuotantomuotojen kehittäminen ilmastoinnin ja ilmanvaihdon energianlähteeksi on tärkeää. /17./

3 LEIKKAUSSALI OSANA SAIRAALAYMPÄRISTÖÄ

Suomessa ei tällä hetkellä ole viranomaismääräyksiä tai standardia leikkaussalien ilmanvaihdolle ja sen suunnittelulle. Suomen rakennusmääräyskokoelman osan D2 liitteen 1 taulukosta 7. löytyy huomautuksella #E, että "Erikoistilojen, kuten leikkaussalien, toimenpidehuoneiden, röntgentilojen, välinehuoltotilojen, potilaiden pesuun käytettävien tilojen jne. ilmanvaihto suunnitellaan tapauskohtaisesti." Taulukko löytyy liitteestä 1.

Joitakin suunnitteluohjeita on Suomessa kuitenkin julkaistu, kuten Jouko Ryynäsen vuonna 2007 julkaisema teos "Sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeita", mikä käsittelee ohjearvoja myös leikkaussalien ilmanvaihdolle. Taulukko näistä vaatimuksista löytyy liitteestä 1. Lisäksi mm. Ruotsissa on tehty laajamittaista tutkimusta leikkaussalien sisäilmastoon liittyen. Näitä tutkimustuloksia on julkaistu Chalmersin teknisen yliopiston julkaisussa "Practical Safety Ventilation in Operating Rooms - an Introduction". Lisäksi leikkaussalien ilmanvaihtoa koskevia kansallisia standardeja Euroopassa on Saksassa, Itävallassa, Englannissa, Ranskassa ja sekä lähiaikoina myös Italiassa valmistuu leikkaussalien ilmanvaihtoa koskeva standardi. Vuonna 2012 Ruotsissa valmistui tekninen ohje SIS-TS39:2012, josta vuonna 2013 julkaistiin englanninkielinen versio. Tämä SIS:n ohje käsittelee leikkaussalin mikrobiologista puhtautta, ilmassa leviävien kontaminaatioiden syntymisen estämistä. /18; 23, s. 47./

Vuonna 2008 perustettiin eurooppalainen työryhmä, jonka tarkoituksena oli luoda tekninen ohje eri Euroopan maiden sairaalailmanvaihtoa koskevista standardeista ja ohjeista. Tämän teknisen ohjeen sisältöä hyödyntäen päätettiin lähteä kehittämään EN-standardia koskien sairaalailmanvaihtoa. Alkuvaiheessa standardityöryhmään tuli mukaan edustajia mm. Saksasta, Itävallasta, Sveitsistä, Hollannista ja Englannista. Myöhemmin mukaan tulivat myös Suomi ja Ruotsi. /18; 19, s.17; 37./

Vuonna 2010 työryhmä päätti, että ohjeen sisältöä käytetään vain tarvittaessa, mutta muuten työryhmän työ aloitetaan uudelleen alusta tavoitteena uusi eurooppalainen standardi tai tekninen ohje. Standardin ensimmäinen luonnos alkoi vuonna 2012 pidesymposiumissa Varsovan kokouksessa olla valmis ja standardin yleisestä rakenteesta päästiin sopuun. Lupaavalta näyttävästä tilanteesta huolimatta valmistelutyöryhmän työ kuitenkin keskeytyi helmikuussa 2013 ja työryhmän puheenjohtaja vaihtui. /18; 19, s.18./

Teknisen komitean toimesta jäsenmaiden halukkuutta prosessin jatkamiselle kuitenkin alettiin selvittää työn keskeytymisen jälkeen ja uuden puheenjohtajan johdolla työryhmän työ käynnistettiin nopeasti uudelleen ja se on edennyt hyvin. Suomesta työryhmän työhön osallistuvat Granlund Oy, Halton Oy ja Airmodus Oy. Edelleen työryhmän päätavoitteena on saada luotua standardi tai vähintään tekninen ohje, joka koskee kaikkia terveydenhuollon tilojen ilmanvaihtoa, mutta käytännössä painopiste on kriittisten tilojen ilmanvaihdolla ja näitä kriittisiä tiloja ovat mm. leikkaussalit. /18; 19, s. 18./

Tällä hetkellä vielä luonnosvaiheessa oleva standardi CEN/TC156/WG 18 jakaantuu käytännössä kolmeen osa-alueeseen. /18; 19, s. 18./

- Osa 1. Yleiset määrittelyt leikkausosastojen ja -salien sekä niihin liittyvien instrumenttien valmistelutilojen ilmanvaihdolle
- Osa 2. Vaatimukset ilmanvaihdon osille ja laitteille
- Osa 3. Leikkaussalien ilmanvaihto

Standardiluonnoksen osaa 3 tullaan vielä täydentämään ainakin sairaalan eristystilojen osalta. /18; 19, s. 18./

Leikkaussaleissa niin sanotulla turvailmanvaihdolla tarkoitetaan ihmisten turvallisuuden sekä tiloissa käytettävien laitteiden turvallisuuden ja puhtauden näkökulmasta tarkasteltua ilman liikkeen vuorovaikutusta keskenään sekä epäpuhtauksien dispersiota ja sen hallintaa näissä tiloissa. Sairaalaympäristössä on erittäin paljon erilaisia mikro-organismeja eli mikrobeja, joista osa on antibiooteille immuuneja. Leikkaussalin sisäilmassa oleva bakteereja kantavien hiukkasten lukumäärä on katsottu olevan hyvä indikaattori infektioalttiin potilaan infektioriskille leikkauksen aikana. /21, s. 11; 23, s. 3./

Näin ollen on erittäin tärkeää pyrkiä pitämään näiden hiukkasten pitoisuus leikkaussalin ilmassa mahdollisimman pienenä etenkin ortopedisissä leikkauksissa, koska tällöin biomateriaalista valmistettu ihmisvartaloon tuotu vieras esine nostaa infektioriskin suurimmilleen. Muita vastaavan infektioriskin omaavia leikkauksia ovat neurokirurgiset, sydänkirurgiset ja tietyt mikrokirurgiset leikkaukset /21, s.11; 23, s. 3./

3.1 Sairaalaympäristö ja leikkaussali

Leikkaussalien ilmanvaihdossa erittäin suureen merkitykseen nousevat puhdistilatekniikka ja sen hallinta, koska hygienialle asetetut vaatimukset ovat paljon normaalia tilaa suuremmat. Sairalahygienialla yleensä tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden tavoitteena on tartuntojen ehkäisy sairaan- ja terveydenhoidossa. Sairaalainfektioilla ja niiden torjunnalla on sairaaloissa erittäin suuri merkitys, koska ne ovat tärkein potilasturvallisuuteen vaikuttava tekijä ja tätä kautta myös merkittävä taloudellinen rasite terveydenhuollolle. Keskeisiä käsitteitä sairaalahygieniassa ovat /20, s.7-8; 21, s. 3/:

| | |
|----------------------|---|
| Mikrobi | Elävä ja lisääntymiskykyinen hiukkanen, joka kykenee aiheuttamaan infektion. Yleisimpiä mikrobeja leikkaussaleissa ovat bakteerit ja virukset, joiden koot ovat Bakteeri 0,5...5,0 µm Virus 0,01...0,2 µm |
| CFU | Pesäkkeen muodostava yksikkö. Hiukkanen, jossa on noin neljä yhteen sitoutunutta mikrobia. Koko on keskimäärin 2...5 - 20 µm |
| Tartunta | Taudinaiheuttajan siirtyminen yksilöstä toiseen. Kaikki tartunnat eivät kuitenkaan aina aiheuta infektiota. |
| Infektio | Kun taudinaiheuttaja lisääntyy isäntäelimistössä ja aiheuttaa kudosaaurion. |
| Kontaminaatio | Mikrobien lyhytaikainen läsnäolo kudoksissa tai esimerkiksi käsissä. |

Patogeenisuus

Mikrobin taudinaiheutuskyky. Patogeeninen on tauteja aiheuttava mikrobi ja apatogeeninen tauteja aiheuttamaton mikrobi.

Yksi keskeisimpiä laatukriteereitä sairaaloille on infektioiden ilmaantuvuus, joten investoinnit tämän ehkäisyyn on katsottu olevan yksi taloudellisesti kannattavimmista ehkäisevän terveydenhuollon toimista. /20, s. 8./

Kehittyneiden teollisuusmaiden suurin infektio-ongelma tällä hetkellä on nimenomaan sairaalainfektiot ja esimerkiksi Yhdysvalloissa niitä on amerikkalaisen arvion mukaan pidetty johtavana kuolinsyynä. Akuutin somaattisen hoitojakson aikana keskimäärin 7 - 10 % potilaista saa jonkinasteisen sairaalainfektion, ja tämä aiheuttaa keskimäärin noin viikon pituisen lisähoitojakson. Tällaisia hoitojaksoja Suomessa kertyy enemmän kuin yhteenlasketut vammoista johtuvat hoitojaksot ja neljä kertaa enemmän kuin sydäninfarktin vaatimat hoitojaksot. Tällaisten suorien vaikutusten lisäksi sairaalainfektiot voivat aiheuttaa potilaalle myös myöhemmin kuntoutusta vaativan väliaikaisen tai pysyvän invaliditeetin tai jopa kuoleman. /20, s. 8./

Perustuen amerikkalaisiin laskelmiin Suomessa, sairaalainfektioiden aiheuttamat välittömät ylimääräiset kustannukset Suomessa ovat vuosittain noin 100 miljoonaa euroa. Hyvällä sairaalahygienisellä toiminnalla on mahdollisuus vähentää sairaalainfektioita noin 30 %:lla, ja tällä on suora vaikutus kuluihin. /20, s. 8./

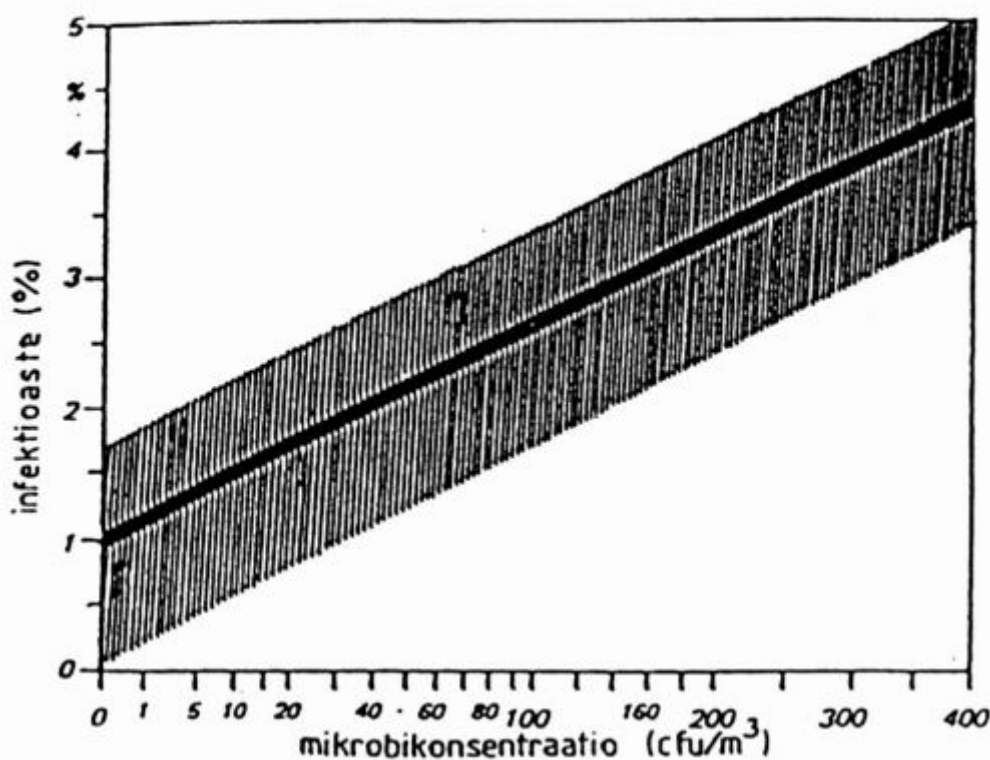
Leikkaussaleissa potilaan infektion syntymiseen vaikuttaa leikkausalueen kontaminoivien mikrobien patogeenisuuden ja niiden määrän suhde potilaan vastustuskykyyn. Virusten ja bakteerien lisäksi infektion aiheuttavia mikrobeja voivat olla hiivat sekä sienet ja prionit, joiden tarkkaa toimintaa ei vielä tunneta. /20, s. 9-15; 21, s. 3./

Leikkaussalin ilmastoinnilla ja sen osana ilmanvaihdoilla voidaan merkittävästi estää patogeenisten mikrobien ja mikrobeja kantavien hiukkasten pääsy kriittisille alueille, kuten leikkaushaavaan. Tämä sillä edellytyksellä, että suunnittelu, asennus ja huolto on toteutettu oikein. Mikrobien lukumäärää leikkaussaleissa on pystytty vähentämään erityisesti leikkaussaliin sopivalla ilmanjako ja -suodatustavalla. Merkittävin ilmassa olevien mikrobeja kantavien hiukkasten lähde leikkaussalissa on ihminen eli potilas ja henkilökunta. /21, s. 4; 22, s. 8./

Yhdestä ihmisestä erittyy noin 10 miljoonaa hiukkasta päivässä, ja näistä hiukkasista noin 10 % on pesäkkeen muodostavia yksiköitä (CFU). Tämä kuitenkin riippuu henkilön aktiivisuudesta. Leikkausinfektioita voidaan ehkäistä seuraavassa tärkeysjärjestyksessä. /21, s. 4; 22, s. 8./

1. Leikkaustekniikka
2. Antibioottien oikea käyttö
3. Ilmanvaihtotekniikka

Tutkimukset ovat osoittaneet, että mikrobipitoisuus leikkaussalissa on suoraan verrannollinen infektioasteeseen. Tutkimukset kohdistuivat yli 8000 leikkaukseen, joten tuloksia voidaan pitää tilastollisesti luotettavina. Tämä infektioasteen riippuvuus mikrobipitoisuudesta tulee esille kuvasta 5. /21, s. 6./



KUVA 5. Salin infektioaste mikrobipitoisuuden funktiona /21, s. 6/

3.2 Katsaus standardeihin

3.2.1 SFS-EN ISO 14644-1:2000

Maailmanlaajuinen kansallisten standardisoimisjärjestöjen yhteenliittymän standardin ISO 14644 osa 1 (SFS-EN ISO 14644-1) sisältää ilman puhtausluokituksen, jonka tarkoituksena on antaa puhdastilan, kuten leikkaussalin, suunnittelulle ja toteutukselle valvottu hiukkaskontaminaation taso, joka mahdollistaa kontaminaatiolle herkkien operaatioiden suorituksen salissa. Puhdastilat sairaaloissa jaotellaan yleensä erillisiin alueisiin, joilla on eri vaatimukset hiukkaspitoisuuden suhteen. Leikkaussalit voidaan myös sisäisesti jaotella eri hiukkaspitoisuustason vaativiin alueisiin. Näitä vaatimuksia kuvaa ISO-luokat 1-9, niin että ISO 1 on puhtain luokka. ISO-luokitusta käytetään myös suoraan kertomaan tilan puhtaustaso. Puhtaustasot perustuvat siis ilman hiukkaspitoisuuteen, jotka ovat kooltaan pienempiä tai suurempia kuin ISO-luokituksen määrittämä hiukkasen kokoalue, joka 0,1 - 5 µm. /24, s. 4./

Sairaalassa puhdastiloja ja puhdastiloiksi luokiteltavia tiloja ovat leikkaussalien ohella mm. sairaala-apteekit, eristys huoneet ja leikkausvälineiden huoltotilat /25, s. 23/. Puhdastilastandardi SFS-EN ISO 14644-1 antaa puhdastilalle seuraavan määritelmän.

"Puhdastila on huone, jossa ilman hiukkaspitoisuuksia valvotaan ja joka on rakennettu siten ja jota käytetään sellaisella tavalla, että hiukkasten pääsy, kerääntyminen ja säilyminen huoneen sisällä on minimoitu. Lisäksi muita asiaankuuluvia suureita, kuten lämpötilaa, kosteutta ja painetta, valvotaan tarpeen mukaan." /24, s. 6./

Tämä ISO 14644 standardin osa ei kuitenkaan karakterisoi hiukkasten fysikaalisia, kemiallisia, radiologisia vaikutuksia tai elävää luonnetta. Luokitus tapahtuu siis vain ilmassa olevien hiukkasten koon sekä pitoisuuden perusteella. Taulukossa 3 on esitetty SFS-EN ISO 14644-1:2000 -standardin ISO-luokitus hiukkasten lukumäärän ja koon perusteella.

TAULUKKO 3. Puhdastilojen ja puhtausvyöhykkeiden valitut ilman hiukkaspitoisuuden mukaiset puhtausluokat /24, s. 8/

| ISO luokitus numero (N) | Suurimmat hiukkaspitoisuusrajat (hiukkasia/m ³ ilmaa) hiukkasille, jotka ovat yhtä suuria tai suurempia kuin alla esitetyt tarkasteltavat koot | | | | | |
|--|---|---------|---------|------------|-----------|---------|
| | 0,1 µm | 0,2 µm | 0,3 µm | 0,5 µm | 1 µm | 5 µm |
| ISO luokka 1 | 10 | 2 | | | | |
| ISO luokka 2 | 100 | 24 | 10 | 4 | | |
| ISO luokka 3 | 1 000 | 237 | 102 | 35 | 8 | |
| ISO luokka 4 | 100 000 | 2 370 | 1 020 | 352 | 83 | |
| ISO luokka 5 | 1 000 000 | 23 700 | 10 200 | 3 520 | 832 | 29 |
| ISO luokka 6 | | 237 000 | 102 000 | 35 200 | 8 320 | 293 |
| ISO luokka 7 | | | | 352 000 | 83 200 | 2 930 |
| ISO luokka 8 | | | | 3 520 000 | 832 000 | 29 300 |
| ISO luokka 9 | | | | 35 200 000 | 8 320 000 | 293 000 |
| HUOM. Mittausmenetelmiin liittyvät epätarkkuudet edellyttävät, että pitoisuusarvot esitetään ainoastaan kolmen numeron tarkkuudella luokitustasoa määrittäessä | | | | | | |

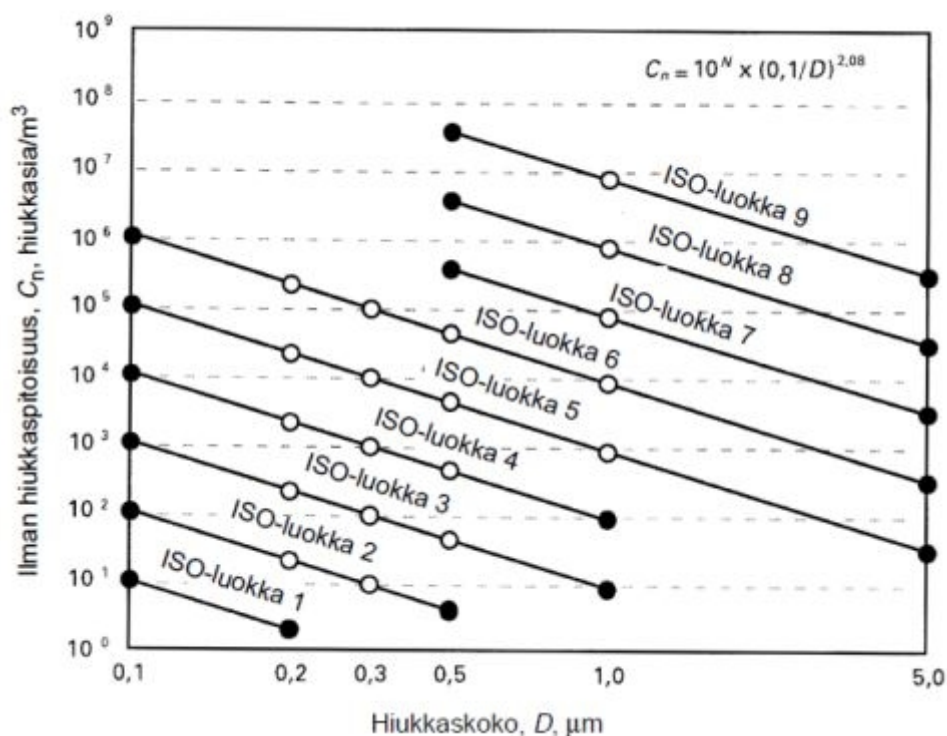
Tiedettäessä jokin tavoiteltava ISO-luokka sekä tarkasteltava hiukkaskoko, voidaan hiukkaspitoisuus C_n määrittää kaavan 5 mukaan. /24, s. 10./

$$C_n = 10^N * \left(\frac{0,1}{D}\right)^{2,08} \quad (5)$$

jossa

| | |
|-------|--|
| C_n | suurin ilmassa sallittu pitoisuus hiukkasia, jotka ovat yhtä suuria tai suurempia kuin tarkasteltavana oleva hiukkaskoko. Pyöristetään lähimpään kokonaislukuun korkeintaan kolmen merkitsevän numeron tarkkuudella. [n/m ³] |
| N | ISO-luokitusnumero. ISO-luokkien välisiä luokituslukuja voidaan määritellä 0,1 pienimpänä sallittuna lisäyksenä. |
| D | tarkasteltavana oleva hiukkaskoko [µm] |

Kuvassa 6 on esitetty graafisesti ISO-luokkien pitoisuusrajat hiukkaskoon funktiona. Kuvaa ei kuitenkaan tule käyttää pitoisuusrajojen määrittämiseen eikä graafisen esityksen luokitusviivoja tule ekstrapoloida tummien ympyrämerkkien yli. Tummat ympyrämerkit indikoivat kunkin ISO-luokan pienimmän ja suurimman mahdollisen hiukkaskoon /24, s. 14./



KUVA 6. Graafinen esitys ilman hiukkaspitoisuuksista hiukkaskoon funktiona ISO-luokittain /24, s. 14/

ISO 14644 -puhdastilastandardi pohjautuu amerikkalaiseen alun perin vuonna 1963 julkaistuun standardiin FS209, jonka päivitetty versio on vielä laajalti käytössä Amerikassa. Kuitenkin vuonna 1999 ISO 14644 -standardi virallisesti korvasi FS209 -standardin. /26, s. 1/

SFS-EN ISO 14644-1:2000 -standardi määrittelee myös puhdastiloille kolme eri olotilaa riippuen tilassa olevista ja toiminnassa olevista laitteista ja ihmisistä. /24, s. 8/

As Built

rakennusvalmis tila, jossa asennus on suoritettu valmiiksi, kaikki palvelut kytkettyinä ja toiminnassa, mutta on ilman tuotantolaitteita, materiaaleja tai läsnä olevaa henkilöstöä

At Rest

lepotila, jossa asennus on suoritettu valmiiksi, laitteet asennettuina ja toiminnassa asiakkaan ja toimittajan sopimalla tavalla, mutta ilman läsnä olevaa henkilöstöä

Operational toiminnassa oleva tila, jossa asennus toimii spesifioidulla tavalla, spesifioitu määrä henkilöitä on läsnä ja tehden työtä sovitulla tavalla

CEN/TC 156/WG 18 -standardi määrittelee myös seuraavan tilan joka sijoittuu tilan kuormituksen näkökulmasta katsottuna At Rest -tilan ja Operational -tilan väliin.

/27, s. 3./

Stand By tilanne, jossa kaikki laitteisto on toiminnassa, mutta alennetulla kapasiteetilla. Laitteet voivat olla osin suljettuina tai valmiustilassa.

3.2.2 CEN/TC 156/WG 18

Luvussa 6 käsiteltävä modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtoratkaisun suunnittelu on toteutettu niin, että se täyttää tämän standardiluonnoksen vaatimukset työn aikana tiedossa olevilta osiltaan. Standardiluonnoksen määäämät raja-arvot perustuvat suurelta osin jo olemassa oleviin EN -standardeihin. Standardin SFS-EN ISO 14644-1 ISO-luokitusta käytetään tässä standardissa kuvaamaan vaatimuksia sisäilman hiukkaspitoisuudelle at rest -tilassa tapahtuvassa toiminnassa (luku 3.2.1). /27./

Standardin mukaan tärkeimmät terveydenhuollon tilojen hygieniaan vaikuttavat ongelmat ovat /28, s. 1/:

- potilaiden, henkilökunnan ja vierailijoiden suojaaminen vahingollisilta aineilta
- mikro-organismien kasvun vähentäminen (puhdistettavuus, käytettävyyys, määrät pinnat, hiukkasten kerääntyminen)
- ilmavirtausten suunnat ja niiden hallinta (järjestelmän rakenteiden tiiviys, paine-erot)
- ilman laatu (puhtaustasot, lämpötila, kosteus, ilmamäärä)

CEN -standardin ensimmäinen osa käsittelee leikkaussalien ja niihin liittyvien huoneiden sisäilmastoa tyypillisimmästä näkökulmasta. /27, s. 2./

Yleisen tason vaatimukset ilmanvaihtojärjestelmän suunnitteluun, rakentamiseen, käyttöönottoon ja testaukseen löytyvät tämän standardin muista osista tai jo olemassa olevista standardeista. Standardissa määritellään leikkaussali eri alueisiin vaadittavan puhtaustason mukaan seuraavasti. /27, s. 2./

| | |
|-----------------------|---|
| Protected zone | Alue leikkaussalissa, joka on varattu potilaalle, operaatiota suorittavalle henkilökunnalle ja steriileille instrumenttipöydille sekä jossa kontaminaation konsentraatiota hallitaan. Alue tulee merkitä pysyvästi lattiaan. Jos merkintää ei tehdä, suojattu alue on 1,5 m leikkaussalin seinistä sisäpuolelle jäävä alue. |
| Periphery area | Suojatun alueen ulkopuolelle jäävä alue, joka rajoittuu leikkaussalin seinään ja suojatun alueen laitaan. Tällä alueella liikkuu operaation avustava henkilökunta, johon voi kuulua anestesiahoitaja ja käytettävät anestesia-laitteet. |

Leikkaussalissa tehtävät operaatiot puolestaan luokitellaan kahteen eri riskiluokkaan, joilla on vaatimukset leikkaussalin sisäilmastolle. /22, s. 11; 27, s. 2./

| | |
|------------------------------|--|
| High Risk operation | Korkean infektioriskin omaavat leikkaukset, kuten ortopediset, neurokirurgiset, sydänkirurgiset ja tietyt mikrokirurgiset leikkaukset. |
| Normal Risk operation | Muut normaalin infektioriskin omaavat leikkaukset. |

CEN-standardin toisessa osassa määritetään vaatimukset sairaanhoidollista kohdetta, kuten leikkaussalia palvelevan ilmastointijärjestelmän tekniikalle ja laitteille.

Tarkemmin CEN/TC 156/WG 18 -standardin yleisiä vaatimuksia leikkaussalin ilmastoinnille on kerrottu luvussa 5.

4 VAATIMUKSET LEIKKAUSSALIN SISÄILMASTOLLE JA ILMANVAIHDOLLE

Tässä luvussa leikkaussalin sisäilmastoa ja ilmanvaihtoa koskevia vaatimuksia tarkastellaan uuden sairaalailmanvaihtoa koskevan CEN-standardin näkökulmasta. CEN-standardi määrittää ilmanvaihdon mitoittavaksi tekijäksi tilan CFU-pitoisuuden. Koska CFU on orgaaninen hiukkanen, niitä emittoituu ilmaan pääasiassa vain ihmisistä.

Oikeanlaisen ja tarkoituksenmukaisen sisäilmaston luominen leikkaussaliin on ensiarvoisen tärkeää, koska sillä minimoidaan epäpuhtauslähteistä, kuten ihmisestä ja laitteista leikkaushaavalle aiheutuva infektioriski. Myös henkilökunnan altistuminen anestesiakaasuille halutaan minimoida poistamalla se ilmasta mahdollisimman tehokkaasti. Ilmastointijärjestelmällä tulee pystyä hallitsemaan myös sisäilman lämpö- ja kosteusoloja sekä tuloilman tulee täyttää sille asetetut puhtausvaatimukset. Myös painesuhteiden leikkaussalin ja ympäröivien tilojen välillä tulee pysyä stabiilina. /22, s. 35./

Leikkaussalin sisäilmaston muodostumiseen vaikuttaa myös merkittävästi ilmavirtojen käyttäytyminen leikkaussalissa ja siksi oikeanlaisen ilmanjakotavan valinta on tärkeää. Ilmanjakotavalla voidaan myös merkittävästi vaikuttaa energiatehokkuuteen. /22, s. 47./

Ihmisen ollessa hyvin merkittävä epäpuhtauksien lähde leikkaussalissa, sisäilman mikrobipitoisuuteen eivät vaikuta vain ilmastointitekniset ratkaisut. Pääpaino tulisi ennen tätä olla epäpuhtauslähteiden emission minimoinnissa. Tähän vaikuttaa merkittävästi henkilökunnan pukeutuminen ja vaateuksessa käytetyt materiaalit sekä aktiivisuusaste. Tutkimukset ovat osoittaneet, että leikkaustoiminnan aikana leikkaussalin ilmassa $\geq 5,0 \mu\text{m}$ hiukkasista noin 5 % on pesäkkeen muodostavia yksiköitä (CFU). /22, s. 12, 35./

4.1 Lämpöolot

Vaatimukset leikkaussalien lämpöoloille jakaantuvat salissa työskentelevän henkilökunnan erilaisten tarpeiden mukaan ja siksi kaikille sopivan huonelämpötilan luominen on haastavaa. Leikkauksen aikana leikkaussalissa on neljä erilaista ihmisryhmää,

jotka ovat kirurgit, avustava hoitohenkilökunta sekä anestesiahenkilökunta ja potilas. /20, s. 52/

Valsai-hankkeen kirjallisuuskatsauksessa viitattiin kattavaan ASHRAE:n leikkaussalitutkimukseen, jossa arvioitiin ja mitattiin lämpöviihtyisyyttä nykyaikaisissa leikkaussaleissa, jotka oli toteutettu laminaarisella ilmanjakotavalla. Tutkimuksessa lämpöviihtyisyyttä tarkasteltiin kirurgin, hoitajan, anestesia lääkäriin ja potilaan näkökulmasta. /20, s. 52/

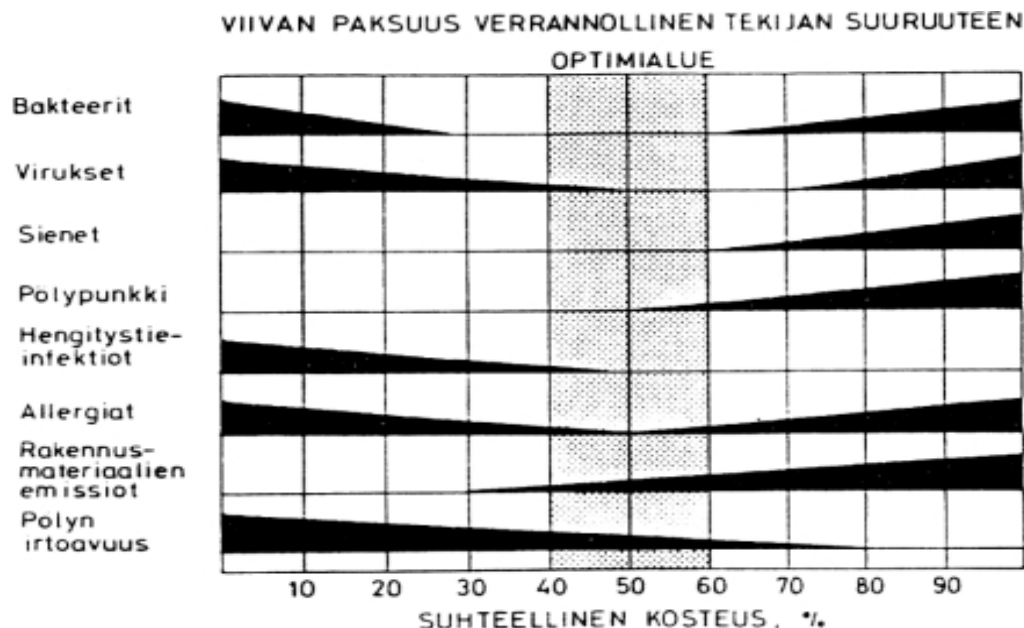
Tutkimus osoitti, että nukutettuna potilaan lämmönsäätely ei toimi ja leikkauksen aikana potilaan lämmönkehitys on niin alhainen, että hypotermian riski on olemassa. Lämmitettäviä potilasalustoja leikkauskäyttöön on olemassa, mutta niiden tehokkuutta ei ole tutkittu. Täysin yksilöllisiä lämpöoloja ei eri ihmisryhmille voida järjestää paitsi potilaan osalta. Vaatetuksella voidaan kuitenkin merkittävästi vaikuttaa lämpöviihtyvyyteen ja tämän takia vaatetuksen lämmön eristävyys tulisi olla henkilökunnalla vähintään 0,9 clo ja potilaalla 1,6 clo. Lämpötilan leikkaussalissa pitää kuitenkin olla säädettävissä salista käsin. Alhaisten lämpötilojen vaikutusta kirurgin sorminäppäryyteen ei ole tutkittu, mutta kokoonpanotyötä tekevien sorminäppäryyden on tutkimusten mukaan todettu heikkenevän lämpötilan laskiessa ja näin ollen on syytä olettaa alhainen lämpötila heikentää myös kirurgin toimintakykyä. /20, s. 52 - 53; 22, s. 13./

4.2 Kosteus

Talven pakkaskausina ilman suhteellinen kosteus saattaa laskea alle kymmeneen prosenttiin ja kesällä suhteellinen kosteus voi nousta 60 - 75 %, mutta harvoin yli, joten myös leikkaussalin ilmaan tällä on vaikutus. Sairaalaympäristöissä yleisin valituksien aihe on sisäilman kuivuus. Kosteuden noustessa liian suureksi, aistitaan se tukalana ja ahdistavana tunteena. /22, s. 20./

Liian kuiva ilma puolestaan aiheuttaa kurkun, nenän ja silmien kuivumista. Suhteellinen kosteus vaikuttaa leikkaussaleissa ilman ja pintojen mikrobipitoisuuteen, koska erityyppiset mikrobit vaativat selviytyäkseen erilaiset lämpö- ja kosteusolosuhteet. /22, s. 20./

CEN- standardin mukaan suhteellinen kosteus leikkaussalissa tulisi olla 40...60 % (luku 4.6.2). Kuvasta 8 ilmenee eri suhteellisen kosteuden arvoista aiheutuvat haitat. /22, s. 20/



KUVA 8. Suhteellisen kosteuden vaikutukset /22, s. 20/

CEN-standardin asettamalla suhteellisen kosteuden alueella voidaan kosteudesta aiheutuvien haittojen todeta olevan alhaisimmat. Leikkaussalin ilmaa tulee tarvittaessa kostuttaa höyrykostuttimella tai kuivata esimerkiksi jäähdyttämällä ennen kuin se tuodaan leikkaussaliin. CEN-standardin mukaan kostutuksessa tuloilman kosteus ei saa nousta yli 90 %. Tällä estetään vesihöyryn kondensoituminen suodattimiin ja äänen vaimentimiin ja tätä kautta estetään myös mikrobien lisääntyminen näissä komponenteissa. Liian korkeaa suhteellista kosteutta voidaan kuitenkin laskea esimerkiksi jälkilämmittämällä ilmaa kostutuksen jälkeen. /28, s. 15./

4.3 Suodatus

Standardi SFS-EN 13779:2007 luokittelee ulkoilman kolmeen eri ODA-laatuiluokkaan (outdoor air) niin, että luokassa ODA1 ilma on muutamia tilapäisiä epäpuhtauksia lukuun ottamatta puhdasta, kun taas ODA 3:ssa ilma sisältää merkittäviä pitoisuuksia kaasu- ja/tai hiukkasmaisia epäpuhtauksia. SFS-EN 13779:2007 määrittää myös vastaavasti sisäilmalle IDA-laatuiluokat (indoor air) niin, että IDA1 on korkea sisäilman laatu (High IAQ) ja IDA4 heikko sisäilman laatu (Low IAQ). Ilmansuodattimet jaetaan standardien EN 779:2002 ja EN 1822:2009 mukaan neljään eri suodatinluokkaan niiden alimman erotusasteen ja suodatustehon mukaan. /30./

Nämä ovat karkeiden suodatinten luokka G, perussuodatinten luokka M, hienosuodatinten luokka F ja erittäin korkean erotusasteen omaavat HEPA (High Efficiency Particulate Air filter) ja ULPA (Ultra Low Penetrate Air filter) suodattimet, jotka luokitellaan samaan korkean erotusasteen luokkaan H tai U riippuen, kumpi suodatin on kyseessä. Taulukoissa 4 ja 5 on esitetty eri suodatinluokkien suodattimien ominaisuudet. /30./

TAULUKKO 4. G-, M- ja F-luokan ilmansuodatinten luokittelu /30/

| Luokka | Synteettisen pölyn keskim. erotuskyky A_m (%) | Keskimääräinen erotusaste $0,4 \mu m$ hiukkasille E_m (%) | Minimi erotusaste vaatimus $0,4 \mu m$ (%) |
|---------------|---|--|--|
| G1 | $50 \leq A_m \leq 65$ | - | - |
| G2 | $65 \leq A_m \leq 65$ | - | - |
| G3 | $80 \leq A_m \leq 65$ | - | - |
| G4 | $50 \leq A_m \leq 65$ | - | - |
| M5 | 450 | $40 \leq E_m \leq 60$ | - |
| M6 | 450 | $60 \leq E_m \leq 80$ | - |
| F7 | 450 | $80 \leq E_m \leq 90$ | 35 |
| F8 | 450 | $90 \leq E_m \leq 95$ | 55 |
| F9 | 450 | $95 \leq E_m$ | 70 |

TAULUKKO 5. H- ja U-luokan ilmansuodatinten luokittelu /31/

| Luokka | Erotusaste $0,3 \mu m$ hiukkasille (%) |
|---------------|--|
| H10 | ≥ 85 |
| H11 | ≥ 90 |
| H12 | $\geq 99,5$ |
| H13 | $\geq 99,95$ |
| H14 | $\geq 99,995$ |
| U15 | $\geq 99,9995$ |
| U16 | $\geq 99,99995$ |
| U17 | $\geq 99,999995$ |

4.4 Epäpuhtauslähteet ja niiden hallinta

Koska leikkaussalin tuloilma on nykyisin HEPA-suodatettua, suurimmat epäpuhtauslähteet leikkaussalissa leikkauksen aikana ovat potilas ja hänelle suoritettava leikkauksen prosessi sekä leikkausta suorittava henkilökunta. Tärkeä asia näiden epäpuhtauslähteiden tuottamien emissioiden hallintaan sekä hiukkas- ja CFU-pitoisuuksien pitämiseen sallitulla tasolla on, että leikkaussalin painesuhde ympäröiviin tiloihin nähden on hallitusti ylipaineinen leikkauksen aikana. /25, s. 1; 23, s. 77./ Tähän tulee siis kiinnittää erityistä huomiota, ja leikkaussaliin tulisi sijoittaa visuaalinen indikaattori osoittamaan henkilökunnalle leikkaussalin painesuhteen tilan, jotta mahdollisessa vikatilanteessa asia voidaan korjata ennen leikkauksen aloittamista.

4.4.1 Vaatetus

Riippuen ihmisestä ja aktiivisuusasteesta leikkaussalissa ihmisen iholta irtoaa hiukasia huoneilmaan, joista osa voi aiheuttaa infektion. Leikkaussalivaatetuksen päätarkoitus on suodattaa ja suojella leikattavaa potilasta kontaminaatiolta. Vaatetuksen suojauskyky kuitenkin heikkenee, kun vaatteet kuluvat käytön, pesujen ja sterilointien seurauksena. Leikkaussalivaatetuksien ominaisuuksia testataan materiaalien partikkelituoton, partikkelisuodatuskyvyn, kulutuskestävyyden ja mukavuuden perusteella. /23, s. 69./

Leikkaussalivaatetuksen suodatustehokkuus on tärkeässä roolissa leikkaussalin CFU-pitoisuuden kannalta, koska valittu vaatetuskokonaisuus vaikuttaa merkittävästi ihmisistä leikkaussalin ilmaan emittoituvien hiukkasten määrään. Henkilökunnasta emittoituvista hiukkasista osa voi aiheuttaa infektion ja tämän takia vaatetuskokonaisuuden valintaa ei tule tehdä pelkästään henkilökunnan mukavuuden vaan myös potilasturvallisuuden näkökulmasta. /23, s. 77./

Leikkaussali vaatetuksia on useita erilaisia ja niiden ominaisuudet eroavat partikkelituoton, partikkelisuodatuskyvyn, kulutuskestävyyden ja mukavuuden osalta toisistaan. Tutkimukset osoittavat, että eri vaatetustyypeillä puetut ihmiset emittoivat epäpuhtauksia eri voimakkuuksilla leikkaussalin ilmaan. Epäpuhtauslähteen voimakkuus on arvo, joka kuvaa yhdestä ihmisestä ilmaan emittoituvien CFU:den määrän aikayksikköä kohti. /23, s. 80 - 88./

Se on hyvä työkalu kuvaamaan vaatetuksen suojauskykyä bakteereja kantavia hiukkasia vastaan. Epäpuhtauslähteen voimakkuutta kuvataan suureella q_s . Seuraavassa esimerkkejä eri leikkaussalivaatetuksista ja niissä käytetyistä materiaaleista sekä tutkimusten mukaisia likiarvoja eri leikkaussalivaatetuksilla puettujen ihmisten epäpuhtauslähteen voimakkuuksista. /23, s. 80 - 88./

| | |
|----------------------------------|--|
| Puhdastilaleikkausvaatetus | Puhdastilalaatuinen polyesteri 99 %, hiilikuitu 1 %. Paino 0,1 kg/m ² . $q_s = 0,7$ CFU/s |
| Kertakäyttöinen leikkausvaatetus | Polypropyleeni 100 %. Paino 0,035 kg/m ² . $q_s = 1,15$ CFU/s |
| Yleinen leikkausvaatetus | Puuvilla 50 %, polyesteri 50 %. Paino 0,16 kg/m ² . $q_s = 1,9$ CFU/s |
| Leikkausvaatetus | Polyesteri 99 %, hiilikuitu 1 %. $q_s = 2,9$ CFU/s |
| Yleinen leikkausvaatetus | Puuvilla 69 %, polyesteri 30 %, hiilikuitu 1 %. Paino 0,16 kg/m ² . Paino 0,15 kg/m ² . $q_s = 5$ CFU/s |

Ruotsissa on tehty paljon tutkimusta eri leikkaussalivaatetuksista ja niiden vaikutuksesta valittavaan leikkaussalin ilmavirtaan. Tutkimukset on suoritettu kahdessa eri sairaalassa leikkausten aikana, ja niiden tarkoituksena on ollut selvittää vaatetuksen suojauskyvyn tehokkuus. /23, s. 77./

Se kuinka tehokkaasti keho suojataan, vaikuttaa suoraan siihen kuinka paljon hiukkasia leikkaussalin ilmaan pääsee kulkeutumaan. Myös harkitulla liikehdinnällä leikkaussalissa voidaan vaikuttaa epäpuhtauksien emission voimakkuuteen. /25. s. 51./ Ilmanvaihdon kannalta tarkasteltuna tämä vaikuttaa suoraan tarvittavaan ilmamäärään tätä kautta tarvittavaan energiaan.

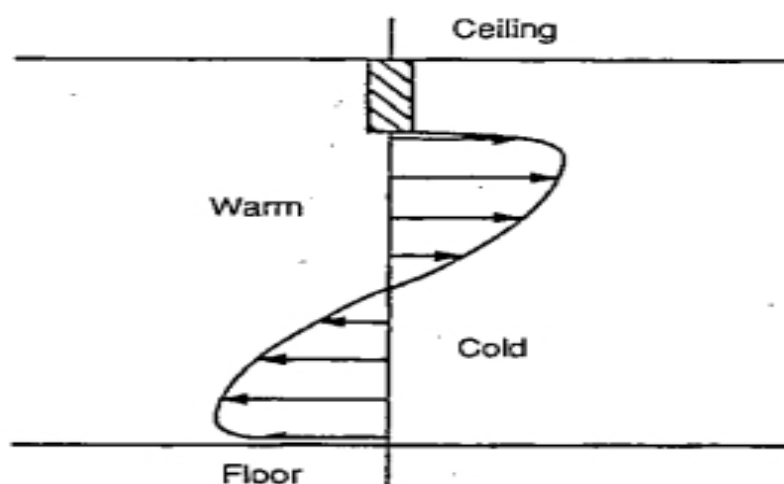
4.4.2 Leikkausprosessi

Leikkausprosessista aiheutuu myös epäpuhtauksia, joiden hallintaan tulisi kiinnittää huomiota. Erillisillä kattokeskusten yhteyteen asennettavilla kohdepoistoilla voidaan vähentää suojatulle alueelle tulevia savukaasuja, jotka aiheutuvat leikkausprosessissa suoritettavista kudoksen polttotoimenpiteistä. /32./ Infektioriskin leikkausalueen infektioriskiä voidaan todennäköisesti alentaa huomattavasti erillisellä puhtaan ilman kohdepuhalluksella leikkausalueelle /25, s. 42/. Tässä vaarana on kuitenkin leikkausalueen liiallinen kuivuminen.

Ratkaisuja erilliselle haavailmanvaihdon vaihteluun on myös esitetty. Ratkaisussa leikkaushaava ympäröidään seinämällä ja suoraan haavaan johdetaan hiilidioksidia, jonka joukkoon sekoitetaan etanolia desinfiointiaineeksi. Menetelmälle suoritettujen laboratoriokokeiden tulokset ovat olleet lupaavia, mutta virallista raportointia niistä ei ole tehty. /20, s. 75./

4.4.3 Ovien käyttö

Ovien käytöllä leikkauksen aikana on negatiivinen vaikutus leikkaussalin ilman hiukkaspitoisuuteen, koska leikkaussalin ja viereisen tilan (yleensä käytävä) CFU -pitoisuudet voivat erota suurestikin. Myös ilman lämpötilaerot tilojen välillä ja siitä aiheutuva tiheysero aiheuttaa ovien avauduttua ilman virtauksen tilasta toiseen, ja vaikka leikkaussalit ovat yleensä ylipaineistettuja, on oven kautta avautuva pinta-ala niin suuri, että paine-ero tilojen välillä tasaantuu lähes heti. Kuvassa 9 on esitetty ilmavirtauksen teoreettinen käyttäytyminen oviaukossa. /23, s. 91 - 92/



KUVA 9. Ilmavirtausten teoreettinen käyttäytyminen oviaukossa /23, s. 92/

Oven käytön vaikutus leikkauksen aikana vaikuttaa leikkaussalin CFU-pitoisuuteen. Jotta tämä voidaan selvittää, on ensin selvitettävä ilmamäärä, joka oven kautta leikkaussaliin tulee. Tämä ilmamäärä voidaan laskea kaavalla 6 /23, s. 92/,

$$Q_d = 0,65 \frac{WH^{1,5}}{3} \left(g \frac{2\Delta T}{(T_1 + T_0)} \right)^{0,5} \quad (6)$$

jossa

| | |
|------------|--|
| 0,65 | tutkimuksiin perustuva ilmapurkauksen purkautumiskerroin |
| W | oven avautuman leveys [m] |
| H | oven avautuman korkeus [m] |
| g | putoamiskiihtyvyys [m/s ²] |
| ΔT | lämpötilaero tilojen välillä [K] |
| T_0 | leikkaussalin lämpötila [K] |
| T_1 | viereisen tilan lämpötila [K] |

Oven käyttö ja aukioloaika leikkauksen aikana on pyrittävä minimoimaan. Leikkausten aikana tehtyjen tutkimusten mukaan oven ekvivalenttisinä aukioloaikoina voidaan pitää seuraavia. /23, s. 100./

| | |
|----------------|------|
| Nopea | 6 s |
| Keskimääräinen | 9 s |
| Hidas | 16 s |

Sekoittavalla ilmanjaolla toteutetun leikkaussalin CFU-pitoisuus oven käytön jälkeen tai sallittu oven aukioloaika voidaan laskea kaavalla 7 /23, s. 95/.

$$c = c_0 + \frac{Q_d * t_e * (c_c - c_0)}{V} \quad (7)$$

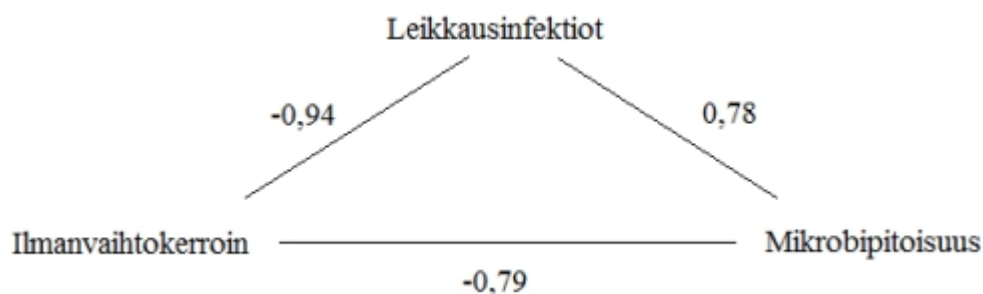
jossa

| | |
|-------|--|
| c | CFU-pitoisuus oven käytön jälkeen [CFU/m ³] |
| c_0 | nimellinen CFU-pitoisuus leikkaussalissa ennen oven aukaisua [CFU/m ³] |
| Q_d | Oven kautta leikkaussaliin tuleva ilmavirta [m ³ /s] |
| c_c | viereisen tilan CFU -pitoisuus [CFU/m ³] |
| V | leikkaussalin tilavuus [m ³] |
| t_e | oven ekvivalenttinen aukioloaika [s] |

Yleisesti ottaen potilasturvallisuuden kannalta ovien avaukset leikkauksen aikana tulisi minimoida. Jos ovien käyttö leikkauksen aikana on välttämätöntä, tulisi ovien aukioloajat pitää mahdollisimman lyhyinä eli ekvivalenttinen aukioloaika tulisi olla mahdollisimman pieni /23, s. 95/.

4.5 Ilmavirtojen hallinta ja ilmanjako

Leikkaussalien mikrobipitoisuudella, leikkaussali-infektioiden määrällä sekä ilmanvaihdon määrällä on todettu olevan tilastolliset yhteydet ja ne korreloivat keskenään kuvan 10 osoittamalla tavalla /20, s.73/.



KUVA 10. Mikrobipitoisuuden, leikkaussali-infektioiden ja ilmanvaihtokertoimen väliset korrelaatiot /22, s. 32/

Tämä tarkoittaa sitä, että todennäköisyys leikkaussali-infektioille on suurempi mikrobipitoisuuden kasvaessa korrelaatiokertoimella 0,78 ja ilmanvaihdon määrää lisäämällä mikrobipitoisuutta pystyttiin vähentämään korrelaatiokertoimella -0,79. Näin ollen ilmamäärän kasvaessa, myös ilmanvaihtokerroin kasvaa ja tämä vähensi leikkaussali-infektioiden todennäköisyyttä korrelaatiokertoimella -0,94. Ilmanvaihtokertoimen ja mikrobipitoisuuden riippuvuuteen vaikuttaa tuloilmavirran lisäksi myös suodatinten tehokkuus ja valittu ilmanjakotapa. /20, s.73; 22, s. 32 - 33./

Leikkaussaleissa käytettävät ilmanjakotavat voidaan yleisesti jakaa kahteen päätyyppiin, jotka ovat sekoittava ja laminaarinen ilmanjako. Laminaarisen ilmanjaon kohdalla voidaan nykyisin kuitenkin käytännössä puhua suunnatusta ilmanjaosta (unidirectional flow, UDF), koska virtaus harvoin on täysin laminaarinen eli pientä turbulenssia ilman virtauksessa aina esiintyy johtuen ilmavirran tiellä olevista laitteista ja ihmisten liikkeistä. Laminaarinen ilmanjako perustuu ilman mikrobien syrjäytykseen mäntävirtauksella, joka luo puhtaat olosuhteet virtausalueelle ja sekoittava ilmanjako perustuu epäpuhtauksien laimentamiseen tilassa ja siinä ilman virtaus on turbulenttista. /23, s. 12/.

4.5.1 Ilmanvaihtokerroin

Ilmanvaihtokertoimella kuvataan leikkaussalin ilmatilavuuden vaihtumisen lukumäärää aikayksikköä kohti, jonka suurena käytetään yleisesti kirjainta n ja yksikkönä 1/h. Ilmanvaihtokerroin lasketaan kaavan 3 mukaisesti jakamalla tuloilmavirta (m^3/h) leikkaussalin tilavuudella (m^3). /9./

Suomessa yleisesti käytössä olevan sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeen mukaan leikkaussalin ilmanvaihtokertoimen tulisi olla >17 1/h (liite 1), ja ohjeessa tätä perustellaan anestesiakaasujen poistotehokkuudella, mutta ohjeesta ei kuitenkaan ilmene tutkimustietoa, johon tämä perustuisi, joten pääasiallisena ilmanvaihdon mitoitusperusteena tätä ei voida pitää, vaikkakin anestesiakaasujen poistoon tulee kiinnittää ilmanvaihdossa huomiota. Anestesiakaasujen pitoisuudet ovat nykyään tehokkaammin hallinnassa laitteistojen kehityksen myötä. Ilmaan leviämistä estää merkittävästi se, että kaasu syötetään suoraan potilaan henkitorveen ja myös poistetaan poistomaskilla suoraan uloshengitysilma. Kaasuja sisäilmaan pääsee kuitenkin yleensä anestesian alkuvaiheessa ja lopussa herättelyn yhteydessä. /22, s. 38; 29, s. 15; 36./

Syitä anestesiakaasupäästöille on selvitetty valsai-hankkeen kirjallisuuskatsauksen viittaamassa tutkimuksessa, jossa havaittiin laitteiston olleen virheellisesti asennettu yli neljänneksessä tutkimuskohteista. Tämä johtui tarkistuksen puutteista ja virheellisistä tekniikoista, ja miltei puolessa laitteistoista positiivisen paineen venttiili ei toiminut oikein, jolloin tulokaasun paine kasvoi liian suureksi. /20, s.37/

Kun leikkaussalin ilmanvaihdon mitoittavina tekijöinä pidetään CFU-pitoisuutta, ihmisten emittoimaa epäpuhtauslähteen voimakkuutta sekä lämpökuormia, pinta-alaltaan n. 50 m² ja korkeudeltaan 3 m salin ilmanvaihtokerroin asettuu kuitenkin hyvin lähelle suunnitteluohjeen määrittämää ilmanvaihtokerrointa.

4.5.2 Poisto- ja kierrätysilma

Ilma poistetaan leikkaussalista yleensä ala- sekä yläosasta salia ja poistoilman pääte-laitteet sijoitetaan yleensä salin nurkkiin sijoitettaviin pystykanaviin. Salin yläosasta poistettavan ilman osuus kokonaispoistoilmasta on noin 20 - 30 %, koska anestesia-kaasujen ollessa ilman kanssa samassa lämpötilassa ovat ne ilmaa raskaampia ja näin ollen laskeutuvat salin alaosaan. /20, s.37/

Jos suurin osa leikkaussalin tulo- ja poistoilmasta on kierrätysilmaa, suurimman osan poistaminen salin alaosasta kierrätysilmakoneella ei tuo hyötyä anestesiakaasujen poiston kannalta, ellei HEPA-suodatuksen lisäksi käytetä myös kaasusuodatusta.

Jos taas salin alaosasta poistettava ilma johdettaisiinkin suoraan pois eikä käytettäisi kiertoilmana, jouduttaisiin myös suurin osa tuloilmasta tuomaan ulkoa, jolloin energi-ankulutus kasvaisi merkittävästi. Energian säästön kannalta olisi siis kannattavaa keskittyä tehokkaaseen anestesiakaasujen kohdepoistoon.

4.5.3 Sekoittava ilmanjako

Sekoittavan ilmanjaon ideaalitilanteessa leikkaussalin CFU-pitoisuus pienenee lineaarisesti tuloilmavirran kasvatuksen suhteessa. Sama lineaarinen riippuvuus CFU-pitoisuuteen pätee myös silloin kun ilmavirta pysyy vakiona, mutta epäpuhtauslähteen voimakkuus pienenee. Leikkaussalin CFU-pitoisuus kasvaa nopeasti kun epäpuhtauslähte saapuu tilaan, mutta saavutettuaan tasapainotilan ei pitoisuus enää kasva. Tasa-painotilan tilanteessa salin kokonais-CFU-pitoisuudelle pätee kaava 8. /22, s. 39; 23, s. 35./

$$c = c_{max} = \frac{S}{Q} \quad (8)$$

jossa

| | |
|---|--|
| c | kokonais- CFU -pitoisuus [CFU/m ³] |
| S | epäpuhtauslähteiden summavoimakkuus [CFU/s] |
| Q | kokonaisilmavirta [m ³ /s] |

Ihminen on yleensä ainut CFU-lähde salissa ja kun tarkastellaan epäpuhtauspitoisuutta vain CFU-pitoisuuden kannalta, voidaan epäpuhtauslähteiden summavoimakkuus laskea salissa työskentelevien ihmisten aiheuttamana yhteenlaskettuna epäpuhtausvoimakkuutena kaavalla 9. /23, s. 35./

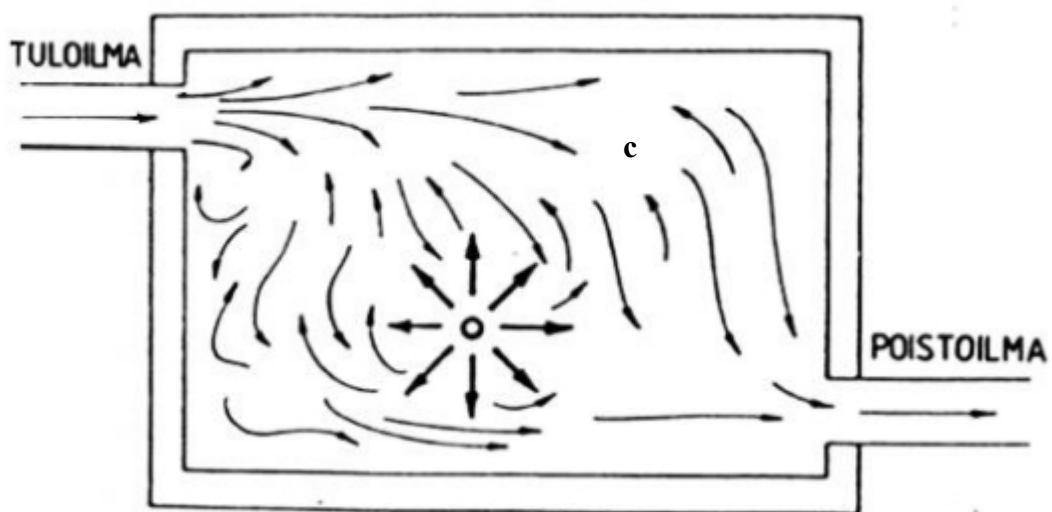
$$S = n * q_s \quad (9)$$

jossa

| | |
|----------------|--|
| S | epäpuhtauslähteiden summavoimakkuus [CFU/s] |
| n | leikkaussalissa olevien ihmisten lukumäärä [numero] |
| q _s | yhden ihmisen emittoiman epäpuhtauden voimakkuus [CFU/s] |

Kaavalla 8 voidaan myös laskea tarvittava ilmavirta, kun tiedossa on ihmisten lukumäärä ja kunkin ihmisen epäpuhtausvoimakkuus.

Kuvassa 11 on esitetty CFU-pitoisuus ideaalisen sekoituksen tilanteessa.



KUVA 11. Leikkaussalin CFU-pitoisuus ideaalisen sekoituksen tilanteessa /22, s. 39/

Operaation päätyttyä ja henkilökunnan sekä potilaan poistuttua leikkaussalista CFU-emissio pysähtyy. Ennen seuraavan operaation aloittamista CFU-pitoisuuden on annettava laskea CEN standardin mukaan ISO 14644-3 -standardia noudattaen 1:100 osaan. Aika, joka tähän kuluu, kutsutaan toipumisajaksi, ja se voidaan laskea kaavalla 10. /23, s. 36, 106./

$$t = \tau_n \ln \left(\frac{c_0}{c} \right) \quad (10)$$

jossa

| | |
|-------------|--|
| t | salin toipumisaika [min] |
| τ_n | ilmanvaihdon nimellisaikavakio [min] (kaava 3.) |
| $c_0 = S/Q$ | kokonais- CFU-pitoisuus ennen ihmisten poistumista [CFU/m ³] |
| c | tavoiteltava CFU-pitoisuus [CFU/m ³] |

Koska tavoiteltava CFU-pitoisuus on ISO 14644-3 standardin mukaisesti 0,01 kertaa lähtötilanteen pitoisuus, kaava 10 voidaan tällöin lyhentää likiarvokaavan 11 mukaiseen muotoon. /23, s. 36, 106./

$$t = \tau_n * 4,6 = \frac{V}{Q} * 4,6 = \frac{1}{n} * 4,6 \quad (11)$$

jossa

| | |
|----------|--|
| t | salin toipumisaika [min] |
| τ_n | ilmanvaihdon nimellisaikavakio [min] |
| V | leikkaussalin tilavuus [m ³] |
| Q | kokonaisilmavirta [m ³ /s] |
| n | salin ilmanvaihtokerroin [1/h] |

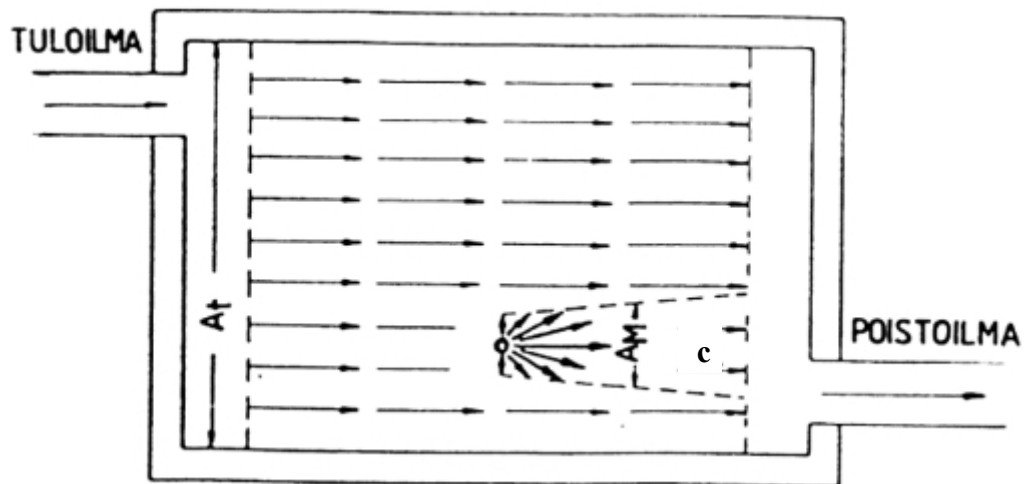
Kaavaa 11 käyttäen voidaan myös laskea tarvittava ilmavirta, kun tiedossa on leikkaussalin tilavuus ja vaatimus toipumisajalle.

Sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutettuja ratkaisuja on useita erilaisia, jotka eroavat toisistaan lähinnä siten, että mistä tilan osasta tuloilma tuodaan ja mistä poisto tapahtuu. Tavoitteena on kuitenkin saada ilmamassa mahdollisimman hyvin sekoittumaan, jotta haluttu CFU-pitoisuuden laimentuminen tapahtuu. Ilmanjako tulee kuitenkin

suunnitella niin, ettei oikosulkuvirtausta suoraan tuloilmalaitteesta poistoilmalaitteeseen pääse tapahtumaan.

4.5.4 Laminaarinen ilmanjako

Laminaarisella ilmanjaolla toteutetussa leikkaussalissa mikrobien esiintyvyys rajoittuu ainoastaan sille alueelle, joka on virtaussuunnassa hiukkasia emittoivan epäpuhtauslähteen jälkeen. Tämä tulee ilmi kuvasta 12. /22, s. 41/



KUVA 12. leikkaussalin CFU -pitoisuus ideaalisen syrjäytyksen tapauksessa /22, s. 42/

Sairaalaliiton julkaisussa "Energiansäästö ja sairaalahygienia" kerrotaan laminaarisella ilmanjaolla toteutettuun leikkaussaliin mikrobipitoisuuden laskentatavaksi kaavan 12 mukainen malli. Käytännössä tätä ei kuitenkaan voida luotettavasti soveltaa laminaarisen ilmanjakotavan mitoittamiseen ilmamäärien osalta, koska kaava käsittelee tilannetta, jossa koko salin katto toimii laminaarikattona. Todellisuudessa laminaarikatto ja suojattava alue on tätä pienempi ja näin ollen myös ilmamäärät. /22, s. 41; 37./

$$M_L = \frac{A_t}{A_M} * \frac{E}{V_t} \quad (12)$$

jossa

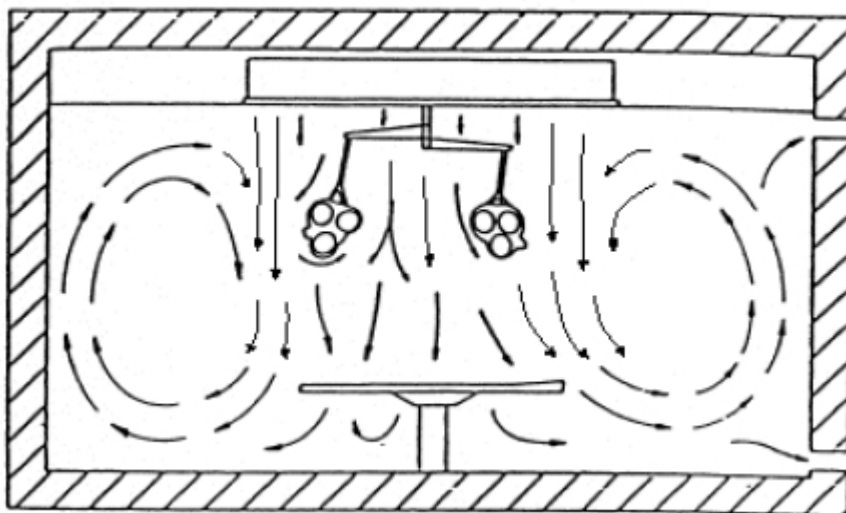
| | |
|-------|---|
| M_L | mikrobipitoisuus [CFU/m ³] |
| A_t | tilan poikkipinta-ala [m ²] |
| A_M | mikrobialueen poikkipinta-ala [m ²] |
| E | epäpuhtauslähteen voimakkuus [CFU/s] |
| V_t | kokonaistuloilmavirta [m ³ /s] |

Ilman laminaarisella suunnatulla virtauksella saadaan henkilökunnan liikkeistä aiheutuvat turbulenttiset virtaukset ja pyörteet hallitusti suunnattua pois suojeltavalta alueelta operaation aikana. /22, s. 41-42./

4.5.5 Yhdistelmäilmanjako

Yhdistelmäilmanjaossa tuloilma tuodaan yleensä leikkausalueen yläpuolelta katosta alaspäin, virtaus muuttua nopeasti olomuotonsa laminaarisesta virtauksesta turbulenttiseksi. Näin virtaus on kuitenkin selkeästi suunnattu, mutta turbulenttinen (UDF). Näin saadaan aikaiseksi pienempi CFU-pitoisuus leikkausalueelle, kuin puhtaasti sekoittavalla ilmanjaolla. Tämä voidaan kuitenkin toteuttaa täyslaminaarisesta virtausta pienemmällä ilmamäärällä. /22, s. 42./

Nykyisin ilmanjako leikkaussaleissa on toteutettu jollain tasolla yhdistetystä laminaarisesta ja sekoittavasta ilmanjaosta. Kuvassa 13 on esitetty periaate tällaisesta UDF-ilmanjaosta.



KUVA 13. Laminaarikaton kautta toteutettu UDF -ilmanjako /22, s.43/

Tällä tavoin suojatulle alueelle saadaan luotua puhtaammat olosuhteet, mutta suojatun alueen ulkopuolella pitoisuudet voivat olla korkeammat ja virtaukset ovat täysin turbulenttisia. Ilmavirran irrotessa päätelaitteesta, indusoituu sekundääri-ilmaa päätelaitteen reuna-alueilta alaspäin suunnatun ilmavirran mukaan. Sekundääri-ilman indusointumista voidaan vähentää asentamalla päätelaitteen ulkosivuille levyt. Tämä myös vähentää hieman ilmavirran turbulenttisuutta. /22, s. 42-44./

Kun puhutaan laminaarisesta ilmanjaosta leikkaussaleissa, tarkoitetaan käytännössä tällaista ratkaisua. Sairaalaliiton julkaisun mukaan ihmisistä aiheutuvan ylöspäin suuntautuvan konvektiovirtauksen nopeus on 0,5 m/s, jonka tuloilmavirran pitäisi pysyttyä kompensoimaan. /22, s. 42-44./

Yleensä tuloilmavirta tuodaan saliin alilämpöisenä ja tällöin tuloilmavirran nopeuden ei tarvitse olla näin suuri eikä käytännössä ole mahdollista tuoda niin suurta ilmavirtaa saliin, jonka lähtönopeus olisi konvektiovirtausten nopeutta suurempi. /37./

Todellisuudessa ilman lähtönopeus laminaarikatosta vaihtelee valmistajan mukaan 0,25...0,3 m/s välillä. Tätä nopeutta voidaan pitää laminaarijärjestelmään valittavan ilmavirran yhtenä mitoittavana tekijänä. /37./

4.5.6 Leikkaussalin tiiveys

Rakenteellisesti leikkaussalin tulisi olla mahdollisimman ilmatiivis, jotta painesuhteiden hallinta ei häiriintyisi eikä ympäröivien tilojen ilma pääsisi aiheuttamaan kontaminaatiota leikkaussaliin.

Veli Koskinen viittaa opinnäytetyössään ruotsalaiseen sairaalailmanvaihtoa koskevaan tekniseen ohjeeseen SIS-TS 39:2012, jossa sallittavana vuotoilmavirtana leikkaussalille pidetään 0,4 l/s, m², kun saliin tuotetaan 50 Pa ali- tai ylipaine. Tämä tiiveystaso on kuitenkin Koskisen mukaan haastava saavuttaa, joten leikkaussalin rakenteet suunnittelevalle ja toteuttavalle tahon tulee kiinnittää erityistä huomiota rakenteiden tiiveyteen. /35./

4.5.7 Tutkimuksia sekoittavan ja laminaarisen ilmanjakotavan eroista

1980-luvulla tehdyn tutkimusten perusteella laminaarisen ilmanjaon hyödyt osoittautuivat potilasturvallisuuden kannalta sekoittavaa ilmanjakotapaa suuremmaksi. Puutteita tutkimustulosten vertailukelpoisuudessa sekoittavan ja laminaarisen ilmanjakotavan välillä kuitenkin oli, koska leikkaussaleissa, joissa tutkimukset suoritettiin, vallitsi erilaiset olosuhteet. /21./

Tuoreempia tutkimuksia näiden ilmanjakotapojen eroista ja vaikutuksista leikattavan potilaan infektioiden määrään suoritettiin Saksassa vuosina 2000 - 2004. Leikkaussaleissa oli käytössä joko laminaarinen tai sekoittava ilmanjako, ja molemmilla tavoilla tuloilma oli HEPA-suodatettua. Tutkimustuloksia kertyi yhteensä 99 230 leikkauksesta ja näistä 1901 johti leikkausalueen infekioon. Suoritetut leikkaukset olivat polvi- proteesi- ja vatsanseudun leikkauksia. /33./

Tutkittaessa laminaarisen ilmanjakotavan vaikutusta leikkausalueen infektioihin lonkkaproteesileikkauksissa, todettiin laminaarisen ilmanjaon lisäävän infektioiden määrää leikkausalueella. Tähän syynä pidettiin laminaarivirtauksen aiheuttamaa liiallista leikkausalueen lämpötilan laskua sekä leikkausalueen läheisyydessä työskentelevän henkilökunnan hiukkaspäästöjä, jotka ilmavirran mukana kulkeutuivat leikkausalueelle. /33./

Tutkimuksen tulos herätti kritiikkiä, ja yhdeksi kritiikin kohteeksi otettiin laminaarikaton koko ja sen huomioimatta jättäminen. Tämän johdosta päätettiin tehdä uusi samalla tavalla toteutettu tutkimus sillä erotuksella, että laminaarikaton koko tällä kertaa huomioitaisiin. Toinen tutkimus kohdistui kahteen eri salityyppiin, joista toisessa käytettiin vähintään 3,2 m * 3,2 m kokoista laminaarikattoa ja toisessa tätä pienempää. Tutkimukset suoritettiin erilaisissa proteesitoimenpiteissä, mutta pääasiassa lonkka- ja polviproteesileikkauksissa vuodesta 2004 vuoteen 2009 välisenä aikana. /34./

Tutkimuksen tulokset olivat laminaarikaton koosta riippumatta yhtenevät ja voitiin todeta, että laminaarisella ilmanjaolla ja laminaarikaton koolla ei pystytty pienentämään infektioriskiä tutkituissa ortopedisissä leikkauksissa. /33; 34./

Veli Koskinen viittasi opinnäytetyössään vuonna 2012 julkaistuun tutkimukseen, jossa oli yhdistetty tutkimukset laminaarijärjestelmien yleisestä tehokkuudesta ja tehokkuudesta vähentää leikkausalueen infektoita lonkka- ja polviproteesitoimenpiteissä. Tutkimuksessa koottiin yhteen viimeisen kymmenen vuoden aikana aihealuetta käsitelleet tutkimukset, joita kertyi yhteensä viisi kappaletta eri maista. Tutkimukset sisälsivät yhteensä 120 000 lonkka- ja 75 000 polviproteesileikkausta. Yhdessä tutkimuksessa ei Koskisen mukaan todettu laminaarijärjestelmästä olevan hyötyä polviproteesileikkauksissa, ja yhdessä tutkimuksessa havaittiin kasvanutta infektioriskiä leikkausalueella laminaarisella ilmanjaolla toteutetussa järjestelmässä polviproteesileikkauksessa. /35./

Lonkkaproteesileikkauksissa suoritetuista tutkimuksista kolmessa havaittiin merkittävästi lisääntynyttä laminaarijärjestelmästä johtuvaa infektioriskiä ja vain yhdessä tutkimuksessa tulkittiin sillä olevan infektioriskiä alentava vaikutus. /35./

Myös Suomessa on tehty pienemmän mittaluokan tutkimuksia aihealueeseen liittyen. VTT julkaisi vuonna 2012 tutkimuksen, jossa tehtiin hiukkaspitoisuuden ja painesuhteiden mittauksia yhteensä kuudelle eri at rest -tilassa (luku 3.2.1) olevalle leikkaussalille. Saleista kaksi oli toteutettu sekoittavalla ilmanjaolla ja neljä laminaarisella ilmanjaolla. /25./

Operational-tilassa (luku 3.2.1) hiukkaspitoisuuden mittauksia suoritettiin yhdessä sekoittavalla ilmanjaolla ja kahdessa laminaarisella ilmanjaolla toteutetussa salissa. Tutkimuksen tuloksien perusteella salien välisissä puhtausluokissa ei juurikaan ilmanjakotavasta riippuvaa eroa ollut. Suurempana ongelmana nähtiin painesuhteiden hallintaa ja henkilökunnan epäpuhtausemissiot. /25./

Laminaarisella ilmanjaolla toteutetuissa leikkaussaleissa ilmanvaihtokerroin oli huomattavasti sekoittavan ilmanjaon saleja suurempi, mutta hiukkaspitoisuuden saavutettua tasapainotilan, ei tällä ole enää merkittävää hiukkaspitoisuutta alentavaa vaikutusta leikkauksen aikana. /25, s. 42/.

Valsai-hankkeen kirjallisuuskatsauksessa viitattiin tutkimuksiin, joissa sekoittavalla ilmanjaolla toteutetuissa leikkaussaleissa on päästy jopa alle 1 CFU/m³ -mikrobipitoisuuksiin. Tämä sillä edellytyksellä, että käytössä on ollut korkealaatuinen

suojavaatetus. Kirjallisuuskatsauksen mukaan ultrapuhtaan leikkaussalin mikrobipitoisuuden raja-arvona voidaan pitää 10 CFU/m³. /20, s. 73./

Tutkimusten tulokset antavat pätevän perustelun sekoittavan ilmanjaon käytölle, koska sekoittavalla ilmanjaolla toteutettu ilmanvaihto vaatii huomattavasti pienemmät ilmavirrat ja tätä kautta saavutetaan myös merkittävä energiataloudellinen etu.

5 CEN/TC 156/WG 18 -STANDARDIN MÄÄRITTÄMÄT YLEISET SUORITUSKYKYKRITEERIT ILMASTOINNILLE JA VAATIMUKSET SISÄILMASTOLLE SEKÄ SUUNNITTELULLE

5.1 Yleiset suorituskykykriteerit

Leikkaussalin suorituskykykriteerit voidaan jakaa kontaminaation hallintaan liittyviin vaatimuksiin ja yleisluontoisiin täydentäviin vaatimuksiin. Suorituskykykriteerit on määriteltä CEN/TC 156/WG 18 -standardin osan 1 taulukoissa 1 - 5.

Taulukon 1 arvot koskevat High Risk -operaatioita ja taulukon 2 arvot koskevat Normal Risk -operaatioita. Näiden taulukoiden raja-arvoja voidaan käyttää seuraavilla alueilla. Taulukot 1 ja 2 löytyvät liitteestä 2. /27, s. 5./

- Leikkaussalissa alueella, jossa leikattava potilas, leikkausta suorittava henkilökunta sekä instrumenttipöydät ovat.
- Leikkausinstrumenttien valmisteluhuoneessa, joka sisältää myös instrumenttipöydät ja henkilökunnan.

Taulukoissa 1 ja 2 on raja-arvot kahdelle eri suurelle leikkaussalin molemmille alueille (luku 3.2.2).

Sekä High risk- että Normal risk -tilanteissa raja-arvot todentavat mittaukset ovat sisäilman mikrobiologinen mittaus (CFU/m³) sekä sedimentaatioon perustuva mikrobiologinen mittaus (CFU/Agar Ø90mm X hr). Taulukoiden 1 ja 2 raja-arvojen todentamiseen liittyvät mittaukset tulee suorittaa ISO 15698 -standardin määräysten mukaan. Testattavien suureiden määritelmät ovat seuraavat. /27, s. 6/.

| | |
|----------------------------|--|
| CFU/m³ | Leikkaussalin ilmassa olevien pesäkkeen muodostavien yksiköiden määrä tilavuusyksikköä kohden eli konsentraatio. |
| CFU/Agar Ø90mm 4 hr | Pesäkkeen muodostavien yksiköiden määrä agarissa sisältävässä halkaisijaltaan 90 mm petrimaljassa, kun malja on ollut auki neljä tuntia. |
| CFU/Agar Ø90mm 1 hr | Pesäkkeen muodostavien yksiköiden määrä agarissa sisältävässä halkaisijaltaan 90 mm petrimaljassa, kun malja on ollut auki yhden tunnin. |

Suorituskykykriteerit on määritelty yleensä leikkaussaliin aluekohtaisesti (luku 3.2.2), mutta jos tällaista määritystä ei ole tehty kriteerit koskevat koko salia. Taulukko 1 käsittelee High Risk -operaatioita ja taulukko 2 Normal Risk -operaatioita. /27, s. 5./

Leikkaussalin äärimmäinen suorituskyky määritellään kontaminaatioon vaikuttavien riskitekijöiden minimoinnin tehokkuudella. Mitä suurempi määrä riskitekijöitä leikkaussalissa vallitsee, sitä suurempi on myös infektion riski potilaalle. Standardin mukaan huomioonotettavia riskitekijöitä leikkaussalin ilmanvaihdossa ovat /27, s. 5/

- potilaalle tehdyn leikkaushaavan, henkilöiden, lamppujen, instrumenttien ja laitteiden sijainti
- leikkaushaavan koko
- leikkaushaavan altistusaika
- henkilöiden lukumäärä
- henkilöiden liike
- henkilöiden vaatetus
- käytettävien instrumenttien lukumäärä
- ortopedisessa proteesileikkauksessa mahdollisen proteesin koko
- leikkaussalin oven käyttö
- ilman sisäänvirtauksen estäminen vähemmän puhtaista tiloista.

CEN/TC 156/WG 18 -standardin osan 1 taulukoissa 3 ja 4 on määritetyt raja-arvot ovat leikkaussalille High Risk -tilanteessa ja At Rest -tilassa niin että taulukon 3 arvot

ovat laminaarisella ilmanjakotavalla toteutettuun ilmanvaihtoon ja taulukon 4 arvot ovat sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutettuun ilmanvaihtoon. Taulukon 5 arvot ovat leikkaussalille Normal Risk -tilanteessa ja At Rest -tilassa. /27, s. 6-7./

Taulukoissa 3-5 raja-arvot todentavat mittaukset ovat hiukkaspitoisuuden mittaus, jossa mittaukset on kohdistettu hiukkasten kokoalueelle $\geq 0,5 \mu\text{m}$. Mittaukset tulee suorittaa standardin SFS-EN ISO 14644-3 ohjeiden mukaan ja näin ollen hiukkaspitoisuudelle saadaan tietty SFS-EN ISO 14644-1 määrittämä ISO-luokitusarvo. /27, s. 6-7./

Toinen taulukoiden 3-5 tilanteita koskeva mittaus on leikkaussalin toipumisaika lähtötilanteen hiukkaspitoisuudesta sadasosan hiukkaspitoisuuteen. Toipumisajan testaus tulee suorittaa standardin SFS-EN ISO 14644-3 ohjeiden mukaan. /27, s. 6-7./

Kolmas ja neljäs taulukoiden 3-5 tilanteita koskevia mittauksia ovat samat kuin taulukoissa 1 ja 2, eli sisäilman mikrobiologinen mittaus (CFU/m³) ja sedimentaatioon perustuva mikrobiologinen mittaus (CFU/Agar Ø90mm X hr). Lisäksi taulukossa 3 on arvot erottelukyvylle, jonka testaus tulee suorittaa standardin SFS-EN ISO 14644-3 mukaan. /27, s. 6-7./

Kokonaisuudessaan voidaan todeta että CEN/TC 156/WG 18 -standardissa ilmanvaihdon yhtenä mitoittavana tekijänä voidaan pitää leikkaussalissa tapahtuvasta operaatiosta riippuvaa CFU-pitoisuuden raja-arvoa.

5.2 Yleiset vaatimukset sisäilmastolle

Kontaminaation hallinnan rinnalla CEN/TC 156/WG 18 -standardi määrittää yleiset vaatimukset sisäilmastolle leikkaussalissa lämpötilan, suhteellisen kosteuden, äänenpainetason sekä painesuhteiden osalta seuraavasti /27, s. 8./:

| | |
|------------------------------|---|
| Lämpötila | $18\text{ °C} \leq t \leq 24\text{ °C}$ |
| Suhteellinen kosteus | $40\% \leq RH \leq 60\%$ |
| A -painotettu äänenpainetaso | $L_p \leq 48\text{ dB(A)}$ |

Lämpötila-alue on suositus, koska standardin mukaan lääketieteellistä syytä tälle lämpötila-alueelle ei ole. Kyse on ainoastaan henkilökunnan viihtyvyydestä. Tämä lämpötila-alue tulisi pystyä pitämään leikkausalueella (Protected zone). Leikkaussalin muilla alueilla lämpötila voi vaihdella. /27, s. 8./

Suhteellisen kosteuden alue on standardin mukaan myös suositus, ja mikäli sitä ei ole erikseen määritelty, ei tälläkään ole lääketieteellistä syytä, vaan tällöin kyseessä on myös henkilökunnan viihtyvyys sekä kondenssin välttäminen. Äärimmäisissä ilmasto-olosuhteissa 1-3 päivän poikkeamat näistä raja-arvoista ovat sallittuja. /27, s. 8./

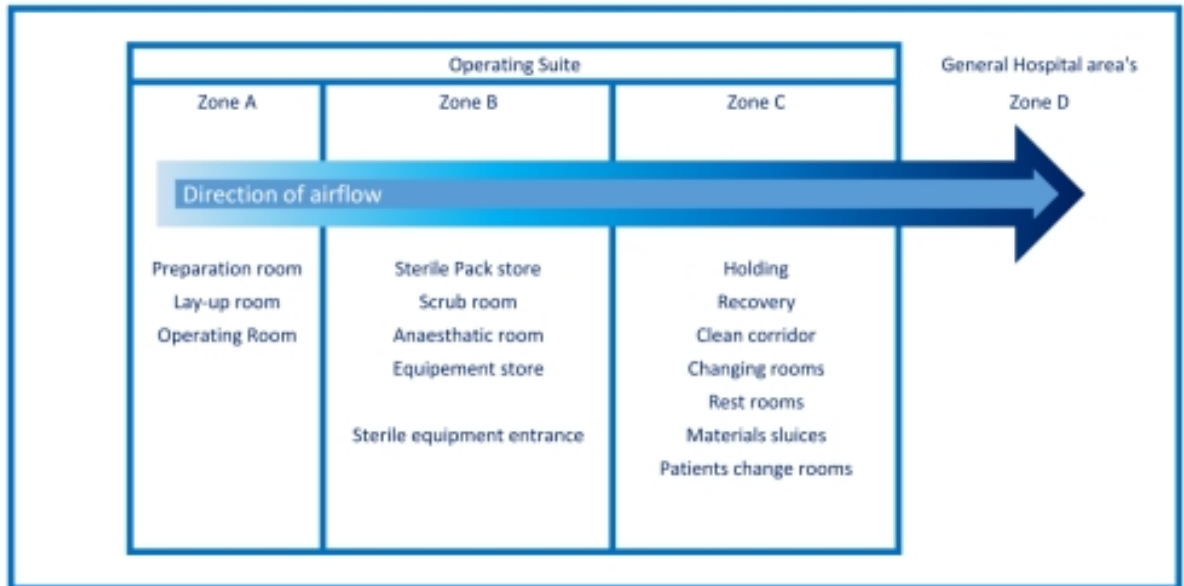
Standardityöryhmän käsittelyssä on vielä suhteellisen kosteuden vaikutukset staattisen sähkön hallintaan (ESD-suojaus) ja näin ollen suhteellisen kosteuden raja-arvot voivat vielä muuttua. Vaatimukset LVI-järjestelmien aiheuttamalle äänenpainetasolle tulevat standardista EN 15726. Liitteessä 3 on esitetty graafisesti vaatimusten mukainen sisäilman tila-alue. Tila-alueen muodostaa pisteiden 1-5 sisäpuolelle jäävä alue /27, s. 8./

5.3 Ilman virtaus- ja painesuhteet leikkausosastoilla

Sairaaloissa leikkausosasto on alue, joka sisältää useita leikkaussaleja, valmisteluhuoneita, käytäviä, henkilökunnan taukotilat ja ilmasulut. Suunniteltaessa leikkausosastoa ja sen ilmanvaihtoa, tulee ottaa huomioon tilojen väliset painesuhteet ja niistä aiheutuvat ilmavirrat huonetilojen välillä. Painesuhteet tulee toteuttaa niin, että korkeimmat puhtausvaatimukset ja korkeimman infektioriskin omaavien potilaiden tilat tulee olla ylipaineisia niihin tiloihin nähden, joissa puhtausvaatimukset ovat matalammat. /27, s. 1, 7./

Näin ilmavirrat ohjautuvat automaattisesti puhtaista tiloista kohti likaisempia, eikä likaisemmissa tiloissa olevat epäpuhtaudet pääse aiheuttamaan kontaminaatiota puh-

taisiin tiloihin ja lisäämään infektion riskiä potilaisiin. Lopulta painesuhteiden hallinnan avulla ilmavirrat tulee ohjata kohti sairaalan yleisiä tiloja pois leikkausosastolta. Kuvassa 14. on esitetty painesuhteilla hallittava ilman virtaussuunta suhteessa tilan puhtausvaatimukseen. /27, s. 7./



KUVA 14. Painesuhteilla hallittava ilman virtaussuunta suhteessa tilan puhtausvaatimukseen /27, s. 7/

Standardin mukaan puhtaampien tilojen suhteellinen ylipaine ympäröiviin likaisempiin tiloihin nähdessä tulee olla vähintään /27, s. 8/.

Paine-ero $\Delta p \geq 5 \text{ Pa}$ (ovien ollessa suljettuna)

Mahdollinen alakattotila tulee varustaa riittävällä ilman poistolla, jolla se saadaan alipaineiseksi leikkaussaliin nähden. Tällä estetään alakattotilassa kulkevan kanaviston ja laitteiden mahdollisten HEPA-suodattamattomien vuotojen pääsy leikkaussaliin alakattorakenteiden kautta. /27, s. 8./

5.4 Suunnittelukonseptit ilmanjaolle

CEN-standardi määrittelee leikkaussalin mahdollisiksi ilmanjakotavoiksi seuraavat /27, s. 10/:

| | |
|-------------------------------|--|
| Protected zone system | Laminaariseen ilmanjakoon perustuva UDF-ilmanjako |
| Dilution mixing system | Epäpuhtauksien laimentamiseen perustuva sekoittava ilmanjako |

Käyttäjälähtöisen suunnittelun lähtötietoina sekä high risk- että normal risk - operaatioissa standardin mukaan voidaan pitää seuraavia /27, s. 10/:

- Leikkaussalin koko
- Leikkaussalissa käytettävien laitteiden sijainti, kuten leikkausvalaisimet, yleisvalaisimet, kattokeskukset yms.
- Laitteiden lämpökuormat
- Leikkaussalin korkeus
- Henkilöiden lukumäärä ja sijainti salissa
- Käytettävä vaatetus.

Laminaarisella ilmanjakotavalla toteutettavan leikkaussalin suunnittelussa huomioon otettavia asioita ovat seuraavat /27, s. 10/:

- UDF -tuloilmalaitteen koko ja muoto
- Haluttu suojatun alueen (protected zone) ja reuna-alueen (periphery area) tuloilman lämpötila
- Tuloilman nopeus
- Ilmavirtauksen häiriötekijöiden minimointi.

Sekoittavassa järjestelmässä ilmanjaon mitoituksen tulee perustua epäpuhtauslähteiden summavoimakkuuden määrittämään laimennustarpeeseen. Sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutettavan leikkaussalin suunnittelun lähtötietoina voidaan pitää seuraavia /27, s. 10/:

- Henkilöiden lukumäärä
- Henkilöiden vaatetus ja vaatetuksesta riippuva ihmisen epäpuhtauslähteen voimakkuus (CFU/s)
- Kokonaisilmavirta (m^3/s)

- Tulo- ja poistoilman päätelaitteiden sijainti, jotta saavutetaan haluttu sekoittuminen

Leikkaussalin suunnittelussa tulee arvioida seuraavat leikkaussalin olotilat sekä tilanteet toiminnan ja turvallisuuden kannalta /27, s. 11/:

- Normaalitilanne
- Stand by -tilanne
- Yöaika
- Ylikuormitustilanteet
- Vikatilanteet
- Ilman virtauksen varmistaminen leikkaussaliin sen kaikissa tilanteissa ja olosuhteissa.
- Tarve sisäänpuhallusilman alilämpöisyydelle operaation aikana. Tarvittaessa sisäänpuhallusilma voi olla alilämpöinen huonelämpötilaan nähden.
- Ilmanvaihtojärjestelmässä olevien puhallinten vikatilanteiden indikointi suoraan leikkaussaliin ja hallittavuus leikkaussalista rakennusautomaation avulla.

Taulukossa 6. on esitetty sekoittavan ilmanjakojärjestelmän ja laminaarisen ilmanjakojärjestelmän vertailu näille yhteisten suunnittelussa huomioon otettavien tekijöiden näkökulmasta. Eri tekijöille annettujen +-merkkien lukumäärä kertoo kyseisen tekijän merkittävyyden suunnittelussa. /27, s. 11./

TAULUKKO 6. Leikkaussalin ilmanjakotapojen suunnittelussa huomioitavat tekijät /27, s. 11/

| Tekijä | Sekoittava ilmanjako (Dilution mixing system) | Laminaarinen ilmanjako (Protected zone system) |
|---|--|---|
| Leikkauspöydän ja leikkaussalihenkilökunnan sijainti. | + | +++ |
| Instrumenttipöytien/ -kärryjen sijainti | + | +++ |
| Valaisinten asento ja sijainti | + | +++ |
| Henkilöiden lukumäärä | +++ | + |
| Vaatetus | +++ | + |
| Oven käyttö ja ovikuri | +++ | + |
| Henkilöiden liikehdintä | ++ | + |
| Erillinen instrumenttien valmisteluhuone (ei käytössä Suomessa) | ++ | ++ |
| Esillä olevien instrumenttien suojaus | ++ | ++ |

5.5 Ilmastointijärjestelmän rakenteesta

Tuloilmajärjestelmä tulee standardin mukaan suunnitella niin, että kaikki leikkaussaliin tuotava ilma on HEPA-suodatettua ennen kuin se puhalletaan tilaan. Tämä koskee myös mahdollisia vikatilanteita. Kiertoilmajärjestelmissä ilman takaisinvirtaus on myös estettävä tilanteissa, jossa kiertoilmakoneen puhallin laite- tai muun vian takia pysähtyy. /27, s. 12./

Tuloilma koostuu yleensä kiertoilmakoneen kiertoilmasta ja tarvittavasta määrästä ns. make-up -koneen make-up -ilmasta eli raittiista ilmasta. Suunnittelussa on huolehdittava siitä, että sekoituspuheen jälkeen tuloilman tila on aina oikea. Saman tai korkeamman CFU- pitoisuusvaatimuksen omaavan leikkaussalin vieressä olevan tilan mahdolliset ilmapuodot leikkaussaliin eivät saa haitata leikkaussaliin tavoiteltua tuloilman virtauskuviota. /27, s. 12./

Leikkaussalin ilmanvaihdossa käytettävien suodattimien tulee täyttää standardien EN 779:2002 ja EN 1822:2009 asettamat vaatimukset, eivätkä suodattimet saa olla valmistettu materiaaleista, jotka edistävät mikrobien kasvua. CEN-standardin mukaan leikkaussaleissa tulee käyttää vähintään kolmevaiheista tuloilman suodatusta, joista ensimmäinen on nukkasuodatin poistoilman päätelaitteiden yhteydessä. Nukkasuodatuksen tarpeellisuudesta käydään standardityöryhmässä kuitenkin vielä keskustelua ja näin ollen vaatimusta nukkasuodatukselle ei välttämättä tule olemaan. Toisena suodattimena on esisuodatin ennen kiertoilmakoneen laitteita, jonka on oltava vähintään F7-luokan suodatin. Kolmannen vaiheen suodatus tapahtuu tulopuolella päätelaitteissa, joissa tulee käyttää vähintään H13-luokan suodattimia. Nukkasuodattimet tulee olla valmistettu ruostumattomasta teräksestä, sekä niiden tulee olla helposti puhdistettavissa ilman erityisiä työkaluja. Mikäli leikkaussalin poistoilman hoitaa poistoilmakone, on esisuodattimena ennen poistoilmakoneen laitteita käytettävä vähintään M6-luokan suodatinta. /27, s. 12-13; 28, s. 15-16; 37./

CEN-standardi määrittelee myös sen, että leikkaussaliin tuotavan ilman tulee täyttää IDA 1 -sisäilman laatuluokka. Make-up tulo-/poistokoneen kautta järjestelmään tuotava ulkoilma voi olla ulkoilman laatuluokaltaan ODA 1 - ODA 3 ulkoilman puhtaudesta riippuen. Ennen sekoitusta kiertoilmaan tulee make-up -ilma olla suodatettu myös niin, että se täyttää IDA 1-luokan vaatimukset. Mikäli rakennus sijaitsee vahvasti ilmansaasteita sisältävässä ilmastossa, on syytä käyttää ulkoilman laatuluokkana ODA 3. Taulukosta 7 ilmenee CEN-standardin viittaaman SFS-EN 13779:2007-standardin määrittämä esisuodatusluokan riippuvuus ulko- ja sisäilman laadusta. /28, s. 16./

TAULUKKO 7. Suodatinsuositukset SFS-EN 13779:2007 mukaisesti /30/

| Outdoor Air Quality | IAQ (Indoor Air Quality) | | | |
|---------------------|--------------------------|----------------|------------------|-------------|
| | IDA 1 (High) | IDA 2 (Medium) | IDA 3 (Moderate) | IDA 4 (Low) |
| ODA1 | F9 | F8 | F7 | M5 |
| ODA2 | F7 / F9 | M6 / F8 | M5 / F7 | M5 / M6 |
| ODA3 | F7 / GF / F9 | F7 / GF / F9 | M5 / F7 | M5 / M6 |
| GF) gas filter | | | | |

Seuraavassa standardin toisen osan asettamia yleisiä vaatimuksia ilmastointijärjestelmän tekniikalle ja laitteille. /28./

Ilmanvaihtojärjestelmä tulee tarkastaa ja puhdistaa säännöllisesti ja pääsy huollettaviin laitteisiin täytyy olla esteetön /28, s. 6; s. 7/.

Useammin huoltoa tai puhdistusta vaativat järjestelmän komponentit, kuten ilman-suodattimet, kostuttimet, puhaltimet ja märkääjähdyslaitteet tulee hygieniasyistä mahdollisuuksien mukaan sijoittaa niin, ettei käyntiä sairaanhoidollisiin puhdistiloihin tarvita. Jos laitteiden huolto edellyttää käyntiä sairaanhoidollisiin tiloihin, on tilat puhdistettava huoltotoimenpiteiden jälkeen ennen tilan käyttöönottoa. /28, s. 6; s. 7/

Ilmastointikone tulee varustaa ikkunallisilla vähintään 150 mm leveillä tarkastusluukuilla ja niiden tulee olla sijoitettu sopivalle korkeudelle rutiinitarkastusten helpottamiseksi. Tarkastusluukut ilmastointikoneessa tulee sijoittaa seuraavien komponenttien molemmille puolille. /28, s. 7/

- suodattimet, pois lukien HEPA -päätelaitesuodattimet
- lämmönlämmönottolaitteet
- kostuttimet
- jäähdytyspatterit

Ilmastointikoneen sisäinen valaistus tulee täyttää vähintään IP55 kotelointi luokituksen. Valot tulee sijoittaa niin, että ne tarjoavat riittävästi valoa sekä tarkastuksiin että suoritettaviin huoltotoimenpiteisiin. Valaistus tulee olla ohjattavissa yhdellä kytkimellä. /28, s. 7/

Ilmanvaihtojärjestelmän kontaminaation estämiseksi tulo- ja poistoilmajärjestelmät ja ilmanjako alueille tulee suunnitella ja hallita niin, ettei epäorgaaniset tai orgaaniset aineet pääse aiheuttamaan kontaminaatiota ja että järjestelmään liittyvät terveydelle vahingolliset kaasujärjestelmät ovat vaatimusten mukaan hallittu. /28, s. 7/

Kiertoilman käyttö on sallittu vain niissä terveydenhoidollisissa tiloissa, jotka palvelevat ainoastaan yhtä potilasta yhdessä huoneessa ja että tämän CEN -standardin muut

osat sen myös sallivat. Muissa ei terveydenhoidollisissa tiloissa, joissa potilaita ei ole läsnä, kiertoilman käyttö on sallittu. /28, s. 7./

Tulo- ja kierrätysilman järjestelmät tulee rakentaa materiaaleista, jotka eivät emittoi vahingollisia epäpuhtauksia eivätkä tarjoa kasvualustaa mikrobeille. Kanavistossa virtaavaan ilmaan ei järjestelmässä käytetyistä materiaaleista myöskään saa irrota kuituja tai hajuja. /28, s. 7-8./

Kaikki huokoiset verhoilut järjestelmässä tulee peittää sopivalla kulutusta kestäväällä materiaalilla. Eristykseen käytettävät lasi- ja mineraalivillamatot eivät saa olla suorassa kontaktissa ilman kanssa. Pinnat, jotka ovat ilman kanssa kontaktissa, tulee olla suunniteltu ja valmistettu niin, että ne ovat puhdistettavissa ja mahdollisimman sileitä. Lian kerääntymisen minimoimiseksi terävien metallireunojen syntymistä järjestelmään asennuksen yhteydessä tulee välttää. /28, s. 7-8./

Tiivisteet ja tiivistysaineet järjestelmässä tulee olla sileät. Ruiskutettavien tiivistysaineiden käyttöä tulee välttää, mutta se on sallittua ainoastaan pienillä alueilla korkeintaan 3 mm paksuudelta. Laajentuvia vaahtoja ei tule käyttää. /28, s. 8./

Paikalliset olosuhteet tulee huomioida valittaessa ja suunniteltaessa järjestelmän rakennetta, materiaaleja ja laitteita /28, s. 8/.

Kaikki komponentit tulee toimittaa puhtaana, ja ne tulee suojata vahingoittumiselta ja kontaminaatiolta rakentamisen, toimituksen, varastoinnin ja asentamisen aikana EN 15780:n vaatimusten mukaan. Tämän takia rakentamisen, varastoinnin ja asentamisen ajaksi tulee laatia puhtaanapitosuunnitelma. /28, s. 8./

Taulukossa 8 on esitetty standardissa määritetyt raja-arvot pölyn kerääntymiseen uudessa ilmanvaihtokanavistossa. /28, s. 9./

TAULUKKO 8. Hyväksyttävät pölyn kerääntymisen tasot uudessa ilmanvaihtokanavistossa /28, s. 9/

| Puhtausvaatimus | Tulo-, kierrätys tai palautusilman kanavisto | Poistoilman kanavisto |
|------------------------|---|------------------------------|
| Low | < 0,9 g/m ² | < 1,8 g/m ² |
| Medium | < 0,6 g/m ² | < 1,8 g/m ² |
| High | < 0,3 g/m ² | < 0,9 g/m ² |

Ilmanvaihtojärjestelmä tulee olla tarkastettavissa ja tarvittaessa puhdistettavissa ilman tarvetta rakennustelineille /28, s. 9/.

Kierrätys- ja palautusilmajärjestelmät tulee puhdistaa EN 15780 -standardin tuloilmajärjestelmälle määrittämien puhdistusohjeiden mukaan. Kaikki ilmanvaihtojärjestelmät, jotka palvelevat terveydenhuollon tiloja, tulee määritellä rakennettavaksi ja käytettäväksi vähintään EN 15780:n määrittämän HIGH-tason mukaan. /28, s. 9-10./

Järjestelmän desinfiointi on sallittu vain vaihtoehtoisena keinona, jos on syytä epäillä, että järjestelmä potilasturvallisuuden takia sitä tarvitsee. Desinfiointi voidaan tehdä vain järjestelmän yllä mainitulla tavalla suoritettua puhdistuksen jälkeen. /28, s. 10./

Kaikki imu-sekä painepuolen laitteet tulisi varustaa vähintään 500 mm leveällä, kanavan tai ilmastointikoneen mukaan täyskorkealla ovella tai luukulla /28, s. 10/.

Mekaaniset laitteet, kuten suodattimet, puhaltimet ja kostuttimet, tulee merkitä tuotteita suorituskykytiedoilla, ja niiden tulee olla helposti luettavissa laitteen edestä. Dokumentoinnin täytyy myös sisältää huolto-ohje ja erilliset järjestelmäkohtaiset vaatimukset /28, s. 10/.

Tarkemmat vaatimukset ilmastointijärjestelmän komponenteille löytyvät CEN/TC 156/WG 18 - standardin osan 2 (Requirements for ventilation and air-conditioning in general medical locations - Components and Systems) luvusta 6.

6 MODULAARISEN LEIKKAUSSALIN ILMANVAIHTORATKAISUN SUUNNITTELU JA TULOKSET

Rakentamisessa aikataulupaineet ovat selvästi kasvaneet viime vuosina. Tämän takia Suomessa ja muualla maailmassa uusien rakennusratkaisujen kehittäminen on noussut oleelliseksi tekijäksi näiden aikataulupaineiden ja tätä kautta kustannusten lieventämiseen. Sairaalarakentamisessa korostuu rakentamisen laatu ja kiristyneiden aikataulujen takia rakennusvirheiden todennäköisyys kasvaa. Sairaaloiden kriittisimmissä tiloissa, kuten leikkaussaleissa, tämä todennäköisyys olisi syytä minimoida. Modulaarisen leikkaussalin pääajatus on siinä, että sali rakennetaan tilauksen mukaan hyvin pitkälle valmiiksi muualla ja toimitetaan ns. "valmiina pakettina" käyttökohteeseen, jossa tehtäväksi jää vain viimeistelytyöt, kuten vesi- ja viemäri, ilmanvaihto, sairaalakaasu- ja sähkö- sekä rakennusautomaatiojärjestelmien kytkeminen rakennuksen järjestelmiin.

Ilmanvaihdesta leikkaussalista tulee huolehtimaan kaksi konetta, joista toinen on moduulin yhteyteen sijoitettava kiertoilmakone sekä ns. make-up -kone, jolla tarkoitetaan sen rakennuksen ilmastointikonetta, jonka yhteyteen moduuli asennetaan. Make up -koneella saliin tuodaan kiertoilmaan sekoitettava tuloilma. Sekoitus voidaan tehdä ennen tuloilman jakamista saliin tai tuoda raitis tuloilma omien päätelaitteiden kautta tilaan, jolloin sekoittuminen tapahtuu leikkaussalissa. Prototyypivaiheessa mittauksiin menevälle moduulille asennetaan kuitenkin oma make-up -kone.

6.1 Modulaarisia leikkaussaliratkaisuja maailmalla

Maailmalla modulaarisia leikkaussaliratkaisuja on tuotteistanut mm. Saksalainen Veissmann Technologies GmbH ja Ruotsalaisen Getinge Groupin Saksassa päätoimipaikkaansa pitävä Maquet GmbH & Co.

Amerikassa on kehitetty jo vuonna 1990 rekan perävaunuun rakennettava leikkaussali aputiloihin, jossa leikkausoperaatiot voidaan suorittaa. Itse perävaunu on irrallinen ja omavarainen sekä laajennettavissa. Perävaunu sisältää leikkaussalin, jossa on kirurgin ohjailtavissa oleva automaattinen leikkauspöytä, tarvittavat instrumenttipöydät, leikkaussalivalaisimet, leikkausinstrumenttien sterilointiin käytettävän autoklaavin, anestesialaitteen sekä kaikki muut tarvittavat leikkausinstrumentit, jotka kokonaisvaltaiseen potilaan hoitoon tarvitaan. /41./

Tuote on patentoitu USA:ssa patenttinumeroilla 4,915,435. CEN -standardin mukaisen ilmanvaihdon järjestäminen kyseiseen leikkaussaliin tulisi kuitenkin todennäköisesti olemaan hyvin haastavaa. Kuvassa 15 on esitetty pohjapiirustus ja leikkauskuvat kyseisestä leikkaussaliratkaisusta selityksineen. /41./

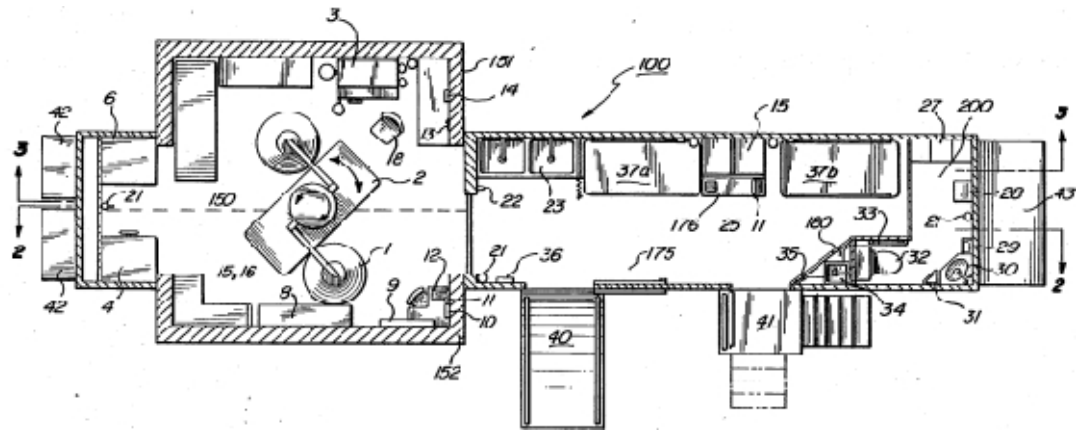


FIG. 2

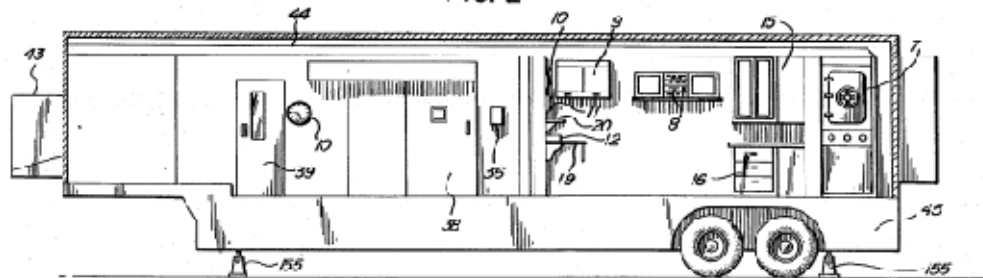
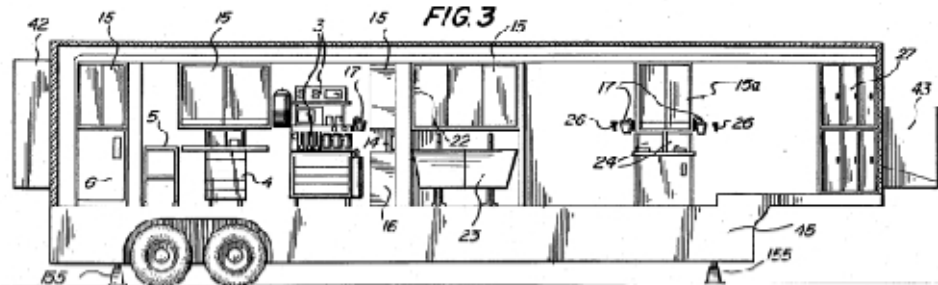


FIG. 3



- | | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|---|
| 1. Surgical Spotlights | 10. Clock | 20. Work Shelf | 33. Handrail |
| 2. Operating Room Table | 11. Telephone | 21. Fire Extinguisher | 34. Service Sink |
| 3. Anesthesia Machine with Monitors | 12. Dictation Machine | 22. Emergency Light | 35. Workroom Shelf |
| 4. Crash Resuscitation Cart | 13. Emergency Switch | 23. Scrub Sinks | 36. Patient Lift Controls |
| 5. Rolling Surgical Instrument Table | 14. Intercom | 24. Monitor | 37. Gurney |
| 6. Blanket and Fluid Warmer | 15. Storage Cabinets | 25. Refrigeration | 38. Patient Entry Sliding Doors |
| 7. Autoclave | 16. Storage Drawers | 26. Wall Oxygen Source | 39. Personnel and Patient Door |
| 8. VCR Monitor | 17. Wall Suction | 27. Lockers | 40. Patient Lift |
| 9. X-Ray Viewbox | 18. Chair | 28. Clean Linen Shelf | 41. Self Supporting Slide Out Platform with Steps |
| | 19. Work Desk | 29. Trash Basket | 42. Air Conditioning Unit |
| | | 30. Sink | 43. Generator |
| | | 31. Dirty Linen Basket | 44. Ventilation Ducts |
| | | 32. Toilet | 45. Underbody Compartments |

KUVA 15. USA:ssa kehitetty rekan perävaunuun rakennettava leikkaussali /41/

6.2 High-Tech sairaalan leikkaussalihanke

High-Tech -sairaalan leikkaussalihanke on Hermetel Oy:n yritysveltoinen hanke, jossa on mukana useita eri alojen yrityksiä. Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus TEKES osallistuu hankkeen rahoitukseen ja rahoituspäätös hankkeeseen saatiin syksyllä 2013, jolloin hanke käynnistettiin. Hankkeen on tarkoitus olla valmis vuoden 2015 loppuun mennessä. Tavoitteena hankkeella on kehittää puhdastilaelementeistä koottava modulaarinen leikkaussali. Alkuvaiheessa on tarkoitus rakentaa kaksi prototyyppiä, joista toinen jää Hermetel Oy:lle ja toinen toimitetaan VTT:lle suorituskyvyn todennusmittauksia, verifiointeja ja validointeja varten.

Koska hanke on käynnissä vuoden 2015 loppuun, rakenne ja tekniikka elävät jatkuvasti ja tämän takia modulaarisen leikkaussalin tämänhetkiset ratkaisut voivat hankkeen edetessä vielä muuttua.

Mukana hankkeessa toimialoittain ovat:

| | |
|--------------------|--|
| Hermetel Oy | Hankkeen vetäjä, jonka toimialana ovat hyvin eristettyjen ja hygieenisten kylmä- ja pakastetilojen, puhdastilojen sekä varastojen suunnittelu ja rakentaminen. Hankkeessa vastuualueena ovat modulaarisen leikkaussalin rakenne- ja oviratkaisut sekä rakennusvaiheen toteutus. |
| Granlund Kuopio Oy | Suunnittelu- ja konsultointiyritys, jonka yhtenä monista osaamisalueista on sairaaloiden puhdastilojen kokonaisvaltainen suunnittelu ja ylläpito rakennuksen koko elinkaaren ajan. Vastuualueena on modulaarisen leikkaussalin LVI-, KSL-, sähkö, RAU- ja sairaalakaasujärjestelmien suunnittelu. KSL- ja LVI-suunnittelulla on suuri vaikutus leikkaussalin rakenteelliseen ratkaisuun. |

| | |
|--------------|---|
| Halton Oy | Sisäilmastoratkaisuihin erikoistunut perheyritys, jolla on laaja globaali kokemus erilaisten sisäilmastoratkaisujen ja niihin liittyvien laitteiden kehityksestä. Halton on panostanut myös erityisesti puhdastilaratkaisujen kehittämiseen ja tuottaa sisäympäristön hallintapalveluja rakennuksen koko elinkaaren ajalle. Vastuualueena ovat modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihdon päätelaitteet. |
| Merivaara Oy | Sairaalakalusteiden suunnitteluun, valmistukseen ja ohjaukseen erikoistunut yritys, jonka tuotteiden ja palveluiden avulla voidaan merkittävästi edesauttaa ja nopeuttaa leikkaussalihenkilökunnan työtä sekä parantaa potilasturvallisuutta ja alentaa kustannuksia. Vastuualueena ovat modulaarisen leikkaussalin TELE/AV-ohjausjärjestelmä, kalusteet, leikkaussalivalaisimet, monitorit, monitorivarret ja kattokeskukset. |
| Koja Oy | Luotettavia ja elinkaarikustannuksiltaan edullisia ilmankäsittelylaitteita ja puhaltimia rakentamisen ja teollisuuden tarpeisiin tarjoava yritys, jolla myös laaja-alainen kokemus sairaaloiden ja muiden terveydenhoitolaitosten ilmastointitarpeet täyttävistä ilmankäsittelylaiteratkaisuista. Vastuualueena on modulaarisen leikkaussalin kiertoilman ilmastointikone ja siihen liittyvät tarvikkeet. |
| VTT | Pohjois-Euroopan suurin soveltavaa tutkimusta tekevä organisaatio, joka tuottaa monipuolisia teknologia- ja tutkimuspalveluja sekä kotimaisille että kansainvälisille asiakkailleen, yrityksille ja julkiselle sektorille. VTT on voittoa tavoittelematon Suomen innovaatiojärjestelmän osa, joka kuuluu työ- ja elinkeinoministeriön hallinnon alaan. Vastuualueena ovat valmiin modulaarisen leikkaussalin suorituskyvyn todennusmittaukset, verifiointit ja validoinnit. |

6.3 Tavoite

Tutkimuksen ja suunnittelun tavoitteena on yhteistyössä hankkeeseen osallistuvien eri alojen asiantuntijoiden kanssa kehittää toteutuskelpoinen ilmanvaihtoratkaisu modulaariseen leikkaussaliin. Ilmanvaihtoratkaisun tulee täyttää CEN/TC 156/WG 18 -sairaalailmanvaihtoa käsittelevän standardiluonnoksen sille asettamat vaatimukset suunnittelun aikana tiedossa olevilta osiltaan sekä olla kustannuksiltaan kokonaistaloudellinen. Ilmanvaihtoratkaisun kehittämisessä tulee myös huomioida saliin tuleva muu tekniikka, kuten monitorointivarret ja kattokeskukset sekä arvioida käytettävien menetelmien soveltuvuutta moduulirakentamiseen.

Koska Suomessa ei aiemmin ole rakennettu modulaarisia leikkaussaleja, on tutkimusten tavoitteena myös tarjota Suomessa eri laite- ja järjestelmävalmistajille sekä sairaaloille tietoa teknisen toiminnan kehittämiseen. Viime kädessä tavoitteena on kehittää järjestelmä, jolla saadaan minimoitua infektioriski ilmanvaihtotekniikan osalta ja näin parannettua potilasturvallisuutta.

6.4 Suunnittelu- ja mallinnusmenetelmät

6.4.1 Suunnittelumenetelmät ja suunnittelun eteneminen

Modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtoratkaisujen hyvän suunnittelun lähtökohtana toimi yhteistyö eri suunnittelualojen ja eri asiantuntijoiden kanssa Granlund Kuopio Oy:llä sekä yhteistyö muiden hankkeeseen osallistuvien tahojen kanssa. Leikkaussali suunnittelukohteena on yksi haastavimpia, ja tämän vuoksi eri alojen asiantuntijoiden oli tärkeää panostaa suunnittelutyöhön täysivaltaisesti. Suunnittelu eteni hankkeeseen osallistuneiden tahojen kanssa pidetyissä suunnittelukokouksissa hyvin, ja niissä päätettiin yhteisiin ratkaisuihin, joiden pohjalta kokonaisuutta vietiin eteenpäin. Suunnittelukokouksia hankkeen osapuolten kanssa on järjestetty tähän mennessä neljä sekä lisäksi Granlund Kuopion suunnittelualojen välisiä sisäisiä kokouksia on järjestetty useita.

Päätyökaluna suunnittelutyössä toimi MagiCAD-suunnitteluohjelma, jonka avulla erilaiset mitoitus ja itse piirtäminen tehtiin. Kaikki suunnittelu manuaalista laskentaa lukuun ottamatta tapahtui 3D-ympäristössä ja kaikki 3D-suunnittelu tullaan toteuttamaan, niin kuin se rakentamisvaiheessakin olisi tarkoitus toteuttaa. Manuaalinen laskenta suoritettiin pääasiassa Excel-taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen.

Ennen varsinaisen 3D-suunnittelun aloittamista kartoitettiin lähtökohdat ja suunniteltiin ilmanvaihdon periaatekaavio, joka toimi ns. selkärankana 3D-suunnittelulle. Periaatekaaviosta tulee esille järjestelmän pääkomponentit ja niiden laitepositiot. Samoja laitepositioita käytetään myös ilmanvaihtoa koskevan rakennusautomaation suunnittelussa.

Ilmanvaihtoratkaisun 3D-suunnittelussa luonnoksia syntyi useita, ja alkupisteeseen palattiin monta kertaa. Näin saatiin karsittua pois edellisen luonnossuunnittelun virheet ja tarkennettua aikaisemman luonnoksen hyviä ratkaisuja.

6.4.2 Mallinnusmenetelmät

MagiCAD-ohjelman rinnalla käytettiin mallinnusohjelma NavisWorks Simulatea, jolla saatiin kaikkien suunnittelualojen suunnitelmat liitettyä yhdeksi 3D-malliksi. Tällä työkalulla pystyttiin tarkistamaan ja tarvittaessa korjaamaan mahdolliset eri järjestelmien risteävyydet. Liitteissä 8 ja 9 on esitetty kuvankaappaukset modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihdosta yläkulmaperspektiivistä ja päätelaitteiden sekä muun tekniikan sijoittumisesta saliin sisäperspektiivistä.

6.5 Modulaarisen leikkaussalin rakenne ja koko

Leikkaussali on tarkoitus rakentaa Hermetel Oy:n puhdastilamoduulielementeistä. Moduuli muodostuu itse leikkaussalista ja sen yhteyteen rakennettavasta teknisestä tilasta, johon eniten huoltoa vaativa tekniikka on tarkoitus sijoittaa. Moduulin kokonaiskorkeus rajoittuu logistisista syistä 4,2 m. Modulaarisen leikkaussalin yksinkertaistettu pohjapiirustus ilman suunniteltua tekniikkaa löytyy liitteestä 10.

Useiden suunnittelu- ja ideointipalavereiden jälkeen on päädytty seuraavaan ratkaisuun salin koon osalta.

Leikkaussali

| | |
|------------------|-----------------------|
| Huoneala | ~50 m ² |
| Huonekorkeus | 3,0 m |
| Alakaton korkeus | 1,0 m |
| Tilavuus | ~150,0 m ³ |

Tekninen tila

| | |
|--------------|----------------------|
| Huoneala | ~17,8 m ² |
| Huonekorkeus | 4,0 m |

Moduulirakentamisen ja mahdollisesti myöhemmän sarjatuotannon helpottamiseksi ja nopeuttamiseksi todettiin parhaaksi pohjaratkaisun muodoksi leikkaussaliin neliömäinen pohjaratkaisu ja tekniseen tilaan suorakaiteen muotoinen pohjaratkaisu. Näin saadaan minimoitua rakennusvirheiden mahdollisuus sekä tästä aiheutuva mahdollinen ilman vuoto. Tärkeimpinä tietoina ilmanvaihtojärjestelmän osalta moduulin rungon rakentamisen kannalta olivat ilmanvaihtojärjestelmän ja kanaviston painotiedot, jotta moduulin tukirakenteet voidaan mitoittaa oikein.

Leikkaussalin alakattorakenne koostuu 0,6 x 0,6 kokoisista irrotettavista elementeistä. Myös kaikki käytetyt laitteet, kuten tuloilman päätelaitteet, yleisvalaisimet sekä varrelliset leikkaussalivalaisimet, monitorivarret ja kattokeskukset sopivat samankokoisiin ruutuihin.

6.6 Ilmavirtojen valinta ja ilmanjakotapa

Ilmanjakotavaksi modulaariseen leikkaussaliin valittiin sekoittava järjestelmä, koska tuoreiden tutkimustietojen mukaan /23/ kiinnittämällä erityistä huomiota salissa olevien epäpuhtauslähteiden minimointiin, voidaan sekoittavalla järjestelmällä salissa päästää yhtä pieniin CFU-pitoisuuksiin kuin laminaarisellakin järjestelmällä toteutetussa salissa.

Hankkeen myöhemmässä vaiheessa tarkastelun ja suunnittelun alle otetaan myös laminaarisella ilmanjakotavalla toteutettava ratkaisu, mutta tällöin ilmavirrat kasvavat,

joka vaikuttaa kiertoilmakoneen, kanaviston, laitteiden ja kenties koko moduulin kokoon.

Leikkaussalimoduulin kokonaistuloilmavirraksi valittiin $1,55 \text{ m}^3/\text{s}$, jonka katsottiin olevan riittävä ilmavirta sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutettuun leikkaussaliin. Kokonaispoistoilmavirraksi valittiin $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Kokonaisilmavirrat jakautuvat kiertoilmakoneen ja make-up -koneen ilman välillä niin, että kiertoilmakoneella kierrätetään $\pm 1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ja make-up -koneella tilaan tuodaan $+0,35 \text{ m}^3/\text{s}$ ja poistetaan $-0,3 \text{ m}^3/\text{s}$. Näillä maksimi-ilmavirroilla pystytään salin olosuhteita hallitsemaan hyvin laajasti ja suurimmassa osassa operaatioita voidaan käyttää osailmavirtaa.

Teknisen tilan ilmanvaihdesta tulee huolehtimaan sen rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä, johon moduuli asennetaan.

Saliin tuodun HEPA-suodatetun tuloilmavirran minimin määrittää ensisijaisesti CEN-standardin vaatimus CFU-pitoisuudelle, mutta myös salissa olevat lämpökuormat asettavat oman tarpeen ilmavirralle ja tuloilman alilämpöisyydelle. Oltaessa operational -tilassa ilmavirta tulee olla aina näistä kahdesta suuremman vaatimuksen mukainen.

Salin leikkauksesta toipumisajan tulee myös täyttää CEN-standardin vaatimukset, jotka puolestaan asettavat omat vaatimuksensa at rest -tilassa olevan salin ilmavirralle.

6.6.1 Painesuhteet

Leikkaussali saatetaan CEN-standardin vaatimusten mukaisesti ylipaineiseksi ympäröiviin tiloihin nähden tuomalla make-up -koneella tilaan $50 \text{ dm}^3/\text{s}$ suurempi tuloilmavirta, kuin mitä salista make-up -koneella poistetaan. Pieni osa make-up -koneen poistoilmasta otetaan alakattotilasta. Näin saadaan alakattotila alipaineiseksi leikkaussaliin nähden, ja tällä saadaan estettyä alakattotilassa olevan kanaviston ja laitteiden mahdollisten HEPA-suodattamattomien vuotojen pääsy leikkaussaliin. Saliin tulee asentaa myös visuaalinen indikaattori henkilökuntaa varten, joka kertoo helposti ymmärrettävällä tavalla ennen operaation aloittamista, että salissa on riittävä ylipaine.

6.6.2 Epäpuhtauslähteet

Ilmavirtojen mitoituksessa lähtökohtana pidettiin CEN-standardin määrittämiä liitteen 2 mukaisia kriteerejä, joiden selitteet löytyvät luvusta 5.1. Salissa olevien mikrobilähteiden hallinta osoittautui erittäin merkittäväksi tekijäksi ilmavirran tarpeen näkökulmasta. Vaatetuksella on erittäin suuri merkitys ihmisestä emittoituvien mikrobien määrään aikayksikköä kohti eli epäpuhtauslähteen voimakkuuteen.

Leikkaussalissa työskentelevän henkilökunnan määrä vaihtelee yleisimmissä leikkaustilanteissa neljän ja kahdeksan henkilön välillä ja heistä emittoituvat mikrobit aiheuttavat merkittävän infektioriskin potilaalle. Liitteissä 4 ja 5 on laskettu taulukkomuotoon kaavaa 8 käyttäen tarvittava ilmavirta sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutetussa järjestelmässä eri henkilökuntamäärille luvussa 4.4.1 mainituilla yleisimmillä vaatetuksilla sekä niitä vastaavilla epäpuhtauslähteen voimakkuuksilla. Laskelmien tuloksia havainnoi konkreettisemmin myös liitteistä 6 ja 7 löytyvät laskelmiin perustuvat kaaviot.

Liitteen 4 laskelmissa on tuotu esille high risk -operaatioiden ja liitteen 5 laskelmissa normal risk -operaatioiden minimi-ilmavirrat, jotta raja-arvona pidettävä CFU-pitoisuus operational -tilassa ei ylitä.

Liitteiden 4 ja 6 perusteella voidaan todeta, että High risk -operaatioissa leikkaussalimoduuliin valitulla 1,5 m³/s ilmavirralla pystytään kattamaan kaikki henkilömäärät kun käytetään puhdastilaleikkausvaatetusta, kertakäyttöistä leikkausvaatetusta ja yleistä leikkausvaatetusta, jossa materiaalina 50 % puuvillaa ja 50 % polyesteria. Leikkausvaatetus, jossa materiaalina käytetään 99 % polyesteria ja 1 % hiilikuitua voidaan leikkaussalissa suorittaa operaatioita, jossa paikalla on korkeintaan viisi henkilöä. Yleistä puuvillapohjaista leikkausvaatetusta, jossa puuvillan osuus on 69 %, ei voida käyttää millään henkilömäärillä high risk -operaatioissa.

Normal risk -operaatioissa kaikki liitteissä 5 ja 7 olevat laskelmien alaiset leikkaussalivaatetukset ja henkilömäärät leikkaussalissa ovat sallittuja.

Jos leikkaussalin ilmavirta mitoitetaan täysin CFU-pitoisuuden perusteella, voidaan neljän henkilön high risk -operaatioissa parhaalla vaatetuksella ilmavirtana käyttää pienimmillään 0,28 m³/s ja kahdeksan henkilön operaatioissa 0,56 m³/s. Kun taas huonoimmalla vaatetuksella neljän henkilön high risk -operaatioissa ilmavirran on oltava 2,0 m³/s ja kahdeksalla henkilöllä jopa 4,0 m³/s.

6.6.3 Lämpökuormat

Lämpökuormien tasaaminen leikkaussalissa on toinen ilmavirrat mitoittava tekijä. Lämmönlähteitä salissa ovat ihmiset ja salissa olevat laitteet sekä valaistus. Valaistuksena salissa päätettiin käyttää LED -valaisimia. Taulukoissa 9 ja 10 on esitetty salissa olevien ihmisten ja laitteiden tuottama lämpö.

TAULUKKO 9. Leikkaussalissa olevien ihmisten tuottama lämpökuorma /38/

| Henkilö | Aineenvaihdunnan teho (met) | Kokonaislämpö- kuorma (W) | Latentin lämmön osuus (%) | Tuntuva tasattava lämpökuorma (W) |
|------------------|--------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|
| Kirurgi | 2 | 209 | 55 | 94 |
| Anestesiahoitaja | 1 | 104 | 28 | 75 |
| Is hoitaja | 1,6 | 167 | 44 | 94 |
| Potilas | 0,8 | 84 | 28 | 60 |

TAULUKKO 10. Leikkaussalissa olevien laitteiden tuottama lämpökuorma /38/

| Lämmönlähde | Lämpökuorma (W/m ²) | Lämpökuorma (W/kpl) |
|------------------------|------------------------------------|---------------------|
| Tietokone/laite | 10 | 250 |
| Yleisvalaistus | | |
| Leikkaussalivalaisimet | | 145 |
| Kattokeskukset | | 220 |
| Näytöt | | 100 |

Lämpökuormien maksimitilanteessa ilmanvaihdolla tasattavan kokonaislämpökuorman leikkaussalissa voidaan arvioida olevan taulukon 11 mukainen.

TAULUKKO 11. Leikkaussalin ilmanvaihdolla tasattava kokonaislämpökuorma maksimikuormitustilanteessa

| Lämmönlähde | Määrä/kpl | Lämpökuorma (W) |
|--|-----------|-----------------|
| Tietokone/laitteet | 3 | 750 |
| Yleisvalaistus | 1 | 504 |
| Leikkaussalivalaisimet | 2 | 290 |
| Kattokeskukset | 3 | 660 |
| Näytöt | 3 | 300 |
| Kirurgi | 2 | 188 |
| Anestesiahoitaja | 1 | 75 |
| Is hoitajat | 5 | 468 |
| potilas | 1 | 60 |
| Ilmanvaihdolla tasattava kokonaislämpökuorma (W) | | 3295 |

Käytettäessä sekoittavaa ilmanjakotapaa voidaan tuloilma tuoda saliin maksimissaan 5 °C alilämpöisenä, mutta ei kuitenkaan alle 18 °C kylmempänä /37/. Kaavalla 13 voidaan riittävällä tarkkuudella laskea leikkaussalin sisäänpuhallusilman alilämmön tarve, kun tiedetään käytössä oleva ilmavirta ja tasattavat lämpökuormat.

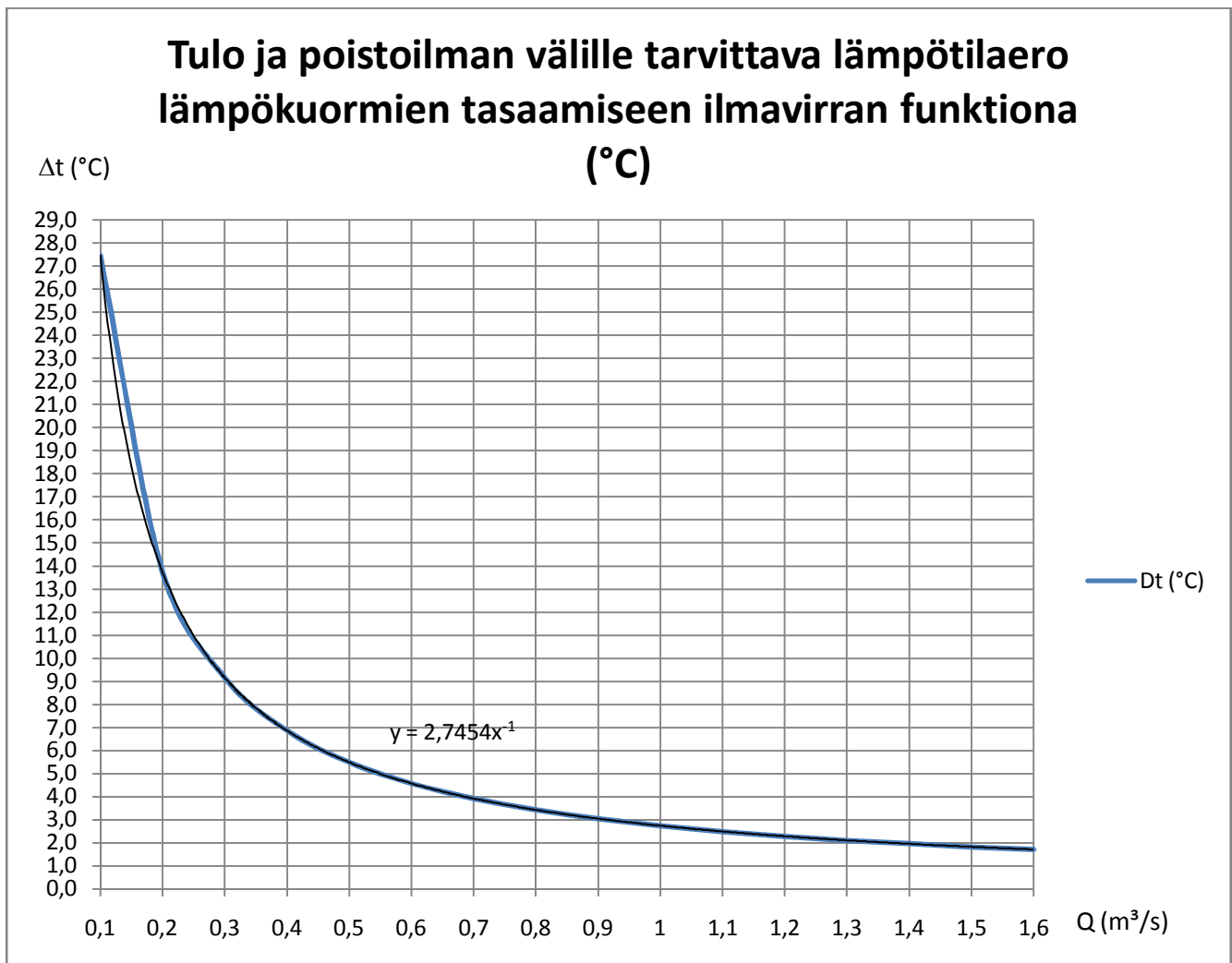
$$\Delta t = \frac{\Phi}{Q \cdot c_p \cdot \rho} \quad (13)$$

jossa

| | |
|------------|--|
| Δt | sisäänpuhallusilman ja poistoilman välinen lämpötilaero [°C] |
| Φ | tasattava lämpökuorma [W] |
| Q | tuloilmavirta [m³/s] |
| c_p | ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kg °C] |
| ρ | ilman tiheys [kg/m³] |

Taulukossa 11 olevan kokonaislämpökuorman tasaamiseen leikkaussaliin valitulla 1,55 m³/s maksimi-ilmavirralla, pitää sisäänpuhallusilman kaavalla 13 laskettuna olla 1,8 °C alilämpöistä verrattuna poistoilmaan. Jos taas käytetään lämpötilaerona suurinta sallittua eli 5 °C, voidaan ilmavirta pudottaa 0,55 m³/s. Tämän ilmavirran käyttö ei CFU- pitoisuuden kannalta katsottuna ole kuitenkaan mahdollista, koska minimi-ilmavirta kahdeksan henkilön operaatiossa parhaalla vaatetuksella liitteen 4 mukaan on 0,56 m³/s.

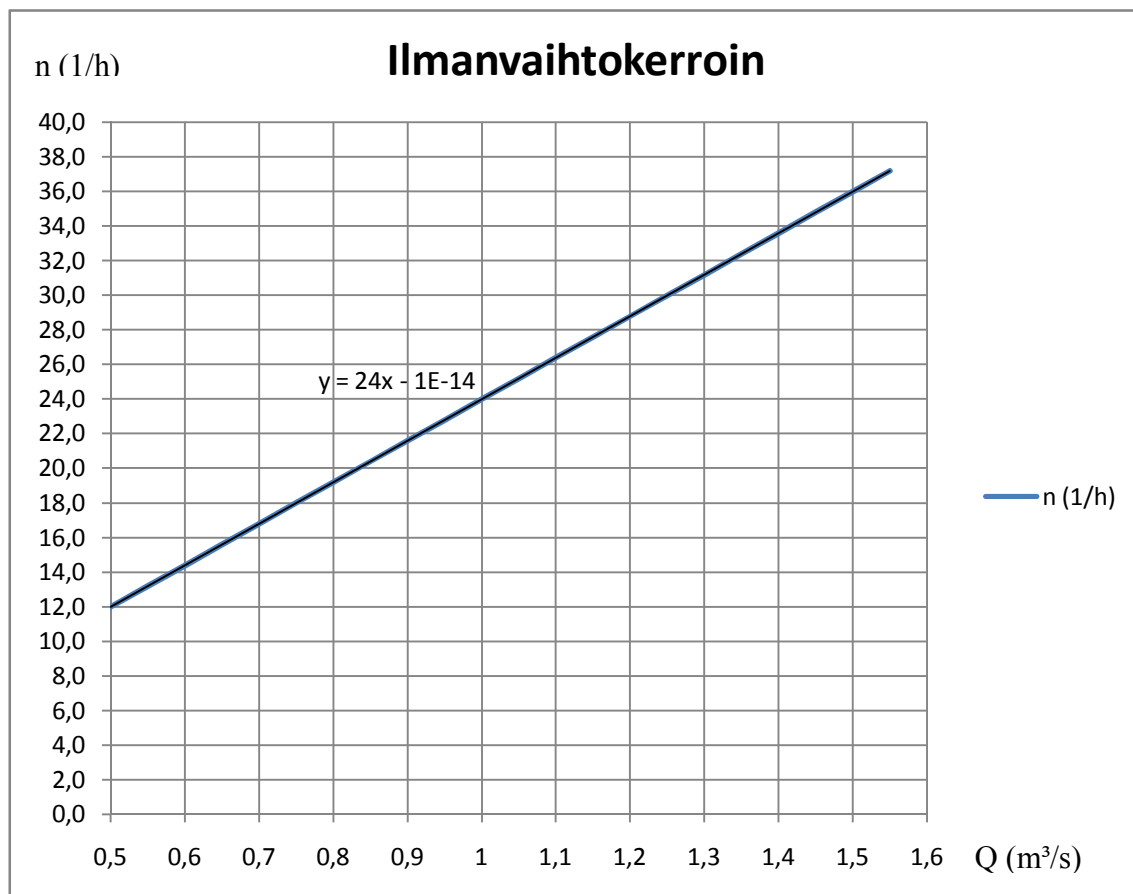
Oletettaessa, että tuloilma tuodaan saliin aina 18 °C lämpötilassa, tarkoittaa se sitä, että salissa oleva lämpötila on maksimi-ilmavirralla ja minimi alilämpöisyydellä 19,8 °C. Leikkaussalissa optimaalisin lämpötila on yleensä kuitenkin 21 °C ja tällöin lämpötilaeron ollessa 3 °C, voidaan ilmavirraksi valita 0,915 m³/s. Kuvasta 16 tulee hyvin esille tarvittava ilmavirtakohtainen lämpötilaero tulo- ja poistoilman välille leikkaussaliin lasketulla taulukon 11 mukaisella lämpökuormalla 3295 W. Kuvan 16 potenssi-funktion kaavaa voidaan käyttää ilmavirtakohtaisen lämpötilaeron tai lämpötilaero-kohtaisen ilmavirran laskentaan ilmavirtavälillä 0,2...1,6 m³/s ja lämpötilaerovälillä 0...14°C. Ilmavirtakohtaiset lämpötilaerot on laskettu kaavalla 13.



KUVA 16. Tulo- ja poistoilman välille tarvittava lämpötilaero lämpökuorman 3295 W tasaamiseen ilmavirran funktiona

6.6.4 Ilmanvaihtokerroin ja toipumisaika

Yleisen sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeen /29/ mukaan leikkaussalin ilmanvaihtokerroin tulisi olla >17 1/h. Kun ilmavirtojen mitoittavina kriteereinä pidetään CEN-standardin määrittämää CFU-pitoisuutta ja lämpökuormien tasaamista, tulee modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtokerroin asettumaan yli tämän. Kuvasta 17 tulee esille modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtokertoimen riippuvuus ilmavirrasta.

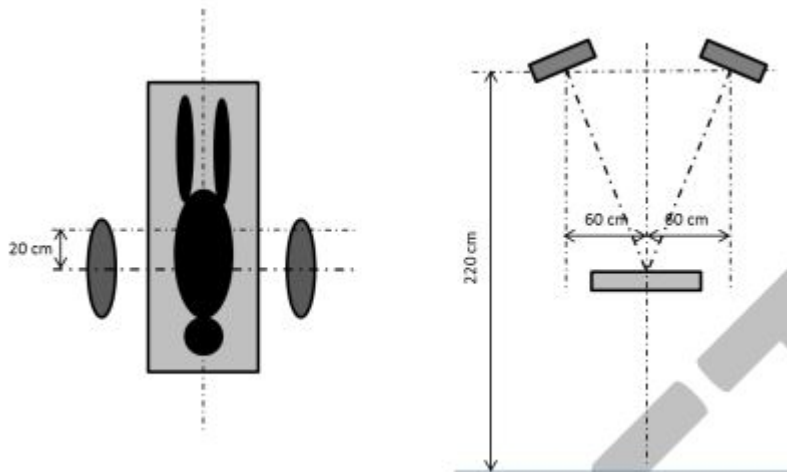


KUVA 17. Tilavuudeltaan 150 m³ olevan modulaarisen leikkaussalin ilmanvaihtokerroin ilmavirran funktiona

Tavoiteltaessa leikkaussaliin 21 °C lämpötilaa sisäänpuhallusilman ollessa 18 °C eli 3 °C alilämpöistä ja ilmavirran ollessa 0,915 m³/s suoran yhtälöllä laskettuna ilmanvaihtokertoimeksi saadaan 22 1/h.

Sekoittavalla ilmanjakotavalla toteutetussa leikkaussalissa tulee toipumisajan täyttää CEN-standardin vaatimukset tiettyjä testimenetelmiä noudattaen seuraavassa järjestyksessä. /27, s. 15/

- 1 Ennen mittauksia protected zone määrittäminen ja merkitseminen lattiaan sekä leikkaussalivalaisinten asettaminen kuvan 18 mukaisesti DIN 1946:n määrittämiin asentoihin.
- 2 ISO -luokituksen määrittäminen ISO 14644-1 mukaan protected zonelle ja mittapisteiden lukumäärän määrittäminen kaavan 14 mukaan.
- 3 Halutun toipumisajan määrittäminen kahdessa korkeimman hiukkaspitoisuuden omaavassa kohdassa 2 mukaan määritetyssä mittapisteessä. Näissä pisteissä hiukkaspitoisuuden laimentuminen 1:100 osaan alkutilanteen pitoisuudesta vie tietyn ajan. Salin toipumisaika näiden mittapisteiden ajoista on se, kummassa hiukkaspitoisuuden laimentuminen kestää kauemmin.



KUVA 18. Leikkaussalivalaisinten asennot määritettäessä toipumisaikaa (DIN1946) /27, s.16/

$$n = \sqrt{A_{\text{cleanzone}}} \quad (14)$$

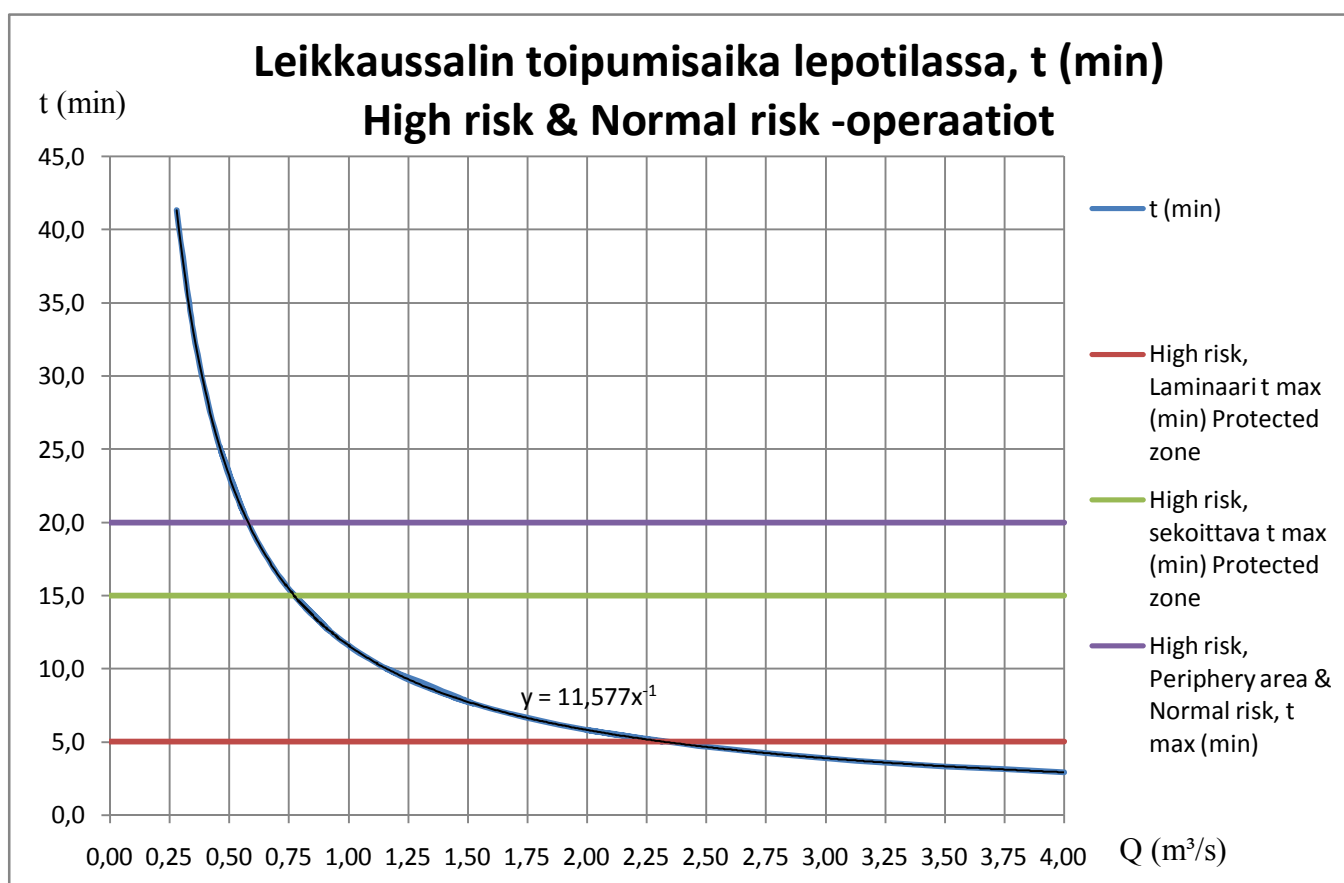
jossa

n tarvittavien mittapisteiden lukumäärä [kpl]

$A_{\text{cleanzone}}$ mittausten kohteena olevan puhtaan alueen pinta-ala [m^2]

Kaavalla 10 voidaan myös laskea salin teoreettinen toipumisaika, kun tiedetään ilmanvaihdon nimellisaikavakio, joka on ilmanvaihtokertoimen käänteisluku, hiukkaspitoisuus ennen epäpuhtauslähteiden poistumista salista ja tavoiteltava hiukkaspitoisuus.

Leikkaussalin suorituskriteerien mukaan, jotka löytyvät liitteestä 2, on at rest -tilassa olevalle leikkaussalille määritetty raja-arvot toipumisajoille. Sekä laminaarisella että sekoittavalla ilmanjakotavalla high risk -operaation jälkeen protected zonen alueella on omat määräykset toipumisajalle niin että laminaarisella sallittu toipumisaika on < 5 min ja sekoittavalla < 15 min. Normal risk -operaatioiden jälkeen riippumatta ilmanjakotavasta sekä high risk -operaatioiden jälkeen periphery area -alueella sallittu toipumisaika on < 20 min. Kuvassa 19 on esitetty nämä raja-arvot ja toipumisajan riippuvuus ilmavirrasta.



KUVA 19. Leikkaussalin toipumisaika ilmavirran funktiona sekä CEN-standardin määrittämät raja-arvot toipumisajalle

Kuvan 19 toipumisajan potenssifunktion yhtälöllä laskettuna saatiin CEN-standardin määrittämien raja-arvojen ilmavirroiksi seuraavat.

| | |
|--------|------------|
| 5 min | 2,315 m³/s |
| 15 min | 0,772 m³/s |
| 20 min | 0,579 m³/s |

6.7 Laitteisto, sijoitus ja mitoitus

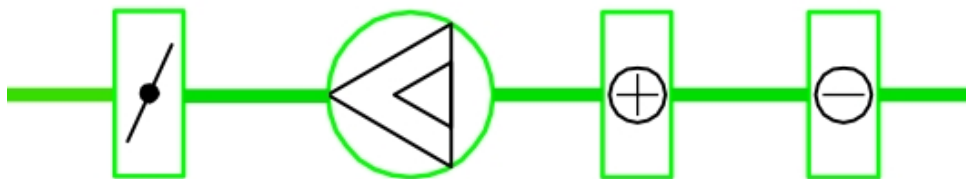
Laitteiston valinnassa pyrittiin käyttämään mahdollisimman pitkälle hankkeeseen osallistuvien yritysten tuotteita ja palveluita. Näin saadaan katettua koko moduulia koskevan tekniikan asiantuntemus suhteellisen pienellä asiantuntijajoukolla. Hankkeen ollessa käynnissä laitteiston sijoitus ja mitoitus elää jatkuvasti uusien ideoiden ja suunnitteluratkaisujen myötä. Tässä luvussa esitellyt ratkaisut ovat hankkeen tässä vaiheessa tiedossa olevaa tietoa siinä määrin kuin se on julkaisukelpoista.

6.7.1 Kiertoilma- ja make-up -kone

Ilmanvaihdon ensimmäisiä suunnittelutehtäviä oli leikkaussalin kiertoilmakoneen valinta ja karkea mitoitus. Mitoituskriteereinä oli CEN-standardin määrittämä halutun sisäilman tila-alue, joka löytyy liitteestä 3.

Varsinainen hankkeen kiertoilmakoneen toimittaja Koja Oy tuli mukaan hieman myöhemmässä vaiheessa, joten aluksi kone mitoitettiin käyttäen Fläktwoods ACON -mitoitusohjelmaa. Karkealla mitoituksella saatiin selville koneen ulkomitat, jotka oli tärkeää saada muiden suunnittelualojen tietoon tilanvarauksellisista syistä. Konemalleja testattiin useita erilaisia ja pohdittiin eri mahdollisuuksia vaak- sekä pystymalliselle koneelle. Lopulta päädyttiin pystymalliseen koneeseen, koska teknisen tilan koko ei mahdollistanut järkevää sijoitusta vaakamalliselle koneelle eikä moduulin ulkomittojen kasvattaminen tätä varten ollut mahdollinen vaihtoehto.

Kiertoilmakoneen ja kanavalaitteiden tehtävä on ylläpitää haluttua sisäilmastoa leikkaussalissa. Kiertoilmaa käsitteleviksi koneen osiksi moduulileikkaussalissa otettiin virtaussuunnan mukaisessa järjestyksessä, jäähdytyspatteri, lämmityspatteri, taajuusmuuttajasäätöinen puhallin ja moottoripelti. Koneeseen valitut osat tulevat esille kuvasta 20.



KUVA 20. Modulaarisessa leikkaussalissa käytettävän kiertoilmakoneen laitteet

Yleensä leikkaussalin kiertoilmakoneen osiksi näiden lisäksi otetaan äänenvaimennin ja suodatin ja mahdollisesti myös kostutin, mutta tilanvarauksellista syistä päädyttiin modulaarisessa leikkaussalissa käyttämään kanavaosia näiden osalta.

Kiertoilmakoneen lopullisen mitoituksen teki Koja Oy annettujen lähtötietojen perusteella. Mitoittavina tekijöinä kiertoilmakoneen mitoituksessa olivat ilmavirran riittävän pieni otsapintanopeus, jonka raja-arvona pidettiin n. 2,5 m/s. Myöskään koneen SFP-luku ei saisi nousta yli 1,0 kW/(m³/s), koska kyseessä on kone, jossa on vain yksi puhallin ja yksi ilman virtaussuunta. Modulaariseen leikkaussaliin valitulla koneella otsapintanopeus on < 2,0 m/s, mutta SFP-luku ylitti hieman sille asetetun vaatimuksen. SFP-lukua saadaan kuitenkin pienennettyä asentamalla imupuolen kanavistoon hieman isompi suodatin, joka laskee paineenkorotuksen tarvetta.

Puhaltimen mitoitukseen vaadittiin tieto tarvittavasta paineenkorotuksesta, joka leikkaussalin ilmanvaihtojärjestelmän kanaviston ja laitteiden painehäviöiden tasaamiseen tarvittiin. Puhallin mitoitettiin 600 Pa tarvittavan staattisen paineenkorotuksen mukaan. Myöhemmässä tarkastelussa painehäviöt saatiin pudotettua n. 470 Pa kasvattamalla imupuolen kanavasuolettimen kokoa.

Jäähdytys- ja lämmityspattereiden mitoituksen saneli CEN-standardin määrittämä liitteestä 3 löytyvä haluttu sisäilman tila-alue. Pattereiden tyyppiä valittiin vesikiertoiset mallit. Jäähdytyspatterin on kyettävä jäähdyttämään ilma liitteen 3 pisteestä 1 (24 °C / 60 %) 10 °C lämpötilaan pisteeseen 7. Tällöin ilmasta kondensoituu vettä n. 3,5 g/kg k.i, joten pystyssä olevan koneen poistupuolen kammioon tulee viemäroity kondenssivesiallas. Yksi kilo ilmaa on tilavuudeltaan n.0,83 m³. Ilmavirran ollessa 1,2 m³/s viemäroitävä vesivirta on.

$$q_v = \frac{1,2 \frac{m^3 k.i}{s} * \frac{0,0035 kg}{0,83 m^3 k.i}}{1000 kg/m^3} = 18,2 dm^3/h$$

Kesätilanteessa, jolloin sisäilman tila leikkaussalissa voi päästä lähelle pisteen 1 mukaista tilaa, on jäähdytyksellä mahdotonta kuivata ilmaa riittävästi, että voitaisiin saavuttaa pisteen 3 (18 °C / 40 %) mukaisen tilan vesisisällön osalta. Pisteen 2 (18 °C / 60 %) tila pystytään kuitenkin saavuttamaan. Jäähdytyspatterin tehontarpeen määrittivät pisteiden 1 ja 7 välisen entalpiaeron ja ilman massavirran tulo. Lämmityspatterilla

ilma pitää pystyä lämmittämään pisteen 7 10 °C:sta CEN-standardin määrittämään maksimilämpötilaan 24 °C. Lämmityspatterin tehontarpeen määritti näiden pisteiden välisen entalpiaeron ja ilman massavirran tulo. Näin ollen jäähdytys- ja lämmityspattereiden tehoiksi saatiin seuraavat.

| | |
|------------------|---------|
| Jäähdytyspatteri | 33,8 kW |
| Lämmityspatteri | 20,5 kW |

Make up -koneella tilaan tuodun ilman tila vaihtelee sääolosuhteiden mukaan ja näin ollen kiertoilmakoneella ja kanavistoon asennettavilla laitteilla tulee rakennusautomaation ohjaamana hallita olosuhteita leikkaussalissa tästä huolimatta. Pää tarkoitus make up -koneella on hallita leikkaussalin painesuhteita ja tuoda tilaan raitista tuloilmaa. Vielä on suunnittelun alla, että määritetäänkö sairaalakiinteistön make up -ilman tilalle jokin tietty vaatimus, jotta olosuhteita salissa voidaan hallita halutusti, kun ollaan ottamassa käyttöön ja käytetään sinne asennettua modulaarista leikkaussalia.

6.7.2 Kanavisto ja laitteet

Kanavisto leikkaussaliin suunniteltiin siten, että se mahtui hyvin alakattotilaan muun tekniikan ja tukirakenteiden kanssa. Kanavamateriaalina käytetään sinkittyä terästä, paitsi virtaussuunnassa kaksi metriä kanavaan asennettavan höyrykostuttimen jälkeen on kanavan oltava haponkestävää terästä (hFe). Kiertoilmakoneen tulopuolen kanavisto tulee eristää.

Kanavisto saatiin suunniteltua niin, että suurin osa ilmanvaihtojärjestelmän huoltoa vaativista laitteista on teknisen tilan puolella. Näitä ovat itse kiertoilmakone laitteineen, kanavistoon asennettavat äänenvaimentimet imu- ja painepuolelle, kanavistoon asennettava höyrykostutin ja kanavasuo datin. Kanavasuo dattimena imupuolella käytetään F7-luokan suodatinta. Teknisen tilan jäähdytyksestä tulee huolehtimaan puhallin-konvektori.

Leikkaussalin alakattotilassa ilmanvaihdon laitteita ovat make up -ilman kanavistossa käytetyt rakennusautomaation ohjaamat Halton Oy: n HFB -ilmavirtasäätimet sekä näistä aiheutuvan äänen absorboivat äänenvaimentimet. Tuotetiedot ilmavirtasäätimestä löytyvät liitteestä 11. Näiden lisäksi jokaisella tuloilman päätelaitteella on oma

mittaus- ja säätömoduuli eli säätöpelti. Säätöpelteinä käytetään Halton Oy:n PRA -mittaus- ja säätömoduuleita. Tuotetiedot säätöpellistä löytyvät liitteestä 12.

Ilman kostutus tapahtuu sähkötoimisella kanavaan asennettavalla kostuttimella, joka höyrystää vettä ilmaan tarvittavan määrän. Höyryllä kostuttaessa, ilman vesisisältö muuttuu mollier -käyrästöllä (liite 3) vaakasuorassa vakioämpötilassa. Maksimiteho, mikä kostuttimelta vaaditaan perustuu höyrystettävän veden määrään, joka ilman täytyy sitoa. Salin tuloilmavirrasta 0,35 m³/s on make up ilmaa, jolle ei ole kosteusvaatimusta, kun se tuodaan modulaariseen leikkaussaliin. Näin ollen pääpaino höyrykostuttimen mitoituksessa on make up ilman kostutuksen tarve kuivimmasta mahdollisesta tilanteesta niin, että make up -ilman tila saavuttaa CEN -standardin määrittämän sisäilman tila-alueen. Talvitilanteessa make up ilman vesisisältö on hyvin lähellä 1 g/kg k.i. Saavuttaakseen sisäilman tila-alueen puolivälin, on make up ilmaa kostutettava 7 g/kg k.i. Käytössä oleva ilmavirta 0,35 m³/s muutettuna massavirraksi on 0,42 kg/s. Veden normaalin höyrystymislämmön ollessa 2,26 kJ/g saadaan edellä mainituista höyrystimen tehoksi seuraava.

$$\Phi = 7,0 \frac{g}{kg \text{ k.i.}} * 2,26 \frac{kJ}{g} * 0,42 \frac{kg \text{ k.i.}}{s} = 6,64 \text{ kW}$$

6.7.3 Päätelaitteet

Tuloilman päätelaitteina käytetään Halton Oy:n H14 -luokan HEPA-suodatuksella varustettuja DHN-595 -suutinhajottajia. Päätelaitteita saliin sijoitetaan yhteensä 18 kpl leikkaussalin protected zonen yläpuolelle alakattopinnan tasalle, ja niillä muodostetaan 3,0 m * 3,6 m kokoinen suorakaiteen muotoinen alue. DHN-595 -päätelaitteiden tarkka koko on 595 x 595, joten alakattorakenteen muodostuessa 0,6 m * 0,6 m kokoisista kattoelementeistä, sopivat päätelaitteet juuri näihin ruutuihin.

Make up -ilma tuodaan neljälle näistä päätelaitteista, joten 350 dm³/s ilmavirta jakaantuu näiden kesken niin, että yhden päätelaitteen ilmavirta on 87,5 dm³/s. Kiertoilmakoneen 1,2 m³/s ilmavirta jakaantuu lopuille 14 päätelaitteelle niin, että yhden päätelaitteen ilmavirta on 85,7 dm³/s. Päätelaitteiden painehäviö on n. 150 Pa, josta HEPA-suodattimen osuus on n.120 Pa. Suodattimen koko on 457 x 457. Päätelaitteen tuotetiedot löytyvät liitteestä 13.

Poistoilman päätelaitteina alapoistoissa käytetään tämänhetkisen suunnitelman mukaan Halton Oy:n AGF-570x270 päätelaitteita ja yläpoistoissa AGC-300x150 päätelaitteita. Lisäksi alakattotilasta poistettavan ilman päätelaitteena toimii URH-125. Leikkaussalin yhden nurkan ja alakattotilan ilmanpoiston hoitaa make up -kone ja kolme muuta nurkkaa hoitaa kiertoilmakone.

Make up -poistoilma jakaantuu niin, että AGF:llä poistetaan 215 dm³/s, AGC:llä 65 dm³/s ja URH:lla 20 dm³/s. Kiertoilmakoneen hoitamisessa kolmessa nurkassa ilmvirta jakautuu nurkkakohtaisesti niin, että AGF:llä poistetaan 300 dm³/s ja AGC:llä 100 dm³/s. Poistoilmavirtojen säätö toteutetaan päätelaitteilla eli erillisiä säätöpeltejä ei tulla käyttämään. Tuotetiedot poistoilman päätelaitteista löytyvät liitteestä 14. AGF:ien painehäviöt 300 dm³/s ilmavirralla kasvavat yli 100 Pa. Hyvänä painehäviönä poiston päätelaitteelle voidaan kuitenkin pitää 20-50 Pa Näin ollen alapoistoissa tulisi käyttää päätelaitteita, joissa on suurempi vapaa pinta-ala. Tällä saadaan alapoistojen painehäviötä pienennettyä ja samalla puhaltimen paineenkorotuksen tarvetta edelleen pienemmäksi ja päätelaitteen äänitasoa alaspäin.

6.8 Ilmanvaihdon äänitaso

CEN-standardin mukaan leikkaussalin äänitaso ei saa olla yli 48 dB(A) (luku 5.2). Ilmanvaihdon kannalta leikkaussalin äänilähteitä ovat päätelaitteet. Ääntä kulkeutuu kanavistoa pitkin päätelaitteelle, ja ääni on lähtöisin ilmastointikoneesta. Myös päätelaite itsessään ilmavirran vaikutuksesta tuottaa ääntä. MagiCAD-suunnitteluohjelma ilmoittaa laskennan jälkeen päätelaitekohtaisen äänenpainetason päätelaitteen lähellä. Ilmoitetussa arvossa on huomioitu ilmastointikoneen tuottama ääni, kanavistoääni ja päätelaitteesta tuleva ääni. Ohjelma laskee oletuksena oktaavikaistakohtaiseksi huonevaimennukseksi 4dB ja suorittaa A- painotusvaimennuksen kullekin oktaavikaistalle ja näin ollen tulos voidaan ilmoittaa yksikössä dB(A).

Tuloilmakanavistoon virtaussuunnassa heti kiertoilmakoneen moottoripellin jälkeen on suunnitelmissa sijoitettu kulmaäänenvaimennin joka absorboi suurimman osan äänitehosta. Myös päätelaitteiden HEPA-suodattimet absorboivat melko hyvin äänitehoa. Näin ollen yksittäisen DHN -pätelaitteen tuottama äänenpainetaso lähellä päätelaitetta MagiCAD-laskennan mukaan on n. 20 dB(A).

Poistokanavistoon virtaussuunnassa heti ennen kiertoilmakonetta olevaa kanavasuodatinta ennen on äänenvaimennin, mutta ei niin hyvin ääntä absorboiva kuin tulopuolen kulmaaäänenvaimennin. Myöskään poistoilman päätelaitteet eivät absorboi ääntä juuri-kaan, koska niissä ei käytetä tulopuolta vastaavaa suodatusta tai suodatusta ei ole ollenkaan. Poistoilman päätelaitteiden lähellä olevat keskimääräiset äänenpainetasot MagiCAD-laskennan mukaan ovat.

| | |
|---------------------|--------------|
| AGF -kiertoilmakone | 3 x 38 dB(A) |
| AGF -make up -kone | 1 x 29 dB(A) |
| AGC -kiertoilmakone | 3 x 30 dB(A) |
| AGC -make up -kone | 1 x 20 dB(A) |
| URH -make up -kone | 1 x 20 dB(A) |

Make up -ilman päätelaitteiden tuloksia ei voi pitää luotettavina, koska make up -koneen äänitietoja ei suunnittelun tässä vaiheessa ole vielä saatavana ja näin ollen ilmoitetussa äänenpainetasossa on huomioitu ainoastaan leikkaussalin seinien sisäpuolelle jäävän make up -kanavaosuuden ja päätelaitteiden ilmapirrasta aiheutuva ääni. Make up -ilman äänenpainetasoina suuntaa-antavassa laskennassa käytetään tämän vuoksi samoja äänenpainetasoja kuin kiertoilmakoneen päätelaitteissa. Kaikkien päätelaitteiden yhteenlaskettuna äänenpainetason likiarvona voidaan pitää kaavalla 15 laskettua äänenpainetasoa. /40./

$$L_p = 10dB * \lg \left(10^{\frac{L_{p1}}{10dB}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10dB}} + \dots 10^{\frac{L_{pn}}{10dB}} \right) \quad (15)$$

jossa

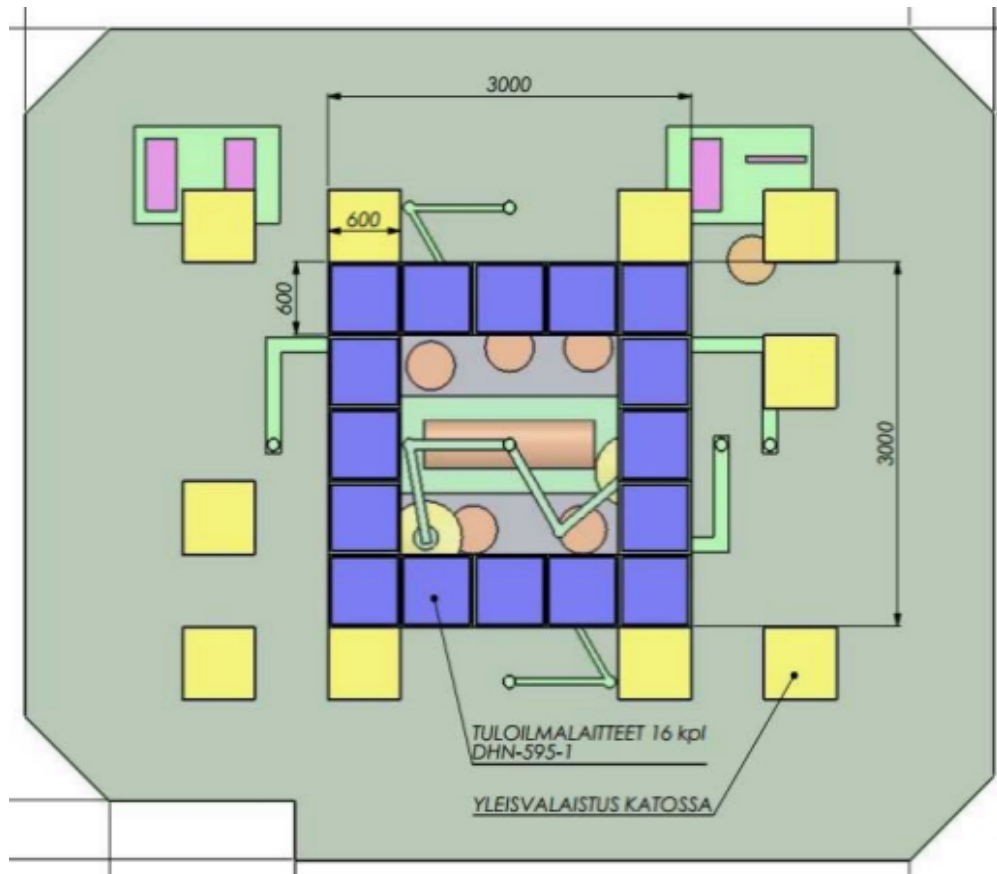
| | |
|-------------------------------|--------------------------------------|
| L_p | A- painotettu äänenpainetaso [dB(A)] |
| $L_{p1}, L_{p2} \dots L_{pn}$ | osaäänien äänenpainetasot [dB(A)] |

Kaavalla 15 lasketuksi suuntaa-antavaksi teoreettiseksi äänenpainetasoksi kaikille tulo- sekä poistoilman päätelaitteille saatiin yhteensä 45 dB(A), joka täyttää CEN-standardin vaatimuksen. Suuntaa-antavassa tarkastelussa ei ole myöskään huomioitu kiertoilmakoneen aiheuttamaa rakenteiden kautta ja läpi kulkeutuvaa ääntä. Todelliset äänitasot leikkaussalissa saadaan vasta VTT:n suorittamien mittausten perusteella tehdyillä tarkemmilla laskelmilla.

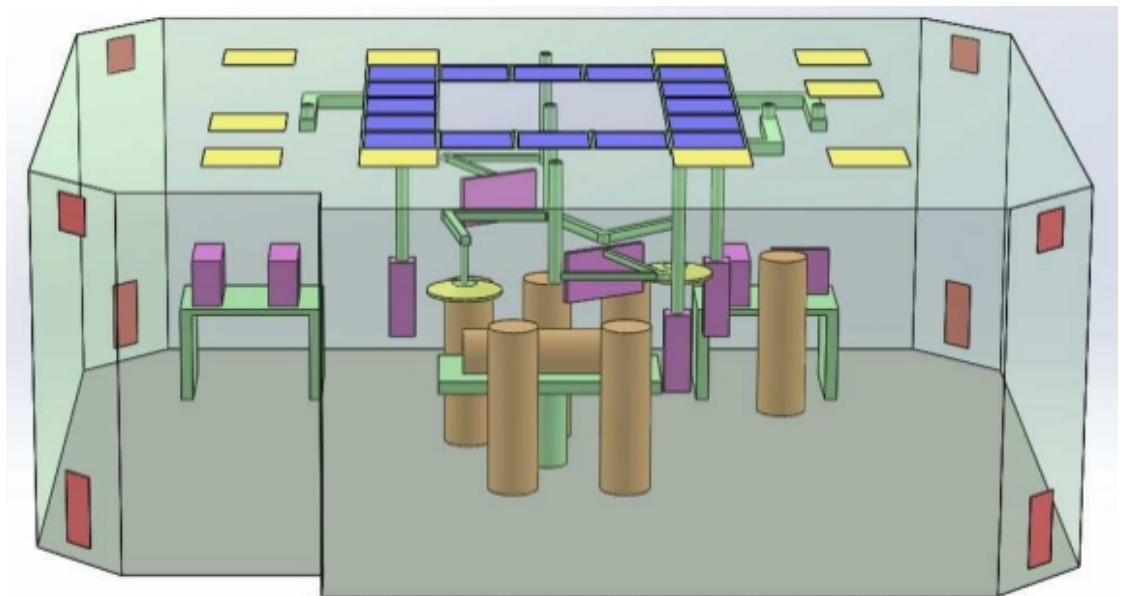
6.9 CFD-simulointi

Ensimmäisen, hankkeen muille osapuolille julkaisukelpoisen ilmanvaihtosuunnitelman perusteella Halton Oy toteutti leikkaussalin sisäilmaston CFD-simuloinnin, jonka tarkoitus oli tutkia ilmanjakoa leikkaussalissa. Simuloinnin tavoitteena oli saada puhtaan ilman vyöhyke leikkauspöydän ympärille. Simulointi suoritettiin vain jäähdytys-tilanteesta, koska leikkaussali on tarkoitus sijoittaa rakennuksen sisälle ja näin ollen salissa ei ole lämmitystarvetta vaan ainoastaan sisäisiä lämpökuormia.

Simulointi toteutettiin sillä oletuksella, että tuloilmassa ei ole pienhiukkasia HEPA-suodatuksen ansioista. Kiertoilmakoneen ilmankäsittelyprosessit eivät sisälly tähän olosuhdesimulointiin. Simulointi suoritettiin suunnittelun alkuvaiheessa saatavilla olleiden lähtötietojen perusteella ja tämän takia leikkaussalin muoto ja koko eivät ole täysin samat nykytilanteen kanssa, mutta tulokset antavat kuitenkin selkeän kuvan ilmavirtojen käyttäytymisestä salissa ja päätelaitteiden suutinten suuntauksen vaikutuksesta ilman nopeuksiin leikkauspöydän alueella. Kuvista 21 ja 22 tulee esille ilmanvaihdon päätelaitteiden, valaisinten ja muiden laitteiden sekä lämmönlähteiden sijoittuminen leikkaussalissa simuloinnin aikana. Tuloilman päätelaitteet on merkitty sinisellä, poistoilman päätelaitteet punaisella, laitekuormat violetilla, valaistus keltaisella ja ihmiset ruskealla.



KUVA 21. Pohjakuva simuloitavasta leikkaussalista laitteineen ja lämpökuormineen /38/



KUVA 22. Simuloitava leikkaussali yläkulmaperspektiivistä laitteineen ja lämpökuormineen /38/

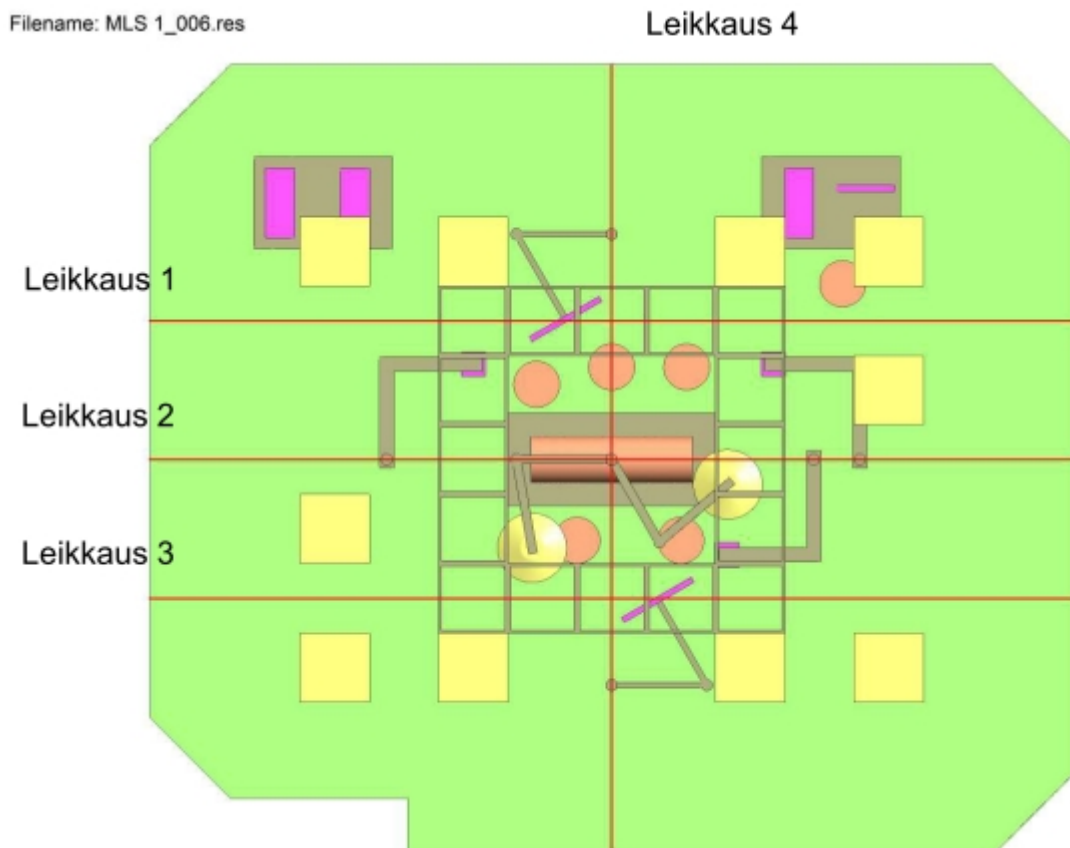
Ilmanvaihdon päätelaitteina simuloinnissa käytettiin samoja päätelaitteita kuin luvussa 6.6.3 mainitut. Kuitenkin sillä erotuksella, että lukumäärällisesti tuloilman päätelaitteita on kaksi vähemmän kuin tuoreimmissa suunnitelmissa, joiden perusteella tehtävä simulointi on vielä valmistelun alla.

6.9.1 Tuloilman päätelaitteet

Tuloilmavirta per hajottaja oli $97 \text{ dm}^3/\text{s}$, josta $75 \text{ dm}^3/\text{s}$ on kiertoilmaa ja $22 \text{ dm}^3/\text{s}$ make up -ilmaa. Simuloinnissa DHN -pätelaitteiden suuttimet käännettiin niin, että puolet suuttimista puhaltaa kohti keskialuetta ja puolet kohti reuna-aluetta. Ennen kokonaisvaltaista simulointia määritettiin yksittäisen päätelaitteen nopeusjakauma, jota käytettiin lähtöarvona simulointiin. Liitteestä 15 tulee esille DHN -pätelaitteen suutinten asennot, nopeusjakauma ja heittokuvio.

6.9.2 Leikkaussalin ilman nopeus- ja lämpötilajakauma

Simuloinnissa tuloksia otettiin useasta eri leikkauskuvannosta, jotka tulevat esille kuvasta 23.



KUVA 23. Simuloinnissa käytetyt leikkauskuvannot /38/

Tarkasteluun otetaan leikkaukset 2 ja 4, koska olosuhteiden selvittäminen leikkauspöydän alueella on potilaan hyvinvoinnin kannalta tärkeintä.

Simuloinnissa leikkaussalin keskiarvolämpötilaksi saatiin 21,8 °C ja poistoilman lämpötilaksi 22,2 °C. Ilman keskiarvonopeudeksi oleskeluvyöhykkeellä saatiin 0,2 m/s. Hajontaa nopeuksissa salin eri alueilla kuitenkin oli merkittävästi. Liitteestä 16 tulee esille leikkaussalin ilman heittokuviot ja nopeusjakauma 0,5 m/s ylittävillä alueilla yläkulmaperspektiivistä. /38./

Leikkauskuvannoista 2 ja 4 tulee parhaiten esille olosuhteet leikkauspöydän alueella. Ilman lämpötila- ja nopeusjakauma näistä kuvannoista löytyy liitteestä 17.

Lämpökuormana simuloinnissa käytettiin kuuden henkilön, valaistuksen ja laitteiden tuottamaa laskennallista yhteislämpökuormaa, joka oli 3166 W. Kokonaisilmavirtana simuloinnissa käytettiin samaa, kuin on tarkoitus käyttää modulaarisessa leikkaussalissakin maksimi-ilmavirtana.

7 YHTEENVETO

CEN-standardi määrittää ilmanvaihdon mitoittavaksi tekijäksi leikkaussalin operaation aikaisen CFU-pitoisuuden. Tämä tulee vaikuttamaan merkittävästi tulevaisuuden sairaalahygieniaan ilmanvaihdon osalta. Sairaalainfektioiden ilmaantuvuuden ollessa yksi keskeisimpiä laatukriteereitä sairaaloille, voidaan infektioiden ehkäisyyn tähtääviä investointeja pitää taloudellisesti yhtenä kannattavimmista ehkäisevän terveydenhuollon toimista. Lisäksi uusilla mitoitusperusteilla parannetaan myös merkittävästi akuuttia potilasturvallisuutta sekä ehkäistään myös myöhemmin kuntoutusta vaativien väliaikaisten tai pysyvien invaliditeettien syntymistä. Potilasturvallisuuden kannalta merkittävimpinä ehkäisevän terveydenhuollon toimina voidaan kuitenkin pitää asianmukaista leikkaustekniikkaa ja antibioottien käyttöä, mutta CEN-standardin mukaisella ilmanvaihdon suunnittelulla voidaan ilmanvaihdosta aiheutuva infektioriski minimoida.

Aikaisemmissa leikkaussali-ilmanvaihdon suunnitteluohjeissa mitoittavana tekijänä on pidetty ilmanvaihtokerrointa, joka on ollut yksinkertainen ja selkeä mitoitusperuste. CEN-standardin mukainen mitoitus kuitenkin vaatii aina CFU-pitoisuuden mitta-

uksia, jotka nostavat toteutettavan työn kustannuksia. On kuitenkin huomioitava, että suhteutettuna Amerikassa tehdyt kustannuslaskelmat Suomen mittakaavaan, nousevat Suomen vuosittaiset sairaalainfektioiden aiheuttamat kustannukset jopa 100 miljoonaa euroon.

7.1 Vaatetus ja ilmavirta

Tutkimukset osoittivat, että sekoittavalla ja laminaarisella ilmanjakotavalla toteutettujen leikkaussalien leikkausten aikaisten infektioiden määrässä ei ollut merkittäviä eroja. Sekoittavalla ilmanjakotavalla voidaan käyttää selkeästi pienempiä ilmavirtoja ja tällä on merkittävä kustannusvaikutus sairaaloille. Vanhemmat tutkimukset ovat kuitenkin ristiriidassa uudempien kanssa leikkaussalin CFU-pitoisuuden suhteen, kun vertaillaan sekoittavan ja laminaarisen ilmanjakotavan vaikutuksia salin CFU-pitoisuuteen ja tätä kautta infektioiden määrään. Merkittävänä syynä tähän voidaan pitää rakennusmateriaalien ja rakenteiden kehitystä vähemmän epäpuhtauksia emittoivaan suuntaan sekä ovien kehitystä tiiviimmäksi ja ovikurin parantumisesta. Tärkeimpänä syynä on kuitenkin mikrobilähteiden emission minimoinnin kehitys.

Ihminen on leikkaussalissa merkittävin mikrobilähde, joten käytetyn leikkaussalivaatetuksen vaikutus ihmisen tuottamaan epäpuhtauslähteen voimakkuuteen on tuoreimpien tutkimusten perusteella hyvin merkittävä. Tutkimusten perusteella on pystytty kehittämään laskentamallit (luku 4) sekoittavalla ilmanjaolla toteutettuun leikkaussaliin, jossa huomioidaan eri vaatetus- ja materiaalityypeistä riippuva epäpuhtauslähteen voimakkuus. CEN-standardin määrittäessä leikkaussaliin sen tilavuudesta riippumattoman tasapainotilan CFU-pitoisuuden, voidaan laskentamallin avulla määrittää leikkaussaliin tarvittava ilmavirta, kun henkilökunta on puettu tietyllä tavalla. Näin suunnittelu- ja rakennustyö voidaan käynnistää ja suorittaa laskentamallin antaman tiedon perusteella. Todentamismittaukset tulee valmiille salille kuitenkin suorittaa, koska laskentamalli on täysin teoreettinen eikä ota huomioon ilmavirran tiellä olevia esteitä tai konvektiovirtauksia, mutta se antaa kuitenkin päteivät likiarvoiset mitoitusperusteet.

Vaatetuksen vaikutuksesta leikkaussalin ilmanvaihdon tarpeeseen, infektioiden määrän vähentämiseen ja tätä kautta kustannusten laskemiseen olisi hyvä informoida sairaaloiden henkilökuntaa. Liitteet 6 ja 7 antavat maallikollekin selkeän kuvan vaatetuksen laadun ja pukeutumisen tärkeydestä leikkaussaleissa.

7.2 Modulaarinen leikkaussali

Modulaarisen leikkaussalin peruslähtökohtana tulee suunnittelun ja rakentamisen aikana pitää, kuten nimikin kertoo, modulaarisuutta. Modulaarisuudella tarkoitetaan rakenteellisesti sellaista ratkaisua, joka on muuntojoustava. Leikkaussalissa suoritetaan useita erilaisia operaatioita ja kirurgeilla on myös erilaisia mieltymyksiä laitteiden sijainnin suhteen. Näin ollen oikeilla tuki- ja alakattorakenteiden suunnitteluratkaisuilla saadaan tarvittaessa kaikki laitteet, kuten yleis- ja leikkaussalivalaisimet, kattokeskukset ja monitorointivarret siirrettäviksi hyvin pienellä vaivalla ja tämä on hyvin merkittävä kilpailutekijä, kun valmista tuotetta aletaan markkinoida.

Nykyään leikkaussaleissa laitteet ovat koko lailla kiinteästi asennettuja ja muutosten tekeminen tarkoittaa, että sali on pois käytöstä useita päiviä. Modulaarisuus huomiovalla suunnittelulla ja rakentamisella käyttökato on mahdollista lyhentää jopa yhteen työpäivään. Muutokset voidaan myös tehdä yöaikaan ja tällöin leikkaustoiminta voidaan uudella laitejärjestyksellä aloittaa heti aamulla, kun muutostyöt aloitetaan illalla. Tällaisella ratkaisulla leikkaussalin käyttöastetta saadaan nostettua huomattavasti ja pystytään mahdollisesti jopa vähentämään salien määrää.

Leikkaussalin olosuhteet olisi hyvä olla myös henkilökunnan hallittavissa. Parhaana vaihtoehtona voisi pitää kosketusnäytöltä ohjattavia leikkaussaliolosuhdeprofiileja, joita järjestelmään voisi tallentaa useita erilaisia esimerkiksi kirurgikohtaisten mieltymysten tai leikkausoperaation mukaan. Helppokäyttöisyys tulisi olla päälähtökohta tällaisen järjestelmän suunnittelulle eli olosuhteita olisi hyvä pystyä muuttamaan muutamalla napin painalluksella ilman erityistä säätöä ja teknistä asiantuntemusta.

Liitteiden 4 - 7 laskelmien perusteella voidaan myös todeta, että hyvällä vaatetuskonaisuudella leikkaussalissa voidaan useassa operaatiossa käyttää osailmavirtaa modulaarisen leikkaussalin maksimi ilmavirran 1,55 m³/s sijaan, joka on merkittävä energiansäästöllinen etu.

CFD-simuloinnin tulosten perusteella voimme liitteiden 16 ja 17 perusteella huomata, että leikkauspöydän alueella ilman nopeudet ovat hyvin suuret (> 0,5 m/s). Ilman nopeudelle leikkaussalin oleskeluvyöhykkeellä ei ole annettu raja-arvoa, mutta nopeuden tulisi kuitenkin olla alle 0,5 m/s. DHN -päätelaitteiden suutinten suuntauksella voi-

daan kuitenkin ilman nopeuksia laskea merkittävästi näillä alueilla. Näin ollen seuraavaan simulointiin suutinten asennot olisi hyvä muuttaa niin, että keskialuetta kohti puhalletaan 1/3 tai 1/4 -osa päätelaitteen ilmasta ja reuna-alueelle näin ollen 2/3 tai 3/4 -osa ilmavirrasta. Suunnittelun edetessä Halton Oy jatkaa simulointeja ja pyrkii optimoimaan tuloilman päätelaitteet niin, että haluttu tulos saavutetaan.

7.3 Jatkokehitys

Tulevaisuudessa olisi tärkeää tutkia amerikkalaisen laskelman perusteella Suomeen suhteutetun sairaalainfektioiden aiheuttamien kustannusvaikutusten todenmukaisuus ja selvittää mikä voisi olla CEN-standardin mukaisilla perusteilla mitoitettun ilmanvaihdon kustannusvaikutus verrattuna tavanomaisesti mitoitettuun.

Lisäselvitystä olisi myös hyvä tehdä modulaarisen leikkaussalin soveltuvuudesta saaneerauskohteisiin. Tämä siksi, koska Suomessa sairaaloiden tukipilarijako on modulaarisen leikkaussalin pituuteen nähden melko tiheä ja näin ollen ei todennäköisesti voida välttää pilarin osumisesta leikkaussalin kohdalle. Pilarien sijainnit tulee huomioida toteutuksessa ja tämä tulee aiheuttamaan muutoksia suunnitelmiin. Kohdekohtaisella suunnittelulla modulaarinen sali voidaan kuitenkin aina toteuttaa.

Yleisesti käytössä olevan sairaalailmanvaihdon suunnitteluohjeessa määritellään, että ilmanvaihtokertoimen leikkaussaleissa tulee olla $> 17 \text{ l/h}$, jota pidetään kokemusperäisenä hyvän leikkaussali-ilmanvaihdon minimimääränä. Lisäksi suunnitteluohjeen mukaan tällä voidaan varmistaa leikkaussalin ilmaan päässeiden anestesiakaasujen riittävä poisto. Leikkaussaleissa kuitenkin yleensä noin 3/4 -osaa ilmasta on kiertoilmaa, joten tällöin huoneilmaan päässeistä anestesiakaasuista myös 3/4 -osaa jää kiertoilmaan. Modulaarisessa leikkaussalissa make up -poistoilmavirran ollessa $0,3 \text{ m}^3/\text{s}$ on raittiin make up -ilman osalta tilavuudeltaan 150 m^3 leikkaussalin ilmanvaihtokerroin $7,2 \text{ l/h}$. Leikkaussalin ilmaan päässeitä anestesiakaasuja laimentava ilmanvaihtokerroin on siis tuo $7,2 \text{ l/h}$. Tämän perusteella voidaan todeta, että anestesiakaasujen poiston kannalta merkittävää ei ole kokonaisilmanvaihtokerroin vaan kaasunpoiston tehokkuus sekä raittiin make up -ilman määrä. Tulevaisuudessa olisi siis tärkeää selvittää todellinen anestesiakaasujen laimennustarve leikkaussaleissa tai käyttää kiertoilmassa HEPA-suodatuksen lisäksi myös kaasusuodatusta.

LÄHTEET

1. Karttunen, Hannu & Koistinen, Jarmo & Saltikoff, Elena & Manner, Olli. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Helsinki: Tähtitieteellinen yhdistys Ursa ry. 2008.
2. Korkala, Tapio & Laksola, Jaakko 2012. Ilmastointi, Hoito ja huolto. Helsinki: Kiinteistöalan Kustannus Oy.
3. Sisäilmayhdistys ry. WWW-dokumentti.
<http://www.sisailmayhdistys.fi/terveelliset-tilat/tietojarjestelma/kosteusvauriot/kosteustekninen-toiminta/ilman-ominaisuudet/>. Päivitetty 27.1.2014. Luettu 27.1.2014.
4. Ahokainen, Johannes 2012. Asuinrakennuksen jäähdytyksen kosteustekniset vaikutukset ulkoseinärakenteisiin ja asumisterveyteen. Saimaan ammatti-korkeakoulu. Rakennustekniikka. Opinnäytetyö.
5. Helsinki Dynamicum, Ilmatieteen laitos. WWW-dokumentti.
<http://ilmatieteenlaitos.fi/lampotila-ja-kosteus#15>. Päivitetty 27.1.2014. Luettu 27.1.2014
6. Helsingin yliopisto 2013. WWW-dokumentti.
http://www.edu.helsinki.fi/malu/kirjasto/mittausautomaatio/4_lampo.htm. Päivitetty 30.7.2013. Luettu 27.1.2014.
7. Ohio University. WWW-dokumentti.
http://www.ohio.edu/mechanical/thermo/property_tables/air/air_Cp_Cv.html. Päivitetty 22.4.2010. Luettu 28.1.2014.
8. Seppänen, Olli 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo: Kirjapaino kiitorata Oy.
9. Seppänen, Olli & Seppänen, Matti 2007. Rakennusten sisäilmasto ja LVI-teknikka. Espoo: SIY Sisäilmatieto Oy.
10. Seppänen, Olli 2004. Ilmastoinnin suunnittelu. Helsinki: Talotekniikka-Julkaisut Oy.
11. Rakennustieto Oy. LVI-ohjekortti LVI 70-40028 Optimilämpötilan valinta 1993. PDF-dokumentti. Luettu 30.1.2014.
12. Rakennustieto Oy. LVI-ohjekortti LVI 70-40030 Sisäilman epäpuhtaudet 1993. PDF-dokumentti. Luettu 30.1.2014.
13. Rakennustieto Oy 2014. LVI-ohjekortti LVI 30-10333 Ilmanvaihtolaitteiden äänitekkinen suunnittelu ja äänenvaimennus asuinrakennuksissa 2002. PDF-dokumentti. Luettu 4.2.2014.
14. Ympäristöministeriö 2011. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet 2012. PDF-dokumentti. http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf. Luettu 7.2.2014.

15. Ympäristöministeriö. WWW-dokumentti. http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaaray_skokoelma. Päivitetty 10.2.2014. Luettu 10.2.2014.
16. Rakennustieto Oy. LVI-ohjekortti LVI 05-10440 Sisäilmastoluokitus 2008. PDF-dokumentti. Luettu 11.2.2014.
17. Kalliomäki, Pekka. Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 2011, muistio. PDF-dokumentti. http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaaray_skokoelma. Luettu 11.2.2014.
18. Ritala, Juha 2013. HighTech-sairaalan leikkaussalihankkeen aloituskokouksen muistio 21.10.2013. Elementtituoteryhmäjohtaja. Hermetel Oy.
19. Jantunen, Olli-Pekka 2012. Sairaalailmanvaihdon standardisointi. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö.
20. VALSAI - hanke. Valtakunnallinen sairaaloiden kiinteistökannan kehittämisprojekti, kirjallisuuskatsaus 2007.
21. Takki, Tarja 1988. Leikkaussalin mikrobi- ja hiukkaspitoisuus eri ilmanjakotavoilla. Helsingin teknillinen korkeakoulu. Koneinsinööriosasto. Diplomityö.
22. Sairaalaliitto. Energiansäästö ja sairaalahygienia. Helsinki: Sairaalaliitto. 1990.
23. Ljungqvist, Bengt & Reinmüller, Berit 2013. Practical Safety Ventilation in Operating Rooms-An Introduction. Göteborg: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Department of Energy and Environment.
24. SFS-EN ISO 14644-1:2000. Puhdastilat ja puhtaat alueet. Osa 1: Puhtausluokitus. Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu ja julkaistu suomenkielisenä.
25. VTT. High-tech sairaala – Korkean hygienian hallinta sairaaloissa. Tampere: VTT 2012.
26. Standards for classification of cleanrooms. PDF -dokumentti. <http://www.icccs.net/news/ClassificationOfCleanrooms2005.pdf>. Luettu 11.03.2014
27. CEN/TC 156/WG 18 N56. Rev 0.05a. Draft Standard – Ventilation of Operating Suites, Operating Rooms and associated Instrument Lay-Up Rooms. European Committee of standardization CEN.
28. CEN/TC 156/WG 18 N56. Draft Part 2 – Requirements for ventilation and air-conditioning in general medical locations - Components and Systems. European Committee of standardization CEN.

29. Ryynänen, Jouko 2007. Sairaalanvaihdon suunnitteluohjeita. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
30. Camfil Oy. WWW-dokumentti.
<http://www.camfil.fi/Suodatintekniikkaa/Standardeja-ja-asetuksia/EN-137792007/>. Päivitetty 12.3.2014. Luettu 12.3.2014
31. Halton Oy. PDF -dokumentti.
http://www.halton.fi/ip/HCA2013F/halton_ilmansuodatuksen_tuotekirja_032013.pdf. Luettu 12.3.2013.
32. Repo, Esko 2014. Henkilökohtainen tiedonanto. 20.3.2014. KSL - suunnittelija. Granlund Kuopio Oy.
33. Brandt, Christian; Hott, Uwe ym. 2008. Operating Room Ventilation With Laminar Airflow Shows No Protective Effect on the Surgical Site Infection Rate in Orthopedic and Abdominal Surgery. *Annals of Surgery* 248, 5, 695-700.
34. Breier, Ann-Christin; Brandt, Christian ym. 2011. Laminar Airflow Ceiling Size: No Impact on Infection Rates Following Hip and Knee Prosthesis. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 32, 11, 1097-1102.
35. Koskinen, Veli 2013. Leikkaussalin ilmanvaihdon tutkiminen. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö.
36. Granlund Kuopio Oy 2014. KYS leikkaussalipalaveri. 18.3.2014.
37. Vasara, Jukka 2014. Henkilökohtainen tiedonanto. 27.3.2014. Toimitusjohtaja. Granlund Kuopio Oy.
38. Paavilainen, Risto 2014. Halton Oy. Indoor climate simulation. Moduuli-leikkaussali. Luettu 1.4.2014
39. Halton Oy. WWW-dokumentti. www.halton.com. Päivitetty 4.4.2014. Luettu 4.4.2014.
40. Honkala, Mikko 2013. Leikkaussalien ääniongelmien. Oulun seudun ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö.
41. United States Patent 1990. Patent Number 4,915,435. PDF -dokumentti.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US4915435.pdf>. Luettu 9.4.2014

**RakMk osan D2 määrittämät hoitolaitosten ilmanvaihdon ohjearvot /14/
Sairaalan ilmanvaihdon ohjeellisia suunnittelu-arvoja Suomessa /29/**

Taulukko 7. Hoitolaitokset #1 /14/

| Tila / käyttötarkoitus | Ulkoilma- virta (dm ³ /s)/hlö | Ulkoilma- virta (dm ³ /s)/m ² | Poistoilma- virta (dm ³ /s)/m ² | Äänitaso L _{A,eq,T} / L _{A,max} dB | Ilman nopeus talvi / kesä m/s | Huom! |
|--|--|---|---|---|--|----------|
| Sairaalan potilashuone | 10 | 1,5 | | 28 / 33 * | 0,20 / 0,30 | *C1 ohje |
| Sairaalan toimenpidehuone | | 2 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | #E |
| Sairaalan kuntoutushuone | | 2 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | |
| Sairaalan oleskelutila | | 3 | | 33 / 38 | 0,20 | |
| Lastenhoitotilat | | 2 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | |
| Pitkäaikaispotilaiden hoitotilat | | 2 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | #3 |
| Käytävä | | 0,5 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | #2 |
| Odotustilat | | 3 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | #2 |
| Potilas- ja odotustilojen WC | | | 30 / paikka | 38 / 43 | 0,20 | |
| Huuhdeluhuone | | | 10 | 38 / 43 | 0,20 | #3 |
| Pidätettyjen vastaanottotila | | 3 | 1 | 33 / 38 | 0,20 | #4 |
| Putkakäytävä | | 3 | | 38 / 43 | 0,20 | |
| Juoppoputka | | 8 | 10 | 33 / 38 | 0,20 | #S |
| Sellikäytävä | | 2 | | 38 / 43 | 0,30 | |
| Selli | 8 | 2,5 | 3 | 33 / 38 | 0,20 | #S |
| Päiväkodit: | | | | | | |
| Lepohuoneet | 6 | 2,5 | | 28 / 33 * | 0,20 / 0,30 | *C1 ohje |
| Leikki- ja ryhmähuoneet | 6 | 2,5 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | |
| Vesileikkihuone | | 2 | | 33 / 38 | 0,20 / 0,30 | |
| Eteinen | | 2 | | 33 / 38 | 0,20 | |
| Märkäeteinen | | | 5 | | | #3, #S |
| #1 Hygieniatilojen poistoilmavirrat kts. taulukko 11 Hygieniatilat. #2 Kiinteiden työpisteiden ilmannopeuden ohjearvot kuten toimistohuoneessa. #3 Poistoilmavirtaa ja vastaavasti ulkoilmavirtaa suurennetaan kohdepoistojen ja / tai hajujen hallitsemisen edellyttämällä määrällä. #4 Poistoilma ympäröivien hygienia- ymv. tilojen kautta. #E Erikoistilojen, kuten leikkaussalien, toimenpidehuoneiden, röntgentilojen, välinehuoltotilojen, potilaiden pesuun käytettävien tilojen jne. ilmanvaihto suunnitellaan tapauskohtaisesti. #S Siirtoilmavirta | | | | | | |

Leikkaus- ja synnytysosastot sekä eristystilat /29/

| Tila | Ulkoilma- virta (dm ³ /s)/ henkilö | Ulkoilma- virta (dm ³ /s)/m ² | Poistoilmavirta (dm ³ /s)/m ² | Ilmanvaihto kerroin l/h | Ilman nopeus talvi/kesä | Suhteellinen kosteus % | Lämpötila °C talvi/kesä | Suodatus luokka F / H | | Paine suhte dB/ A | Lähde | Huom. (*) |
|--------------------------------------|--|---|--|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----|-------------------------|------------------|--------------|
| ortopedia ym. | | 14 -22 | 14 - 22 | >17 | >0,2 | 45 - 55 | 22+/-1 | 5 +8+12 | 28 | ylip. | TA1994 SH1990 | (6) |
| yleiskirurgia | | 14 - 22 | 14 -22 | >17 | >0,2 | 45 - 55 | 22+/-1 | 5+8+10 | 28 | ylip. | TA1994 SH1990 | (7) |
| polikliiniset ja infektio | | 14 - 22 | 14 - 22 | >17 | >0,2 | 45 - 55 | 22+/-1 | 5+8+10 | 28 | ylip. / alip. | TA1994 SH1990 | (8) |
| heräämö | 15 | 6 | 6 | | | | 23 / 25 | 5 + 8 | 28 | | SH1990 | (9) |
| synnytys sali | 15 | 8 | 8 | | | 30 - 65 | 24 / 25 | 5 + 8 | 28 | | SH1990 | |
| keskoset ja vastasynty- neet | 19 | 3 | 3 | | | 30- 50 | 25 +/- 1 | 5+8+10 | 28 | ylip. | TA1994 | (10) |
| palovamma 2-suuntainen eristys | 30 | 6 | 6 | | | 20 - 25 | 28 - 32 | 5+8+10 | 28 | ylip./ alip | TA1994 | (11) |
| leukemia, suojaeristys | 25 | 4 | 4 | | | 50 | 22 +/-1 | 5+8+10 | 28 | ylip. | TA1994 | (12) |
| tartunta- eristys | 25 | 4 | 4 | 3 -10 | | 30 - 40 | 22 - 24 | 5 + 8 | 28 | alip. | TA1994 | (13) |

RakMk osan D2 määrittämät hoitolaitosten ilmanvaihdon ohjeavot /14/

Sairaalan ilmanvaihdon ohjeellisia suunnitteluarvoja Suomessa /29/

Ohjeellisten suunnitteluarvojen taulukon huomiokentän selitteet ortopedisten, yleiskirurgisten, polikliinisten ja infektioleikkausten osalta:

- 6 Erittäin puhdasta ilmaa vaativat (ortopediset, transplantaatio, silmä- yms.) leikkaukset.
Puhtausvaatimus:
Leikkausalueen ilman tulee täyttää ISO -luokan 5 vaatimukset.
Ilman lämpötila:
Lämpötilan asetusarvon tulee olla henkilökunnan leikkaussalista sää- dettävissä +/- 3 °C.
Suhteellinen kosteus:
Tulee olla salista henkilökunnan säädettävissä.
Ilmastointi:
Vertikaalinen laminaarinen ilmanjako.
Poisto ylhäältä ja alhaalta, jotta anestesiakaasut eivät pääse kerrostu- maan leikkaussaliin. Poistoventtiilien yhteyteen suodatin kangaspö- lyn takia, jotta poistokanavien nuohoustarve vähenee.
Sali 15 Pa ylipaineinen ympäröiviin tiloihin nähden. Salista ilman virtaussuunta on alemman puhtausluokan tiloihin päin.
- 7 Tavanomaiset leikkaukset eli yleiskirurgia
Puhtausvaatimus:
Leikkausalueen ilman tulee täyttää ISO -luokan 7 vaatimukset.
Ilman lämpötila:
Lämpötilan asetusarvo tulee olla henkilökunnan salista säädettävissä +/- 3 °C.
Suhteellinen kosteus:
Tulee olla salista henkilökunnan säädettävissä.
Ilmastointi:
Osittain laminaarinen ilmanjako esimerkiksi reikäkatto.
Poisto tapahtuu ylhäältä ja alhaalta anestesiakaasujen takia. Poisto- venttiilien yhteyteen suodatin kangaspölyn takia.
Sali 10-15 Pa ylipaineinen ympäröiviin tiloihin nähden. Ilmanvirtaus tapahtuu tilasta alemman puhtausluokan tiloihin päin.
- 8 Polikliiniset ja infektioleikkaukset
Puhtausvaatimukset:
Leikkausalueen ilman tulee täyttää ISO- luokan 7 vaatimukset.
Ilman lämpötila:
Lämpötilan asetusarvo tulee olla henkilökunnan salista säädettävissä +/- 3 °C.
Suhteellinen kosteus:
Tulee olla salista henkilökunnan säädettävissä.
Ilmastointi:
Osittain syrjäyttävä ilmanjako esimerkiksi reikäkatto tai sekoittava ilmanjako. Poisto on ylhäältä ja alhaalta anestesiakaasujen takia. Poistoventtiili- en yhteyteen suodatin kangaspölyn takia.
Infektiosali tasapaineinen tai hieman alipaineinen (10 Pa).
Polikliininen sali ylipaineinen

Table 1: Performance criteria for OR room **High Risk Operation**

| High Risk | | | Operational | |
|------------------------------------|-----------|---------------------|----------------|----------------|
| | Standard | Specification | Periphery area | Protected zone |
| Microbiological test Air | ISO 15698 | Cfu/m ³ | <10 | <10 |
| Microbiological test Sedimentation | ISO 15698 | Cfu/Agar Ø90mm 4 hr | ≤1 | ≤1 |

Table 2: Performance criteria for OR room **Normal Risk Operation**

| Normal Risk | | | Operational | |
|------------------------------------|-----------|---------------------|----------------|----------------------------|
| | Standard | Specification | Periphery area | Protected / Protected zone |
| Microbiological test Air | ISO 15698 | Cfu/m ³ | <100 | <100 |
| Microbiological test Sedimentation | ISO 15698 | Cfu/Agar Ø90mm 1 hr | ≤12 | ≤12 |

Table 3: Performance criteria for OR room **High Risk At Rest Protected Zone system**

| High Risk | | | At rest | |
|------------------------------------|-------------|-------------------------|----------------|----------------|
| | Standard | Specification | Periphery area | Protected zone |
| Particle concentration | ISO-14644-1 | ≥0,5µm | ISO 6 | ISO 5 |
| Segregation test | ISO 14644-3 | by national test method | n.a. | Yes *) |
| Recovery test | ISO 14644-3 | 1:100 | <20min | <5min **) |
| Microbiological test Air | ISO 15698 | Cfu/m ³ | <1 | <1 |
| Microbiological test Sedimentation | ISO 15698 | Cfu/Agar Ø90mm 1 hr | n.a. | n.a. |

*) when implemented by national test method

**) under a OR-lamp when applicable by national test method

Table 4: Performance criteria for OR room **High Risk At Rest Dilution mixing system**

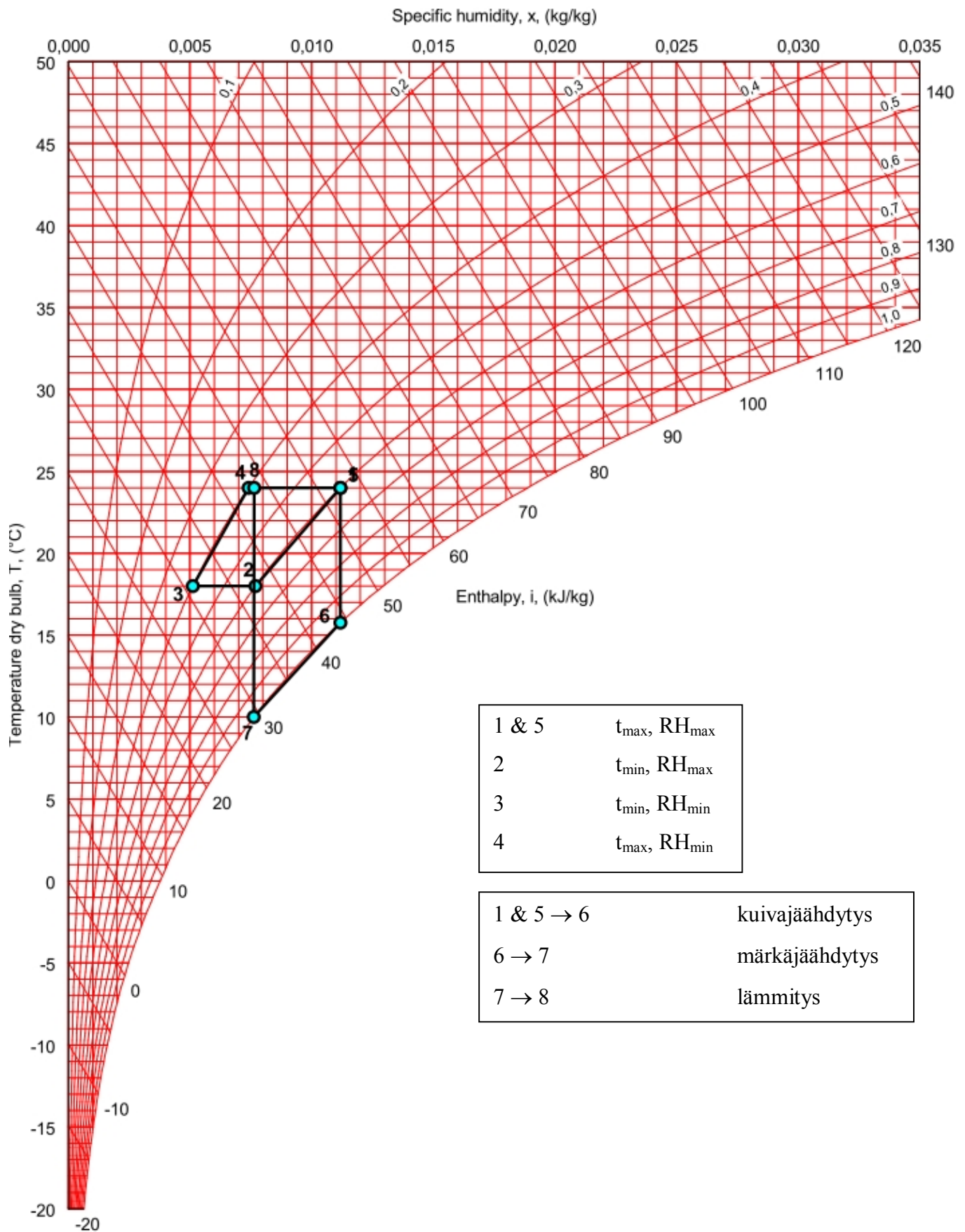
| High Risk | | | At rest | |
|------------------------------------|-------------|---------------------|----------------|----------------|
| | Standard | Specification | Periphery area | Protected zone |
| Particle concentration | ISO-14644-1 | ≥0,5µm | ISO 6 | ISO 5 |
| Recovery test | ISO 14644-3 | 1:100 | <20min | <15min |
| Microbiological test Air | ISO 15698 | Cfu/m ³ | <1 | <1 |
| Microbiological test Sedimentation | ISO 15698 | Cfu/Agar Ø90mm 1 hr | n.a. | n.a. |

CEN/TC 156/WG 18 -standardin mukaiset suorituskykykriteerit leikkaussalille /27/

Table 5: Performance criteria for OR room **Normal Risk At Rest**

| Normal Risk | | | At rest |
|------------------------------------|-------------|-----------------------|---------|
| | Standard | Specification | room |
| Particle concentration | ISO-14644-1 | $\geq 0,5\mu\text{m}$ | ISO 7 |
| Recovery test | ISO 14644-3 | 1:100 | <20min |
| Microbiological test Air | ISO 15698 | Cfu/m ³ | <10 |
| Microbiological test Sedimentation | ISO 15698 | Cfu/Agar Ø90mm 4 hr | n.a. |

Psychrometric chart, barometric pressure 101,3 kPa



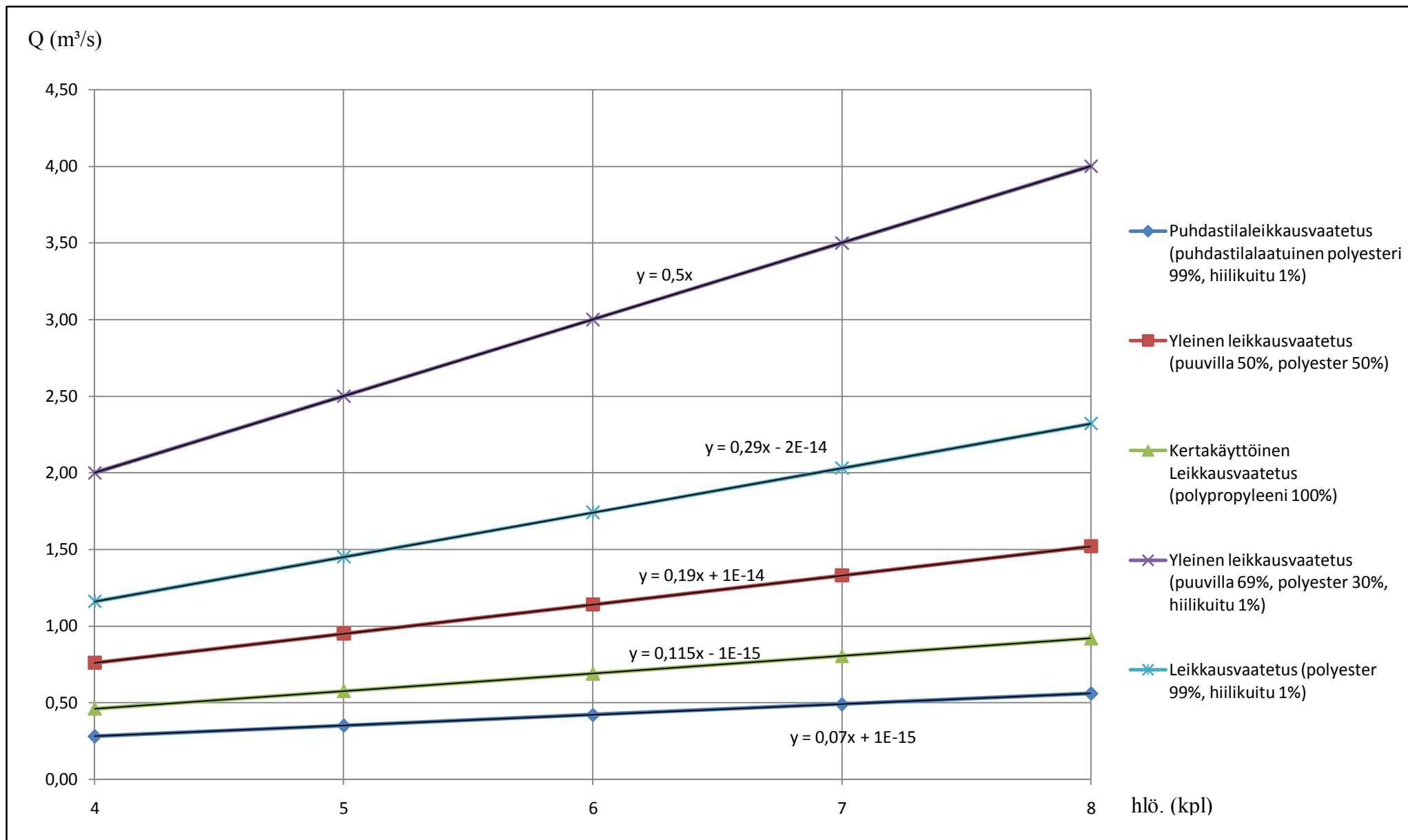
High risk -operaatiossa leikkaussalin operational -tilan vähimmäisilmavirrat sekä at rest -tilan toipumisajat

| | Epäpuhtaus- voimakkuus | Sallittu operational CFU - pitoisuus | Leikkaus- salin tilavuus | Henkilö- määrä | Sekoittava ilmanjako | Toipumis- aika |
|---|---------------------------|---|--------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Vaatetus | q_s (CFU/s) | c (CFU/m ³) | V (m ³) | n (kpl) | Q (m ³ /s) | t (min) |
| Puhdastilaleikkausvaatetus (puhdastilalaatuinen polyesteri 99%, hiilikuitu 1%) | 0,7 | 10 | 150 | 4 | 0,28 | 41,1 |
| | | | | 5 | 0,35 | 32,9 |
| | | | | 6 | 0,42 | 27,4 |
| | | | | 7 | 0,49 | 23,5 |
| | | | | 8 | 0,56 | 20,5 |
| Kertakäyttöinen Leikkausvaatetus (polypropyleeni 100%) | 1,15 | 10 | 150 | 4 | 0,46 | 25,0 |
| | | | | 5 | 0,58 | 20,0 |
| | | | | 6 | 0,69 | 16,7 |
| | | | | 7 | 0,81 | 14,3 |
| | | | | 8 | 0,92 | 12,5 |
| Yleinen leikkausvaatetus (puuvilla 50%, polyester 50%) | 1,9 | 10 | 150 | 4 | 0,76 | 15,1 |
| | | | | 5 | 0,95 | 12,1 |
| | | | | 6 | 1,14 | 10,1 |
| | | | | 7 | 1,33 | 8,6 |
| | | | | 8 | 1,52 | 7,6 |
| Leikkausvaatetus (polyester 99%, hiilikuitu 1%) | 2,9 | 10 | 150 | 4 | 1,16 | 9,9 |
| | | | | 5 | 1,45 | 7,9 |
| | | | | 6 | 1,74 | 6,6 |
| | | | | 7 | 2,03 | 5,7 |
| | | | | 8 | 2,32 | 5,0 |
| Yleinen leikkausvaatetus (puuvilla 69%, polyester 30%, hiilikuitu 1%) | 5 | 10 | 150 | 4 | 2,00 | 5,8 |
| | | | | 5 | 2,50 | 4,6 |
| | | | | 6 | 3,00 | 3,8 |
| | | | | 7 | 3,50 | 3,3 |
| | | | | 8 | 4,00 | 2,9 |

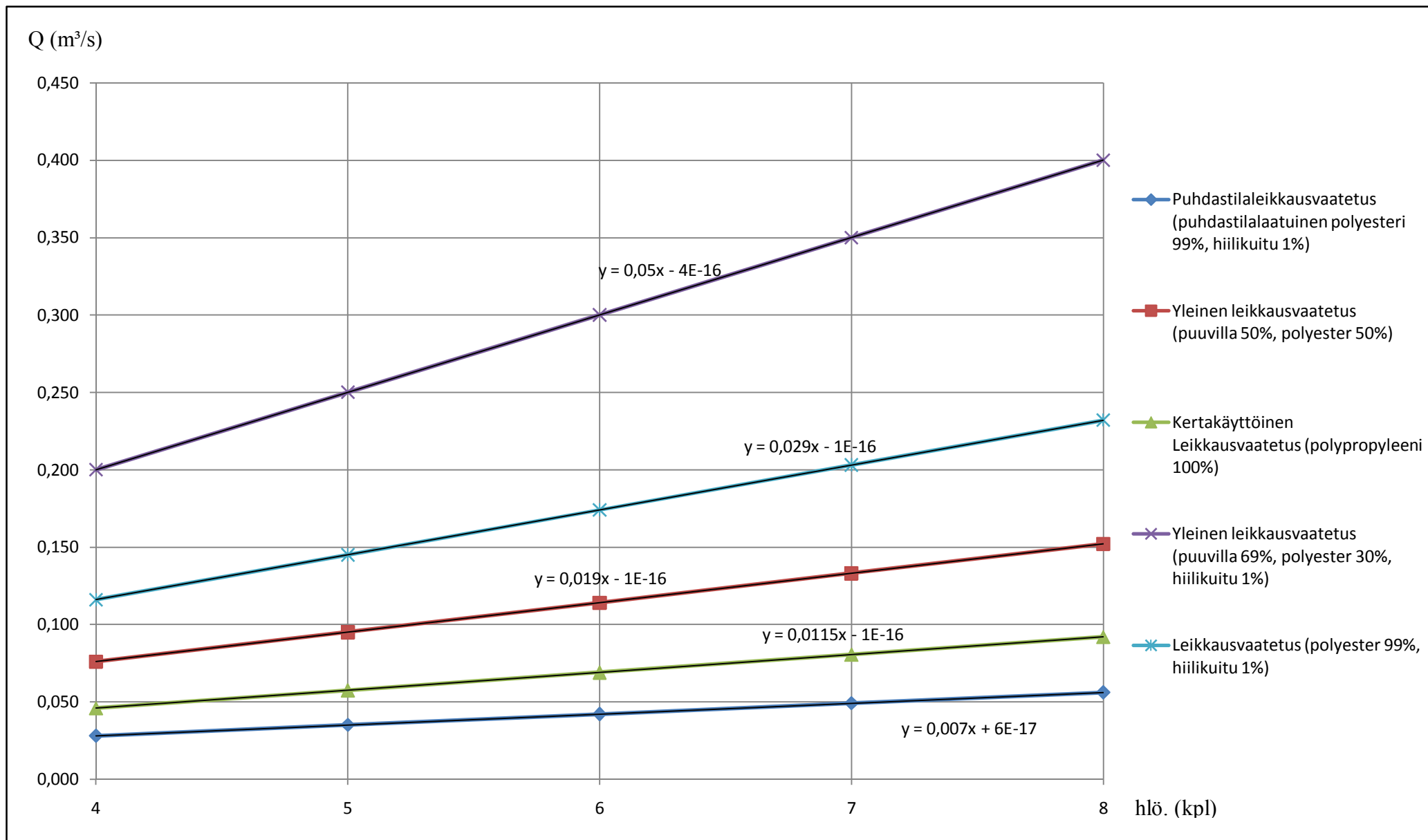
Normal risk -operaatiossa leikkaussalin operational -tilan vähimmäisilmavirrat sekä at rest -tilan toipumisajat

| | Epäpuhtaus- voimakkuus | Sallittu operational CFU - pitoisuus | Leikkaussalin tilavuus | Henkilö- määrä | Sekoittava ilmanjako | Toipumis- aika |
|---|---------------------------|---|---------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Vaatetus | q_s (CFU/s) | c (CFU/m ³) | V (m ³) | n (kpl) | Q (m ³ /s) | t (min) |
| Puhdastilaleikkausvaatetus (puhdastilalaatuinen polyesteri 99%, hiilikuitu 1%) | 0,7 | 100 | 150 | 4 | 0,028 | 410,7 |
| | | | | 5 | 0,035 | 328,6 |
| | | | | 6 | 0,042 | 273,8 |
| | | | | 7 | 0,049 | 234,7 |
| | | | | 8 | 0,056 | 205,4 |
| Kertakäyttöinen Leikkausvaatetus (polypropyleeni 100%) | 1,15 | 100 | 150 | 4 | 0,046 | 250,0 |
| | | | | 5 | 0,058 | 200,0 |
| | | | | 6 | 0,069 | 166,7 |
| | | | | 7 | 0,081 | 142,9 |
| | | | | 8 | 0,092 | 125,0 |
| Yleinen leikkausvaatetus (puuvilla 50%, polyester 50%) | 1,9 | 100 | 150 | 4 | 0,076 | 151,3 |
| | | | | 5 | 0,095 | 121,1 |
| | | | | 6 | 0,114 | 100,9 |
| | | | | 7 | 0,133 | 86,5 |
| | | | | 8 | 0,152 | 75,7 |
| Leikkausvaatetus (polyester 99%, hiilikuitu 1%) | 2,9 | 100 | 150 | 4 | 0,116 | 99,1 |
| | | | | 5 | 0,145 | 79,3 |
| | | | | 6 | 0,174 | 66,1 |
| | | | | 7 | 0,203 | 56,7 |
| | | | | 8 | 0,232 | 49,6 |
| Yleinen leikkausvaatetus (puuvilla 69%, polyester 30%, hiilikuitu 1%) | 5 | 100 | 150 | 4 | 0,200 | 57,5 |
| | | | | 5 | 0,250 | 46,0 |
| | | | | 6 | 0,300 | 38,3 |
| | | | | 7 | 0,350 | 32,9 |
| | | | | 8 | 0,400 | 28,8 |

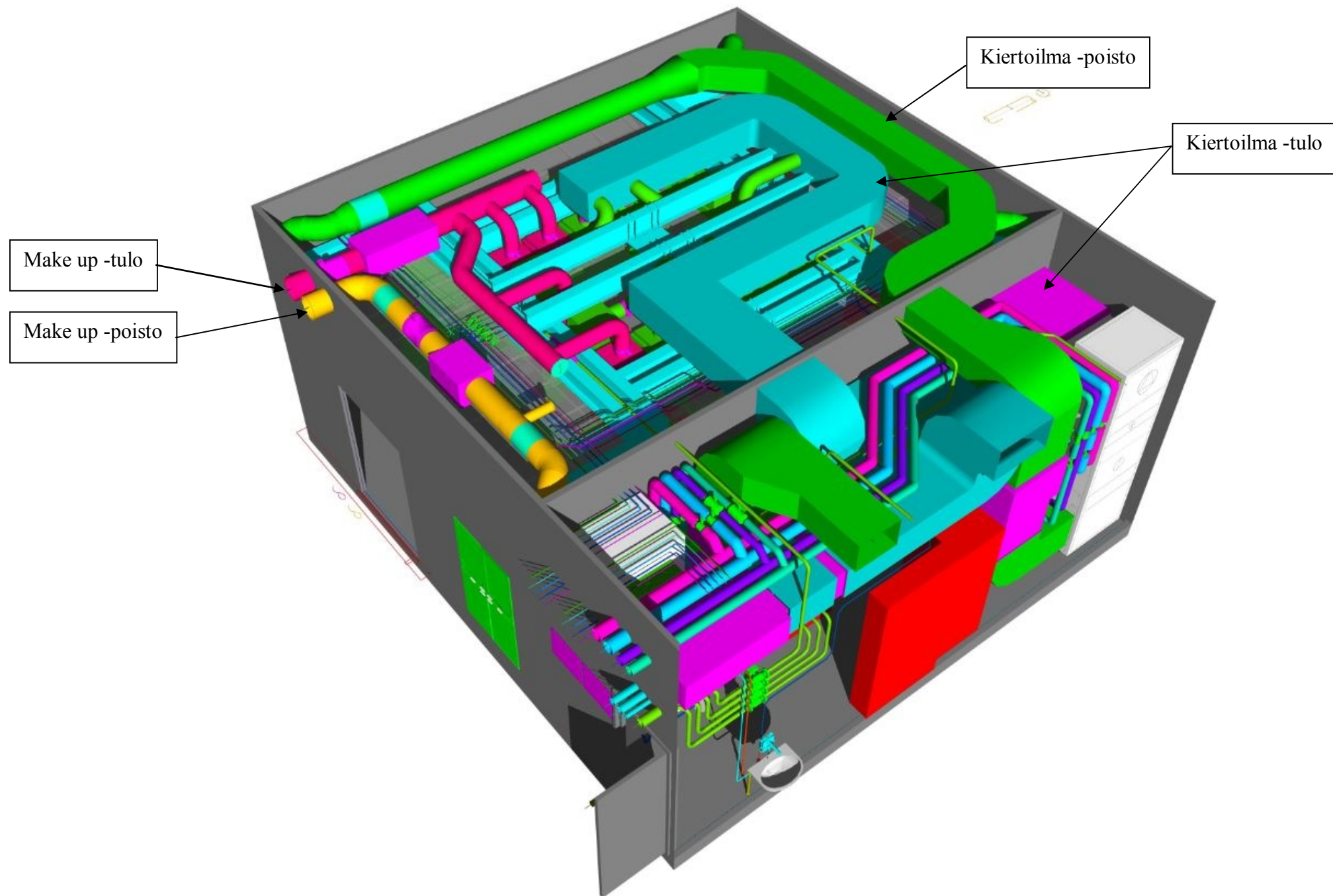
High risk -operaatiossa leikkaussalin kokonaisilmavirta henkilömäärän funktiona riippuen vaatetuksesta

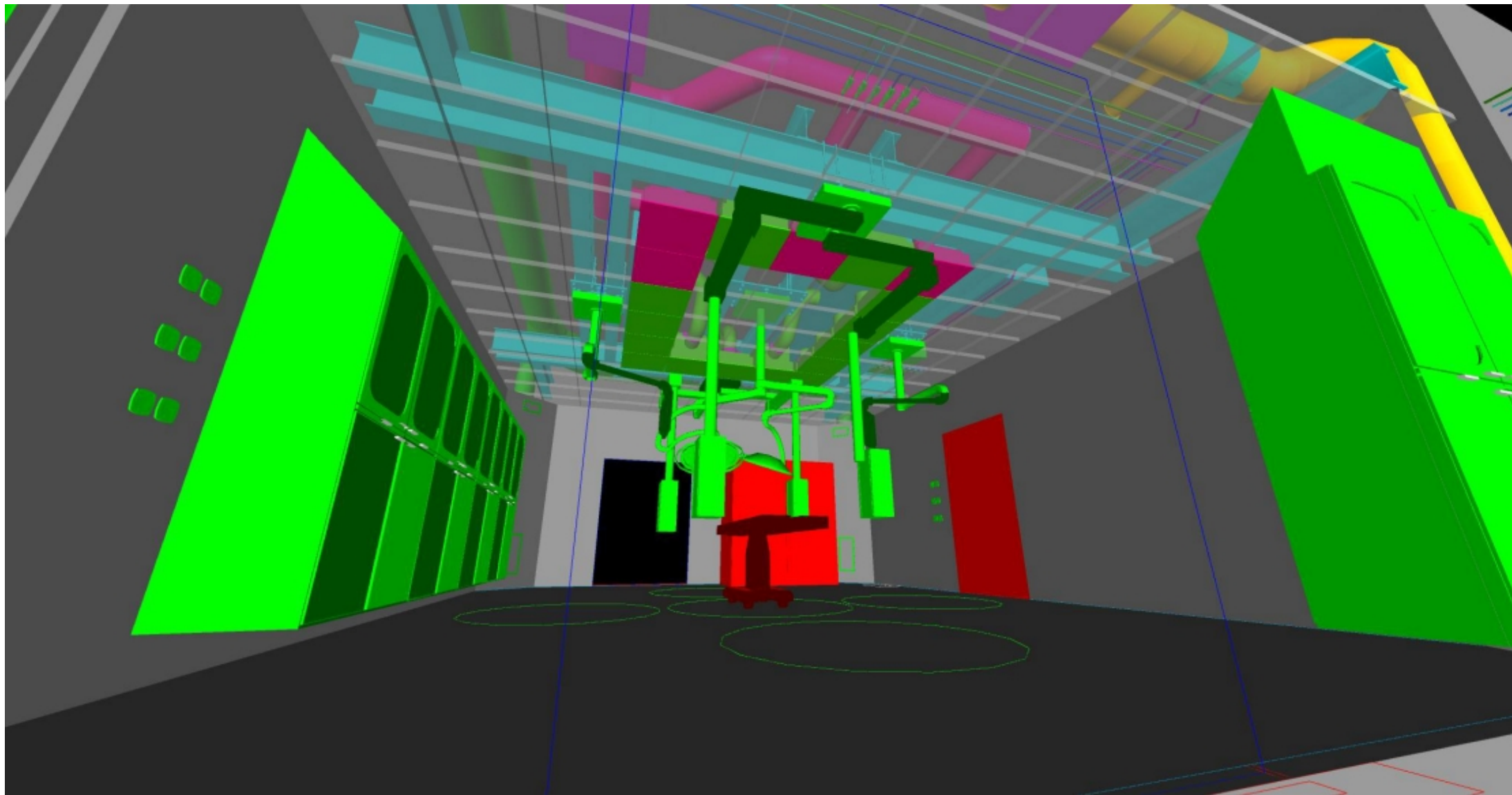


Normal risk -operaatiossa leikkaussalin kokonaisilmavirta henkilömäärän funktiona riippuen vaatetuksesta.

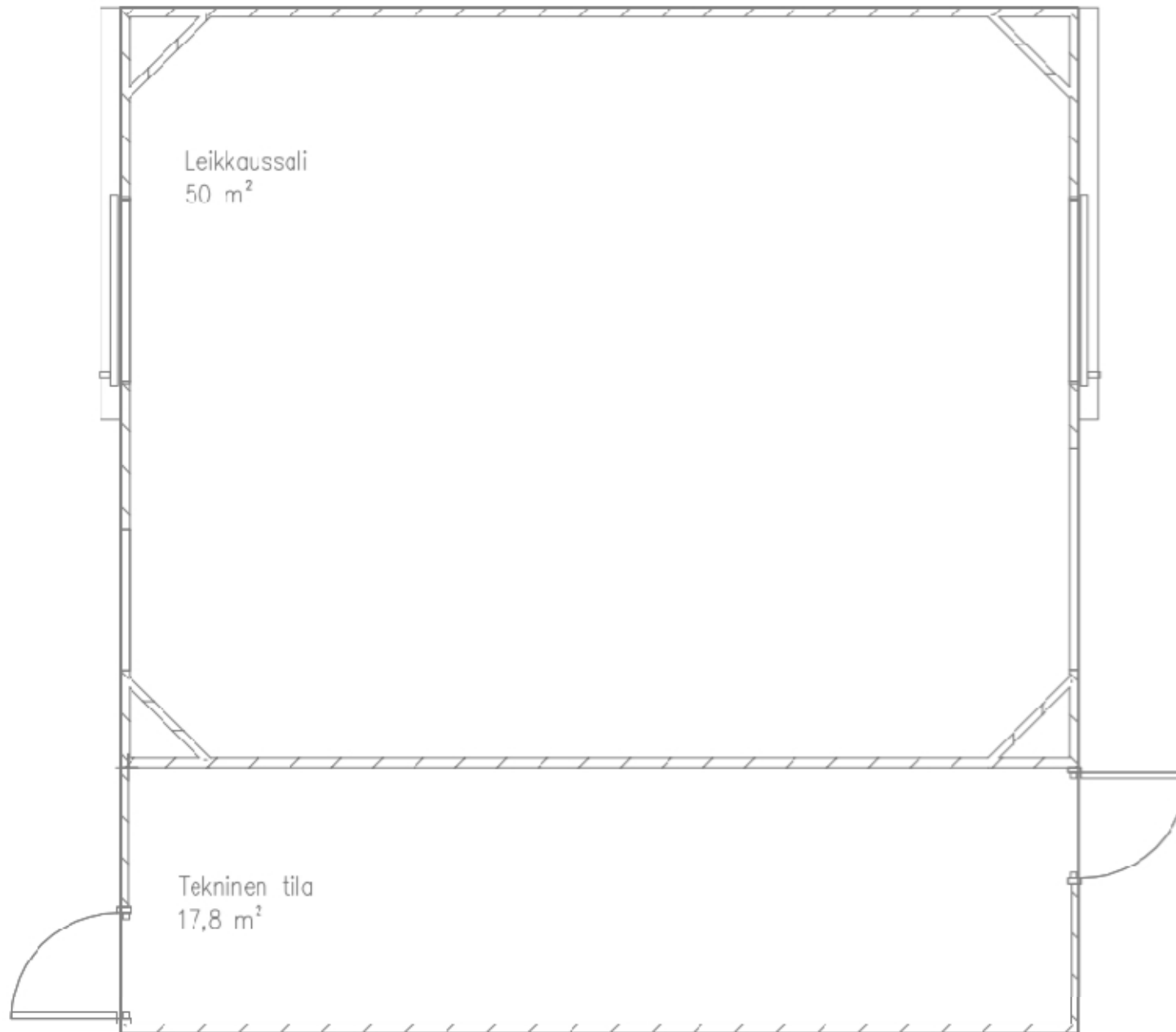


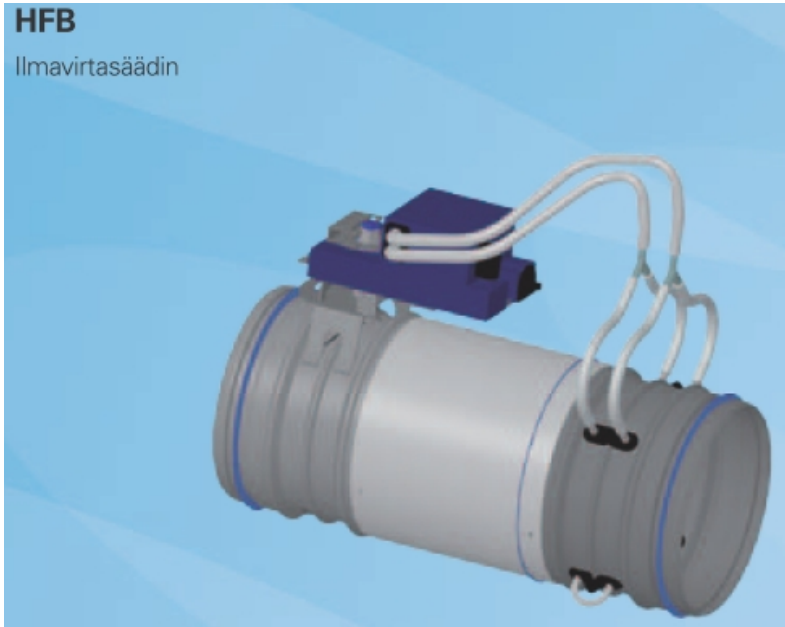
Modulaarinen leikkaussali yläkulmaperspektiivistä





Modulaarisen leikkaussalin yksinkertaistettu pohjapiirustus

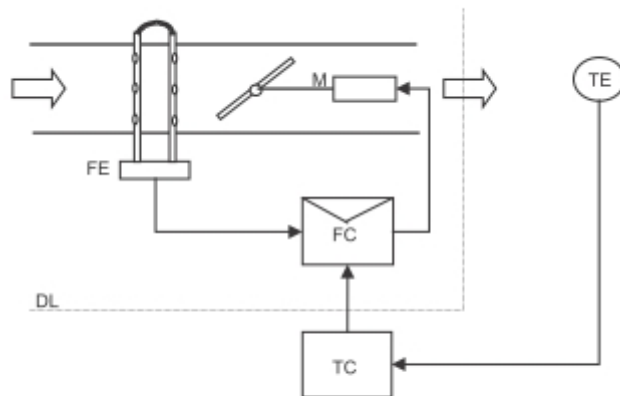




| D [mm] | qmin(Special) [l/s] | [m³/h] | qmin(Standard) [l/s] | [m³/h] | qmax* [l/s] | [m³/h] | qnom [l/s] | [m³/h] |
|-----------|------------------------|--------|-------------------------|--------|----------------|--------|---------------|--------|
| 100 | 8 | 28 | 16 | 57 | 47 | 170 | 70 | 251 |
| 125 | 12 | 44 | 25 | 88 | 74 | 265 | 115 | 414 |
| 160 | 20 | 72 | 40 | 145 | 121 | 434 | 211 | 758 |
| 200 | 31 | 113 | 63 | 226 | 188 | 679 | 340 | 1226 |
| 250 | 49 | 177 | 98 | 353 | 295 | 1060 | 538 | 1936 |
| 315 | 78 | 281 | 156 | 561 | 468 | 1683 | 885 | 3188 |
| 400 | 126 | 452 | 251 | 905 | 754 | 2714 | 1555 | 5600 |
| 500 | 196 | 707 | 393 | 1414 | 1178 | 4241 | 2449 | 8818 |

qmin (EG malli) Minimikanavanopeus 1 m/s.
 qmin (EC, EE ja ED mallit) Minimikanavanopeus 2 m/s.
 qmax Suositeltava maksimi-ilmavirta, kanavanopeus 6 m/s
 qnom Maksimi-ilmavirta kanavanopeudella 10 m/s.

Toiminta



HFB-ilmavirtasäädin sisältää ilmvirran mittaosan, ilmvirran säätölaitteen ja toimilaitteen. Laite mittaa todellisen ilmvirran ja säätää sitä muuttamalla säätöpellin asentoa. Ilmvirran asetusarvoa voidaan säätää minimin ja maksimin välillä esimerkiksi huonetermostaattilla, joka lähettää analogista ohjausviestiä (0...10 tai 2...10 VDC). HFB-ilmavirtasäädin säilyttää vaaditun tilavuusvirran kanavan painenvaihteluista riippumatta.

Sitä voidaan käyttää myös staattisen paineen säätimenä, jonka avulla ylläpidetään haluttu kanavapaine staattiseen paineenmittaukseen perustuen.

Modulaarisen leikkaussalin tuloilman päätelaitteiden säätöpelti /39/

PRA

Mittaus- ja säätömoduuli



| D [mm] | q _{min} | | q _{max} | |
|-----------|------------------|--------|------------------|--------|
| | [l/s] | [m³/h] | [l/s] | [m³/h] |
| 100 | 8 | 28 | 47 | 170 |
| 125 | 12 | 44 | 74 | 265 |
| 160 | 20 | 72 | 121 | 434 |
| 200 | 31 | 113 | 188 | 679 |
| 250 | 49 | 177 | 295 | 1060 |
| 315 | 78 | 281 | 468 | 1683 |
| 350 | 96 | 346 | 577 | 2078 |
| 400 | 126 | 452 | 754 | 2714 |
| 500 | 196 | 707 | 1178 | 4241 |
| 630 | 312 | 1122 | 1870 | 6733 |
| 800 | 503 | 1810 | 3016 | 10857 |
| 1000 | 785 | 2827 | 4712 | 16965 |

q_{min} kanavanopeus 1 m/s
 q_{max} kanavanopeus 6 m/s
 - suositeltavin maksiminopeus

Toiminta

Ilmavirtaa säädetään kääntämällä säätönuppia, jolloin säätökartion iirispeltien muodostaman virtausaukon koko muuttuu. Kun aukko pienenee, ilman tilavuusvirta pienenee ja laitteen aiheuttama kokonaispainehäviö kasvaa. Ilmavirta voidaan määrittää mittaamalla mittausyhteiden paine-ero.

PRA 100...315

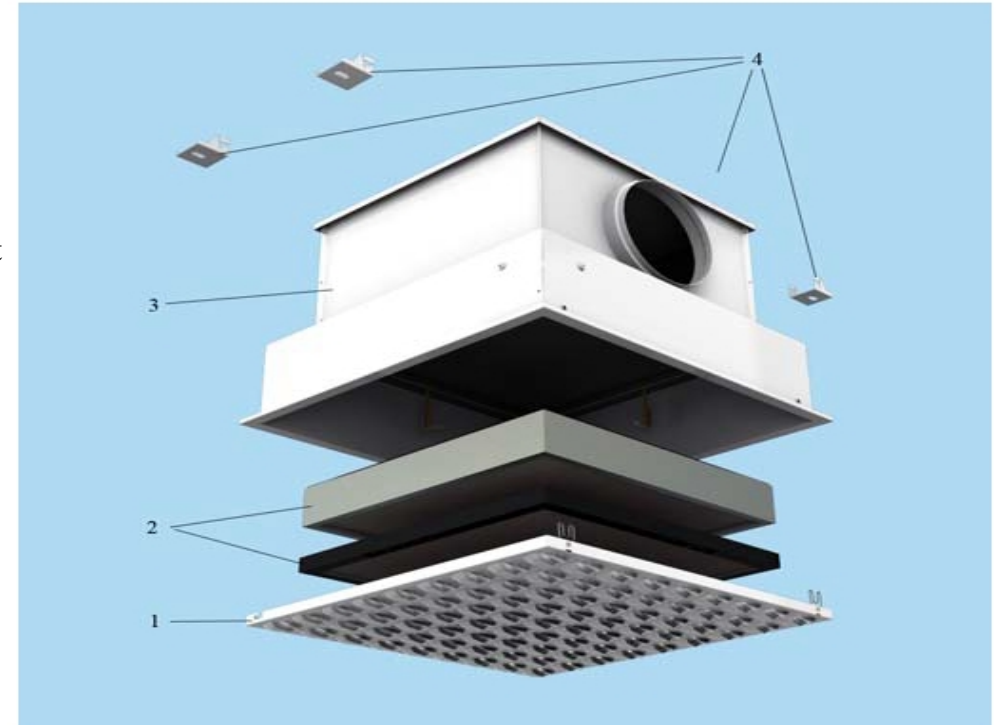
Laitteen käyttömekanismi on säätökartion ja rungon välissä, osittain laitteen ulkopuolella. Kun PRA-moduuli avataan täysin auki, kanavisto voidaan puhdistaa laitteen läpi normaalilla kanaviston puhdistusmenetelmällä.

DHN

HEPA terminal filter diffuser



1. Etupaneeli
2. Suodatin
3. Kammio
4. Kiinnitysraudat



H14 with foam gasket

| Filter code | Filter class | Flow rate | | Initial pressure drop | Filtering surface | Weight |
|---------------------------------|--------------|-----------|-----|-----------------------|-------------------|--------|
| | | m³/h | l/s | | | |
| CLP-LF-AL-305-305-68-0-H14-GF-P | H14 | 150 | 40 | 120 (±20) | 2,7 | 2,5 |
| CLP-LF-AL-457-457-68-0-H14-GF-P | H14 | 335 | 90 | 120 (±20) | 6,2 | 3,5 |
| CLP-LF-AL-610-610-68-0-H14-GF-P | H14 | 600 | 170 | 120 (±20) | 11,0 | 7,0 |

H14 with gel gasket

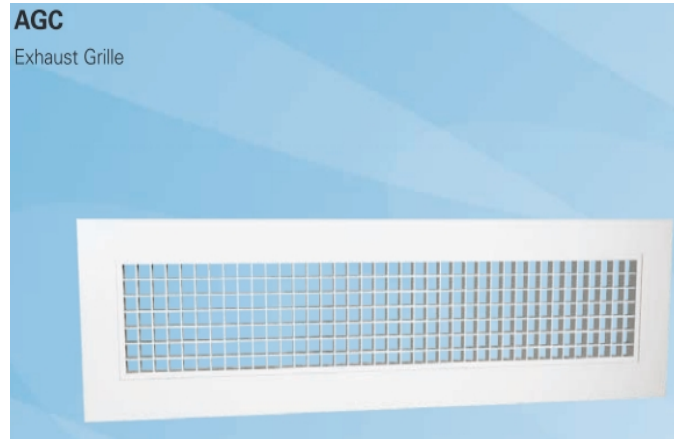
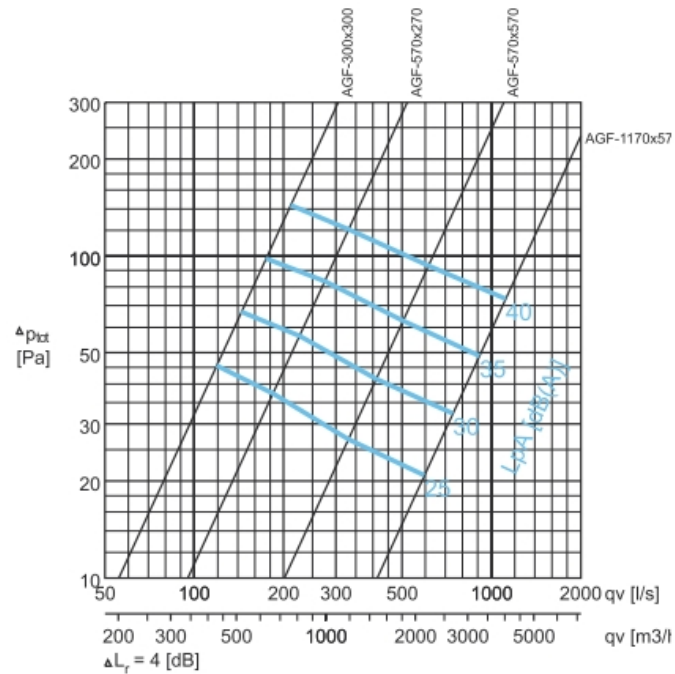
| Filter code | Filter class | Flow rate | | Initial pressure drop | Filtering surface | Weight |
|---------------------------------|--------------|-----------|-----|-----------------------|-------------------|--------|
| | | m³/h | l/s | | | |
| CLP-LF-AL-305-305-80-G-H14-GF-P | H14 | 150 | 40 | 120 (±20) | 2,7 | 2,7 |
| CLP-LF-AL-457-457-80-G-H14-GF-P | H14 | 335 | 90 | 120 (±20) | 6,2 | 3,8 |
| CLP-LF-AL-610-610-80-G-H14-GF-P | H14 | 600 | 170 | 120 (±20) | 11,0 | 7,7 |

Modulaarisen leikkaussalin poistoilman päätelaitteet. /39/



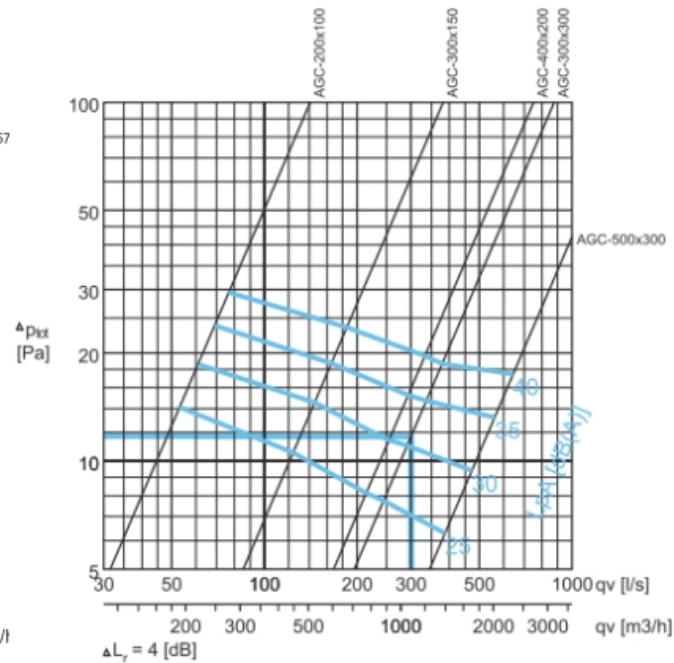
Varustettu G3 suodattimella. Koko 570 x 270

Painehäviö- ja äänitiedot:



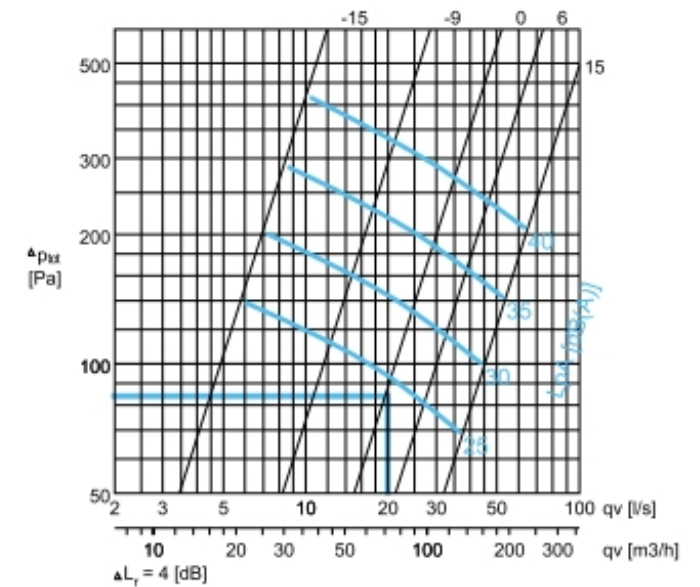
Koko 300 x 150

Painehäviö- ja äänitiedot:



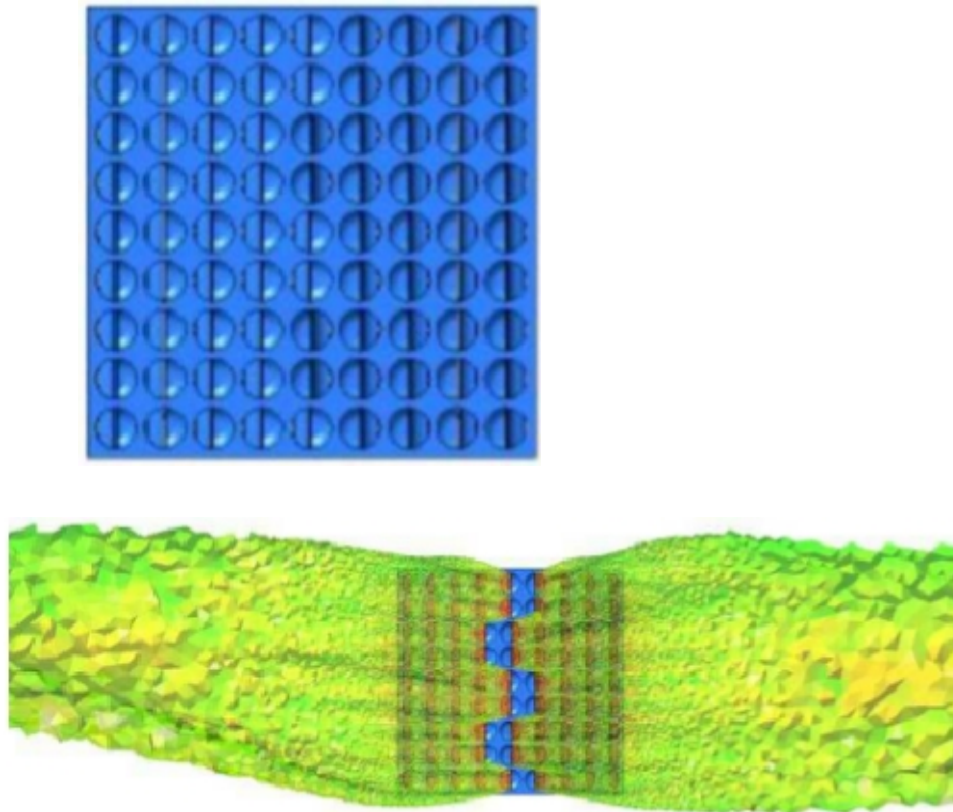
Koko $\varnothing 125$

Painehäviö ja äänitiedot:

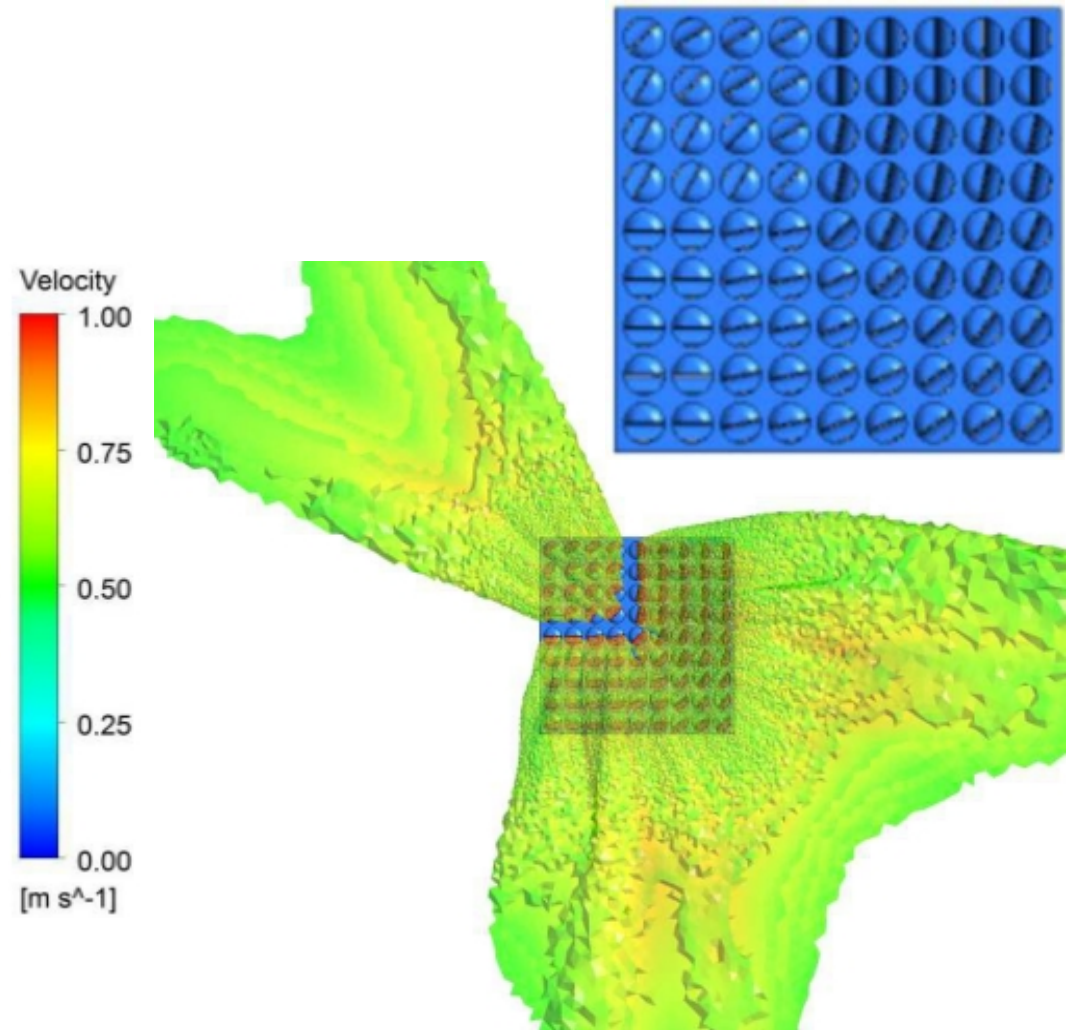


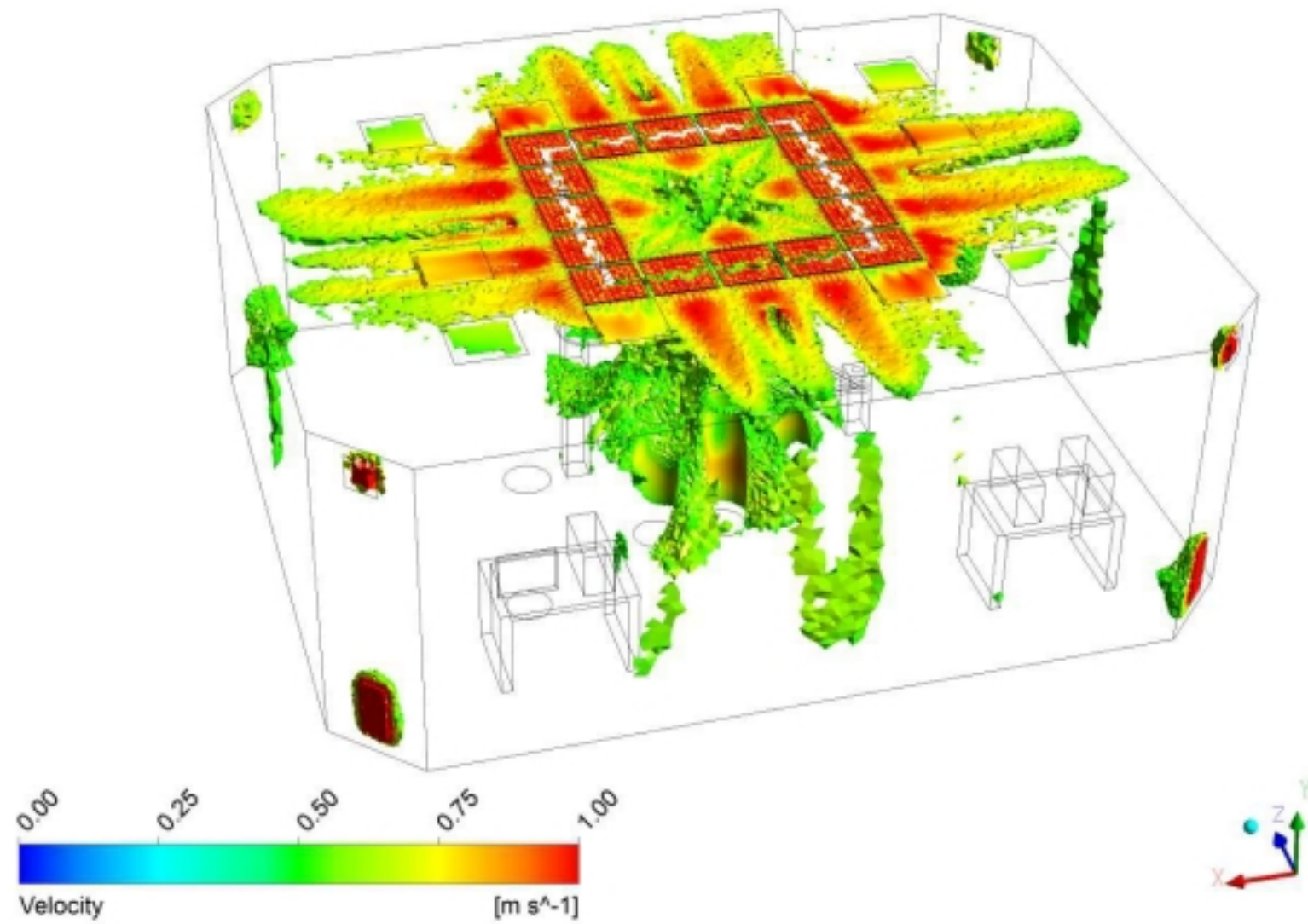
DHN -päätelaitteiden suutinasennot, nopeusjakauma ja heittokuvio 97 dm³/s ilmavirralla /38/

Laitaan asennettava päätelaite:

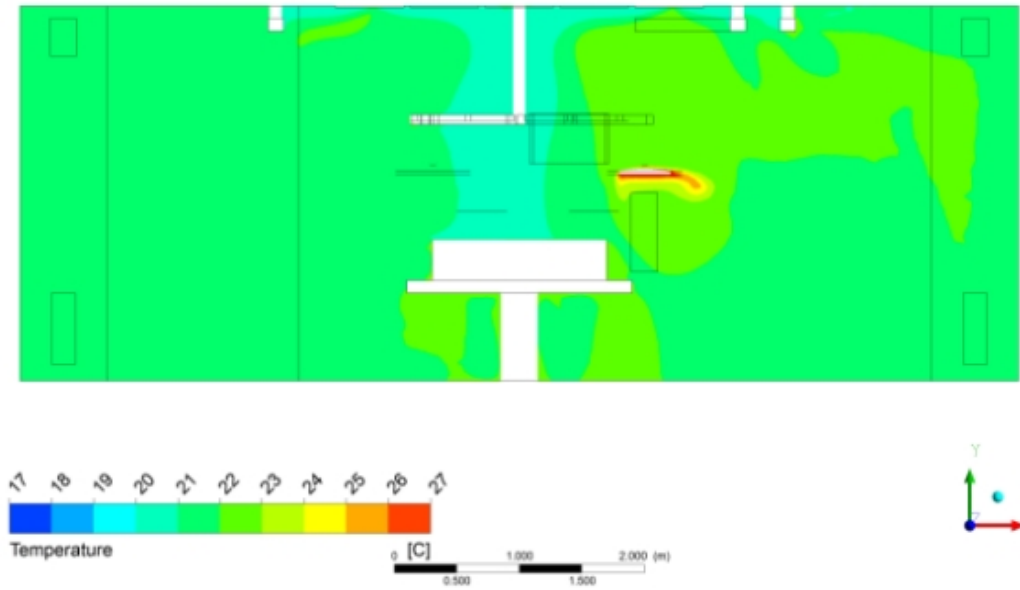


Nurkkaan asennettava päätelaite:





Leikkauskuvanto 2



Leikkauskuvanto 4

