

Niina Kemppainen

ASBESTIPURKUTYÖN OSASTOINNIN TOIMIVUUS

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Marraskuu 2019

TIIVISTELMÄ

Niina Kemppainen: Asbestipurkutyön osastoinnin toimivuus
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Marraskuu 2019

Tässä työssä raportoitiin Tampereen yliopiston (ent. Tampereen teknillinen yliopisto) osuutta tutkimusprojektissa, jonka tavoitteena oli asbestipurkutyön turvallisuuden ja siihen liittyvien testaus- ja mittaustoimintojen kehittäminen. Hanke toteutettiin yhteistyössä Työterveyslaitoksen, Teknologian tutkimuskeskuksen VTT Oy:n, Itä-Suomen yliopiston ja Tampereen yliopiston kanssa. Hanke jakautui osastoinnin, henkilökohtaisten suojainten ja ilmankäsittelylaitteiden toimivuuden todentamisen mittausten kehittämiseen.

Tampereen yliopiston tehtävänä oli selvittää osastoinnin toimivuutta ja suojaustehokkuutta. Projektiin liittyviä laboratorioskokeita tehtiin Tampereen yliopiston rakennushallissa, jonne rakennettiin testiosastointi. Testiosastoinnissa testattiin kolmen erilaisen seinärakenteen tiiveyttä ja toimivuutta merkkisavun ja osastoinnin alipaineistuksen avulla. Testattavien seinärakenteiden materiaaleina olivat muovi ja rakennuslevy. Muovista seinärakennetta testattiin myös oven kanssa. Osastoinnista mitattiin alipainetta osastoivan rakenteen yli sekä ilmavirran nopeutta tulo- ja poistoilmakanavissa. Osastoinnin toimivuutta testattiin neljällä eri alipaineen arvolla sekä kolmella eri ilmanvaihtokerroimen arvolla. Alipaineen arvoina käytettiin 5, 10, 20 ja 40 Pa ja ilmanvaihtokerroimen arvoina 5, 10 ja 11,5 1/h.

Osastoinnin ilmanjakotapoja tutkittiin myös virtaus- eli CFD-laskennan (Computational Fluid Dynamics) avulla. Simulointi suoritettiin neljälle erilaiselle osastoinnille. Muuttuvina tekijöinä olivat tulo- ja poistoilma-aukkojen paikat ja määrät sekä osastointien paine-erot. Tarkoituksena oli kussakin simuloidussa osastoinnissa saada selville ilmanjakotapa, joka huuhtoisi osastoinnissa olevan ilman mahdollisimman hyvin.

Osastoinnin suunnittelussa tulisi kiinnittää huomiota paine-eron lisäksi myös ilmanvaihtoon ja ilman huuhtoutumiseen osastoinnissa. Merkkisavun käyttö osoittautui helpoksi ja edulliseksi tavaksi testata osastoinnin tiiveyttä ja visualisoida ilman liikettä osastoinnissa. Laboratoriossa ja virtauslaskennalla tehtyjen testien perusteella voidaan ohjeistaa sijoittamaan osastoinnin poistoilma-aukko eli alipaineistaja mahdollisimman lähelle epäpuhtauslähdettä. Tuloilma- eli korvausilma-aukko kannattaa sen sijaan sijoittaa mahdollisimman etäälle poistoilma-aukosta. Monimuotoisissa osastoinneissa kannattaa korvausilma-aukkoja ja/tai alipaineistajia olla useampi, ettei osastointiin jää paikkoja, joissa ilman huuhtelevuus jää heikoksi.

Avainsanat: asbesti, purkutyö, osastointi, ilmanvaihtokerroin, alipaine

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Niina Kemppainen: Functionality of enclosure in asbestos demolition work
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
November 2019

In this master's thesis was reported the participation of the Tampere University (erstwhile Tampere University of Technology) in a research project aimed at developing the safety of asbestos demolition work and related testing and measurement function activities. The project was carried out in cooperation with the Finnish Institute of Occupational Health, VTT Technical Research Centre of Finland, the University of Eastern Finland and the Tampere University. The project was divided into the development of measurement methods for the verifying the functionality of enclosure, personal protection and air handling devices.

The task of TU was to find out the functionality and security effectiveness of the enclosure. Laboratory tests related to the project were made TU's laboratory hall, which was built in the test enclosure. In the test enclosure was tested the tightness and functionality of four different wall structures with the help of smoke machine and pressure difference between the interior of the enclosure and the surrounding space. Materials for testing wall structures were plastic and building plates. Wall structures were tested both without the door and with the door. In the test was measured pressure difference over the compartment structure and the air velocity in the inlet and exhaust air ducts. The functionality of the enclosure was tested with four different values of pressure difference and three different values of the air change rate. The values of the negative pressure were 5, 10, 20 and 40 Pascal and the air change rate values were 5, 10 and 11.5 1/h.

The air distribution of the enclosure was studied also by flow simulation or CFD (Computational Fluid Dynamics). Simulation was performed for four different enclosures. As variable factors were the positions and numbers of the inlet and exhaust air holes and pressure gradient. In each of the simulated enclosures, it was intended to find out the air distribution that would flush the air in the enclosure as well as possible.

When designing an enclosure, attention should be paid not only to differential pressure but also to air ventilation and leaching from the compartment. The use of smoke machine proved to be easy and inexpensive way to test the tightness of the enclosure and visualize the air movement in the enclosure. Based on tests performed in the laboratory and by flow simulation, it may be advisable to locate air outlet, or negative pressure unit of enclosure, as close as possible to the source of contamination. Instead, it is advisable to place the inlet or replacement vent as far away from the exhaust vent as possible. For multiform enclosure, it is advisable to have more replacement air vents and /or negative pressure units to avoid areas where the air rinses are poor.

Keywords: asbestos, demolition work, enclosure, air change rate, negative pressure

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty osana tutkimusprojektia, jonka tavoitteena on parantaa asbestipurkutyön turvallisuutta. Kiitän Tampereen yliopiston rakennetun ympäristön tiedekunnan rakennustekniikan rakenteiden korjaamisen ja elinkaartekniikan tutkimusryhmää saamastani diplomityöpaikasta ja tuesta diplomityön tekemisessä. Kiitän myös hankkeen muita osapuolia Työterveyslaitosta, Teknologian tutkimuskeskusta VTT Oy:tä ja Itä-Suomen yliopistoa yhteistyöstä sekä tutkimushankkeen rahoittajia, muun muassa Työsuojelurahastoa.

Tampereella, 1.11.2019

Niina Kemppainen

SISÄLLYSLUETTELO

KUVALUETTELO.....	V
1. JOHDANTO	2
2. ASBESTIPURKUTYÖHÖN LIITTYVÄ LAINSÄÄDÄNTÖ JA OHJEISTUS	4
2.1 Laki eräistä asbestipurkutyötä koskevista vaatimuksista (684/2015) ja siihen liittyvä ohjeistus.....	4
2.2 Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta (798/2015) ja siihen liittyvä ohjeistus.....	5
3. ASBESTIOSASTOINNIN RAKENTAMINEN	9
3.1 Osastoinnin alipaineistus ja ilmanvaihtuvuus	11
3.2 Virtaustekniikka osastoinnin suunnittelussa	15
3.3 Kohdepoistojen mitoittaminen	23
3.4 Häiriö- ja hätätilanteet.....	24
4. OSASTOINNIN SUOJAUSTEHOKKUUDEN TESTAUSMENETELMÄT.....	26
4.1 Mittauslaitteisto.....	26
4.2 Laboratoriokokeet	29
4.3 Virtauslaskenta.....	32
4.3.1 Osastointi 1	33
4.3.2 Osastointi 2	35
4.3.3 Osastointi 3	36
4.3.4 Osastointi 4	37
5. MITTAUSTULOKSET	40
5.1 Laboratoriokokeet	40
5.1.1 Vuototarkastelu merkkisavulla	40
5.1.2 Ilmanvaihtokerroin ja alipaine	40
5.1.3 Ilmanjakotavan tutkiminen merkkisavulla.....	42
5.2 Virtauslaskenta.....	46
5.2.1 Osastointi 1	46
5.2.2 Osastointi 2	48
5.2.3 Osastointi 3	49
5.2.4 Osastointi 4	50
5.3 Mittaustulosten luotettavuus	52
5.3.1 Laboratoriokokeet.....	52
5.3.2 Virtauslaskenta.....	53
6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULOSTEN HYÖDYNTÄMINEN.....	55
7. YHTEENVETO	56
LÄHTEET.....	57
LIITE A: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 1	
LIITE B: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 2	
LIITE C: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 3	
LIITE D: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 4	

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Osastointi, jossa on kolme sulkua, varoituskilpi, alipaineistaja ja imuri kohdepoistolle. (RT 18-11248 2016)</i>	<i>7</i>
Kuva 2.	<i>Asbestia sisältävän esineen tai pakkauksen varoitusmerkintä (Ratu 82-0347 2009)</i>	<i>11</i>
Kuva 3.	<i>Sisään- ja ulosvirtaus, kertavastuskertoimia (Sandberg 2014).....</i>	<i>19</i>
Kuva 4.	<i>Vastuskertoimia ympyräpoikkipintaiselle diffuusorille (Sandberg 2014, muokattu).....</i>	<i>19</i>
Kuva 5.	<i>Vastuskertoimia äkilliselle supistukselle (Bohl, 1988).....</i>	<i>20</i>
Kuva 6.	<i>Suuttimen vastuskertoimet (Bohl, 1988).....</i>	<i>20</i>
Kuva 7.	<i>Suunnanmuutoksen huomioiva kerroin (Sandberg 2014, muokattu)</i>	<i>21</i>
Kuva 8.	<i>Likimääräisiä kertavastuskertoimia putkikäyrille (Seppänen 1988, muokattu).....</i>	<i>21</i>
Kuva 9.	<i>T- kappaleiden likimääräisiä kertavastuskertoimia (Seppänen 1988, muokattu).....</i>	<i>22</i>
Kuva 10.	<i>Kuristuslaipan kertavastuskertoimia (Sandberg 2014).....</i>	<i>22</i>
Kuva 11.	<i>Ilmavirran nopeudet imun ja puhalluksen läheisyydessä (Seppänen 1988).....</i>	<i>23</i>
Kuva 12.	<i>Imuaukon virtaviivat ja ilman virtausnopeudet (Säämänen et al. 2004).....</i>	<i>24</i>
Kuva 13.	<i>Käytetyn koejärjestelyn pohjakuva mittauspisteineen (Linnainmaa et al. 2019).....</i>	<i>26</i>
Kuva 14.	<i>Kanavapuhaltimen ominaiskäyrä (Online Tuotevalikoimaluettelo 2016-2017)</i>	<i>27</i>
Kuva 15.	<i>Mittauslaitteiston poistoilmaputki, virtaussäätimet, piippu, poistoilmapuhallin ja sen tehon säädin. (Linnainmaa et al. 2019).....</i>	<i>28</i>
Kuva 16.	<i>Paine-eroanturi</i>	<i>29</i>
Kuva 17.	<i>Ensimmäisen osastoinnin pohjakuvat, joissa näkyvät mittauspisteiden sekä tulo- ja poistoilma-aukkojen paikat.</i>	<i>34</i>
Kuva 18.	<i>Toisen osastoinnin pohjakuva tulo- ja poistoilma-aukkoineen.</i>	<i>35</i>
Kuva 19.	<i>Kolmannen simuloitavan osastoinnin pohjakuva mitoilla ja mittauspisteillä.</i>	<i>36</i>
Kuva 20.	<i>Neljännän simuloitavan osastoinnin pohjakuva.....</i>	<i>38</i>
Kuva 21.	<i>Testiosastoinnin ilmanvaihtokerroin paine-eron funktiona eri seinärakenteilla (Linnainmaa et al. 2019)</i>	<i>41</i>
Kuva 22.	<i>Kaavio savukokeiden tuloksista.....</i>	<i>44</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CFD	Numeerinen virtausdynamiikka. CFD on lyhenne sanoista Computational fluid dynamics.
HEPA-suodatin	Erittäin hyvän suodatuskyvyn suodatin. HEPA on lyhenne sanoista High Efficiency Particulate Air filter.
HTP	Haitalliseksi tunnettu pitoisuus
tth/yks	Työmenekki. Ilmoittaa ajan, jonka työntekijä käyttää yhden suori-teyksikön tekemiseen, esimerkiksi tth/m ² .
TTL	Työterveyslaitos
UEF	Itä-Suomen yliopisto
VTT	Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy

1. JOHDANTO

Asbesti on yleisnimitys luonnossa esiintyville kuitumaisille silikaattimineraaleille. Asbestia on käytetty rakennusmateriaaleissa Suomessa vuodesta 1922 vuoteen 1994 asti. Runsainta asbestin käyttö rakentamisessa on ollut 1960–70-luvuilla. Asbestia on käytetty rakentamisessa sen hyvän mekaanisen ja kemiallisen kestävyuden vuoksi monissa eri paikoissa, muun muassa putkieristeissä, tasoitteissa, rakennuslevyissä, muovimatoissa, kaa-keleissa, palo-ovissa ja julkisivumateriaaleissa. (Työsuojeluhallinto 2019) Asbestille altistuminen aiheuttaa muun muassa asbestiplakkitautia, asbestoosia eli asbestipölykeuhkoa, keuhkosityöpää sekä keuhkopussin ja vatsakalvon kasvaimia. Asbestialtistumisesta aiheutuva sairaus ilmenee pitkällä viiveellä, 10–40 vuoden kuluttu altistumisesta. Nykyisin asbestipölylle voivat altistua asbestipurkutyötä tekevät henkilöt, jos henkilökohtainen suojaus tai osastointi ei ole kunnossa. Asbestille altistuneita henkilöitä arvioidaan olevan Suomessa noin 200 000 ja uusia asbestin aiheuttamia sairauksia tai sairausepäilyjä todetaan edelleen vuosittain noin 1000. (Hengitysliitto 2019)

Suomen lainsäädäntö on kiristynyt asteittain asbestin osalta. Vuonna 1977 kiellettiin ruis-kutetun asbestin käyttö ja vuonna 1988 asbestipurkutyöstä tuli luvanvaraista toimintaa. Vuoden 1993 alusta asbestipitoisten rakennusmateriaalien valmistuksesta ja maahantuon-nista tuli kiellettyä ja vuoden 1994 alusta asbestipitoisten rakennusmateriaalien myynti ja käyttöönnotto kiellettiin. (Työsuojeluhallinto 2019)

1.1.2016 astuivat voimaan uusi laki (684/2015) eräistä asbestipurkutyötä koskevista vaa-timuksista ja valtioneuvoston asetus (798/2015) asbestityön turvallisuudesta. Eri työsuojelun vastuualueille on tullut runsaasti kysymyksiä uusitun lainsäädännön soveltamisesta. Erityisesti asetuksen tulkintaohjeet ovat aiheuttaneet sekaannusta. Tutkimustietoa osas-toinnin ja alipaineistuksen käytöstä rakennustyömaan pölyntorjunnassa on ollut niukasti. Osa nykyisin käytössä olevista mittauskäytännöistä eivät ole järkeviä ja ne kaipaavat ke-hittämistä. Näin ollen oli perusteltua toteuttaa asbestiin liittyvä tutkimushanke, jossa py-rittiin kehittämään asbestipurkutyön turvallisuutta ja siihen liittyvien testaus- ja mittaus-toimintoja.

Kyseessä olevassa tutkimushankkeessa oli mukana Työterveyslaitos, Teknologian tutki-muskeskus VTT Oy, Itä-Suomen yliopisto ja Tampereen yliopisto. Hanke jakautui osas-toinnin, henkilökohtaisten suojainten ja ilmankäsittelylaitteiden toimivuuden todentami-sen mittausmenetelmien kehittämiseen. Tässä diplomityössä raportoidaan Tampereen yli-opiston osuutta yhteistyönä toteutetusta asbestihankkeesta. Tampereen yliopiston osuus projektissa oli asbestipurkuosastoinnin toimivuuden ja suojaustehokkuuden tutkiminen Tampereen yliopiston rakennushallissa suoritetuilla laboratorionkokeilla sekä virtauslas-kennalla.

Tampereen yliopiston rakennushalliin rakennettiin koejärjestely, jossa suoritettiin projektiin liittyvät laboratoriokokeet. Kokeissa tutkittiin erilaisten osastoivien seinärakenteiden tiiveyttä. Tiiveyttä testattiin eri koetilanteissa visuaalisesti merkkisavun avulla sekä mitaamalla ilmavirran nopeutta osastoinnin tulo- ja poistoilmakanavista ja paine-eroa osastoinnin ja ympäröivän tilan välillä. Osastoinnin ilman jakoa tutkittiin lisäksi virtauslaskennalla (Computational fluid dynamics). Virtauslaskennalla simuloitiin ilman liikettä erimallisissa osastoinneissa. Virtauslaskennalla pyrittiin löytämään ilmanjakotapa, jossa ilma huuhtoutuisi osastoinnista mahdollisimman hyvin.

Tässä työssä luvut 2-4 muodostavat kirjallisuusselvityksen. Luvussa 2 tutustutaan nykyiseen asbestilainsäädäntöön (laki 684/2015 ja VNa 798/2015) ja aluehallintoviraston tekemiin ohjeisiin lain ja asetuksen soveltamiseksi. Luvussa 3 käsitellään asbestipurkuosastoinnin rakentamista perehtymällä eri tahojen tekemiin ohjeisiin liittyen asbestipurkutyöhön sekä aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin, joissa käsitellään korjausrakentamisen pölyntorjuntaa ja asbestiosastoinnin toimivuutta. Kolmannessa luvussa käydään läpi myös virtaustekniikan perusteita. Kirjallisuusselvityksen jälkeen luvussa 4 esitellään laboratorion mittausrakenteisto ja siellä suoritettavat koetilanteet sekä virtauslaskennan lähtötiedot ja simuloitavat koetilanteet. Luvussa 5 käydään läpi laboratoriokokeista ja virtauslaskennasta saadut tulokset sekä arvioidaan tulosten luotettavuutta. Luvussa 6 kerrotaan tutkimuksesta tehdyt johtopäätökset ja luku 7 on työn yhteenveto.

2. ASBESTIPURKUTYÖHÖN LIITTYVÄ LAINSÄÄDÄNTÖ JA OHJEISTUS

2.1 Laki eräistä asbestipurkutyötä koskevista vaatimuksista (684/2015) ja siihen liittyvä ohjeistus

Laissa eräistä asbestipurkutyötä koskevista vaatimuksista (684/2015) säädetään asbestipurkutyöntekijän pätevyydestä, asbestipurkutyöluvasta ja niihin liittyvistä rekistereistä. Rakennusalan koordinaatioryhmä on tehnyt ohjeen uudistuneesta asbestilaista 11.4.2017.

Asbestipurkutyöntekijällä täytyy olla vaadittu pätevyys, joka on ammattitutkinto tai sen osa. Työntekijä täytyy olla myös rekisteröity asbestipurkutyöhön pätevien henkilöiden rekisteriin. Asbestipurkutyöhön tarvitsee muutoin luvan, paitsi jos kyseessä on lyhykestoinen huoltotyö, jossa ei käsitellä murenevia asbestimateriaaleja. Lyhykestoiseksi huoltotyöksi voidaan laskea muun muassa hyväkuntoisten asbestipitoisten materiaalien kapselointi tai päällystäminen, asbestikartoituksen tekeminen ja näytteiden otto. (Laki 684/2015)

Ilman lupaa voi tehdä lyhykestoisia töitä, joissa altistuminen asbestipölylle on selvästi vähäisempää kuin muissa asbestipurkutöissä. Lyhykestoinen työ on yksittäinen, kertaluontoinen ja nopea työsuoritus. Työstettävän materiaalin täytyy olla ehyt. Esimerkiksi venttiilitiivisteiden vaihto, palosuojalevyn irrottaminen, hyväkuntoisten eristeiden maalaus, asbestipitoisen lattiamateriaalin pinnoitus tai palo-oven lukon vaihto ei tarvitse asbestipurkutyölupaa. Myöskään huollossa tai korjauksessa ehjänä irrotettavat ja takaisin asennettavat asbestipitoiset rakenteet eivät edellytä lupaa. On myös muita asbestitöitä, joissa voi altistua asbestipölylle, mutta joihin ei tarvitse asbestipurkutyölupaa. Muun muassa kaivoksissa kaivos- ja rikastuspölyssä voi olla asbestikuitua. Näissä töissä on huolehdittava riittävästä suojaustoimenpiteistä. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017)

Asbestipurkutyölupaa haetaan lupaviranomaisena toimivalta työsuojeluviranomaiselta. Luvan voi saada 18 vuotta täyttänyt luonnollinen henkilö, joka ei ole konkurssissa ja jonka toimintakelpoisuutta ei ole rajoitettu eikä hänelle ole määrätty edunvalvojaa. Henkilö ei saa olla liiketoimintakiellossa eikä hänen aikaisempi toiminta työturvallisuusmääräysten noudattamisen osalta saa osoittaa hakijaa sopimattomaksi. Henkilöllä on oltava turvalliseen asbestipurkuun tarvittavat laitteet ja välineet sekä niiden huoltotilat. Oikeushenkilö voi saada luvan, kun hallintoon kuuluvat henkilöt, toimitusjohtaja ja yhtiömiehet täyttävät laissa määrätyt vaatimukset ja oikeushenkilöllä on turvalliseen asbestipurkuun tarvittavat laitteet sekä niiden huoltotilat eikä oikeushenkilön aikaisempi toiminta työturvallisuusmääräysten osalta osoita häntä sopimattomaksi. (Laki 684/2015) Tavallisimmin

asbestipurkutyössä tarvittavia laitteita ovat alipaineistuslaitteisto, esierottimella varustettu kohdepoistojärjestelmä, kohdeimuri tai suurtehoimuri sekä laitteiden ja vaatteiden puhdistamista varten oleva pölynimuri. Henkilösuojaimia täytyy olla myös käytettävissä riittävä määrä. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017)

Asbestipurkutyössä käytettävien laitteiden ja välineiden huolto ja puhdistus lasketaan asbestityöksi, joka on tehtävä huoltotilassa. Huoltotilan on oltava lämmin, lujarakenteinen ja sen lattian ja seinien tulee kestää vesipesua vähintään roiskekorkeudelle. Kulku huoltotilaan järjestetään kolmiosaisen lujarakenteisen sulkutunnelin kautta, jonka ovirakenteet voivat olla muovisia. Huoltotila on alipaineistettava ympäröiviin tiloihin nähden vähintään 5 Pascalin paine-erolla. Huoltotilan ilmankäsittelylaitteiden täytyy olla asbestipurkutyöhön soveltuvia ja ne tulee tulpata, kun työ tilassa on päättynyt. Huoltotilasta voidaan tehdä huoltotilasopimus tai laitteiden huollosta voidaan tehdä huoltosopimus. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017)

Lupaviranomainen pitää työsuojelun valvontaa ja edistämistä varten rekisteriä asbestipurkutyöluvista sekä asbestipurkutyön tekemiseen pätevistä henkilöistä (Laki 684/2015). Rekisteröityminen on edellytys asbestipurkutyön suorittamiseen. Rekisteristä saadaan tietää muun muassa pätevien työntekijöiden lukumäärä ja sitä voidaan hyödyntää asbestipurkutyöntekijöiden pätevyyden tarkistamisessa. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017)

Ennen uuden lain voimaan tuloa eli ennen vuotta 2016 myönnetty asbestipurkutyövaltuutukset ovat voimassa kaksi vuotta eli 2017 vuoden loppuun saakka. Työntekijä, joka on suorittanut ennen 1.1.2011 hyväksytyyn koulutuksen asbestipurkutyöhön, saa tehdä asbestipurkutyötä vuoden 2017 loppuun saakka. (Laki 684/2015)

2.2 Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta (798/2015) ja siihen liittyvä ohjeistus

Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta (798/2015) koskee asbestityötä. Rakennusalan koordinaatioryhmä on tehnyt uudesta asbestiasetuksesta ohjeen 11.4.2017.

Asbestipurkutyöllä tarkoitetaan asbestia sisältävien rakenteiden purkamista ja poistamista, rakenteiden suojausta, siivoamista ja muuta vastaavaa purkamiseen ja poistamiseen liittyvää työtä, jossa voi altistua asbestipölylle. Asbestilla tarkoitetaan seuraavia kuitumaisia silikaatteja: aktinoliittiasbesti, amosiittiasbesti, antofylliittiasbesti, krysotiili, krokidoliitti, tremoliittiasbesti ja erioniitti. (VNa 798/2015)

Työnantajan on huolehdittava, ettei työntekijä työssään altistu asbestille raja-arvoa suuremmille pitoisuuksille. Raja-arvo, joka on 0,1 kuitua/ cm³ hengitysilmaa 8 tunnin aikapainotettuna keskiarvona, on säädetty Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/148/EY 8 artiklassa. Huomioon otetaan kuitumaiset asbestihiukkaset, joiden pituus

on vähintään 5 µm ja läpimitta enintään 3 µm ja pituuden suhde läpimittaan on 3:1 tai enemmän. Asbestikuitupitoisuutta työtilassa täytyy seurata säännöllisin väliajoin tehtävin mittauksin, jotka dokumentoidaan. (VNa 798/2015)

Alue, jolla voi altistua asbestille, täytyy merkitä varoituksilla, rajata selkeästi ja asbestin kulkeutuminen alueen ulkopuolelle täytyy estää. Asbestipurkutyö täytyy tehdä niin, että asbestipölyn muodostuminen minimoidaan ja sen leviäminen estetään. Asbestia sisältävien rakenteiden purku tehdään erikseen ennen muita purkutöitä. (VNa 798/2015)

Asbestikartoitus tehdään kaikkiin rakennushankkeisiin, joihin voi sisältyä asbestipurkutyötä (VNa 798/2015). Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaikkiin ennen vuotta 1994 rakennettuihin rakennuksiin on tehtävä asbestikartoitus ennen purkutöiden aloitusta, jos ei muulla tavalla voida todentaa, että rakennuksessa ei ole asbestipitoista materiaalia. (Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, Työsuojelun vastualue 2015) Kartoituksessa paikallistetaan rakennuksessa oleva asbesti, selvitetään asbestin ja sitä sisältävien materiaalien laatu ja määrä sekä niiden pölyävyys purettaessa. Asbestikartoittajalla vaaditaan riittävää perehtyneisyyttä asbestiin ja rakenteiden purkamiseen. (VNa 798/2015) Asbestikartoittajan pätevyyden määrittäminen asetuksessa on melko väljä. Asbestikartoittajan ammattitaitoa voidaan osittaa esimerkiksi Eurofins Expert Services Oy:n myöntämällä asbesti- ja haitta-aineasiantuntijan henkilösertifikaatilla (Eurofins Expert Services Oy 2018). Asbestikartoitus dokumentoidaan ja se luovutetaan asbestipurkutyöhön ryhtyvälle. Asbestipurkutyöstä tehdään myös kirjallinen turvallisuussuunnitelma, jossa ilmoitetaan tehtävät toimenpiteet altistumisen arvioimiseksi, vähentämiseksi ja seurannaksi. Työnjohtajan on seurattava, että asbestipurkutyötä tehdään turvallisuussuunnitelman mukaisesti. (VNa 798/2015)

Asbestipurkutyön työmenetelmiä ovat osastointimenetelmä, purkupussimenetelmä, irrotus kokonaisena, upotusmenetelmä, märkäpurku tai muu teknisen kehityksen mahdollistama menetelmä, jolla saavutetaan vastaava turvallisuustaso. Osastointimenetelmää on käytettävä, kun puretaan krokidoliittia tai materiaalin asbestipitoisuudesta ei ole varmuutta. (VNa 798/2015) Kuvassa 1 on puurangoista ja muovista tehty osastointi.



Kuva 1. Osastointi, jossa on kolme sulkua, varoituskilpi, alipaineistaja ja imuri kohdepoistolle. (RT 18-11248 2016)

Osastointimenetelmässä altistumisalue erotetaan ilmastollisesti muusta ympäristöstä vähintään 5 Pascalin ja krokidoliittia purettaessa 10 Pascalin paine-erolla. Paine-eroa seurataan laitteella, joka hälyttää haitallisesta paine-eron alittumisesta. Kulkuyhteys osastoon järjestetään siten, että asbestipitoisten tavaroiden käsittely ja työntekijöiden puhdistautuminen pystytään tekemään turvallisesti. Työntekijällä täytyy olla vaatimustenmukaiset suojavaatteet ja henkilösuojaimet. Asbestipurkuosastossa tulee käyttää puhallinkäyttöistä kokonaamaria ja krokidoliittia purettaessa kokonaamaria, jossa hengitysilma tuotetaan paineilmalaitteella. (VNa 798/2015)

Ilmankäsittelylaitteiden suodattimien erotusaste täytyy varmistaa. Puhtaisiin tiloihin ei saa päästä enempää asbestipölyä kuin $0,01$ kuitua/ cm^3 :ssä ilmaa. Ilmankäsittelylaitteelle tehdyt huollot ja muut toimenpiteet merkitään huoltokirjaan. (VNa 798/2015) Työnantajan on mittauksin tarkistettava ilmankäsittelylaitteiden toimintakunto. Mittaukset täytyy tehdä aina ennen uuden laitteen käyttöönottoa sekä korjausten jälkeen. Mittausten yhteydessä tarkkaillaan myös työilman kuitupitoisuutta ja mittaukset tehdään olosuhteissa, joissa ilmassa on enemmän kuin $0,01$ kuitua/ cm^3 . Jos poistoilman kuitupitoisuus ylittää raja-arvon $0,01$ kuitua/ cm^3 , on ilmankäsittelylaite huollettava tai korjattava. Työvälineet on huollattava ja puhdistettava riittävän usein työn aikana ja aina ennen siirtymistä uudelle työmaalle. Laitteiden käyttötuntimäärää seurataan ja suodattimet vaihdetaan vähintään valmistajan ohjeen mukaisesti tai useammin, jos on tarve. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017)

Asbestipurkutyön jälkeen altistumisalue on huolellisesti puhdistettava asbestista ja sitä sisältävästä materiaalista. Puhdistuksen jälkeen on mitattava, ettei ilman asbestipitoisuus ylitä annettua raja-arvoa. (VNa 798/2015) Asbestipurkutyön jälkeen ennen osastoinnin purkamista osastoinnin puhtaus on varmistettava aggressiivisella ilmamittauksella. Osastointirakenteet voidaan purkaa, kun ilmanäytteen analyysilausunto osoittaa tilan puhtaaksi. Tilojen luovutuksesta tehdään asiakirja, johon kirjataan tilan tiedot, jotka vaikuttavat jatkokäyttäjän turvallisuuteen kuten esimerkiksi rakenteisiin jääneet asbestipitoiset materiaalit. Asiakirjaan liitetään myös ilmanäytteen analyysilausunto. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017)

3. ASBESTIOSASTOINNIN RAKENTAMINEN

Työkohde tulee valmistella ennen osastoinnin rakentamista. Valmisteluun liittyy esimerkiksi alueen siivous irtojätteestä, vaikeasti puhdistettavien osastoon jäävien kohteiden suojaus asbestipölyltä ja ilmastointi- ja tuuletusjärjestelmien aukkojen sekä läpivientien peittäminen tiiviisti muovikalvolla ja teippaamalla. (SLIC 2006) Kulku asbestityökohteeseen tulee estää asiattomilta ja varustaa varoitusmerkinnöillä, joista käy ilmi, että työpäikällä käsitellään asbestia. Jos kyseessä on krokidoliittipurku, täytyy siitä olla tieto varoitusmerkinnöissä. (Ratu 82-0347 2009)

Osastoinnin rakentamisessa käytetään hyväksi rakennuksen huonejakoa, jos se on mahdollista. Muuten käytetään tilapäisiä seinärakenteita, jotka voidaan rakentaa tarkoitusta varten kehitetyistä muovi- tai metallikehikoista tai puurungosta ja muovikalvosta. Muovikalvojen saumat, liitoskohdat ja läpiviennit teipataan niin, että seinärakenteesta tulee tiivis. Tarvittaessa voidaan lattiat suojata aaltopahvilla, muovitetulla kartongilla tai muovilla. (Ratu 82-0347 2009) Muovikalvon voi kiinnittää rungon sisäpuolelle, jolloin runko ei likaannu asbestista ja sitä voi mahdollisesti käyttää uudelleen. (Ekman 2011) Sisäpuolella kiinnitykset saattavat kuitenkin alipaineen vaikutuksesta väsyä ja irrota helpommin kuin rungon ulkopuolelle asennetun muovin kiinnikkeet. Jos muovin kiinnittää rungon sisäpuolelle, kannattaa muovikalvo kiinnittää runkoon esimerkiksi listan avulla.

Kulku osastointiin järjestetään sulkutunnelin kautta, jossa on kolme osaa. Sisimmässä eli osastoinnista poistuttaessa ensimmäisessä osassa tulee olla HEPA-suodattimella varustettu imuri, jolla työntekijä pystyy imuroimaan likaisesta osastoinnista tullessaan suojavaatteensa ja jätessä, johon työntekijä voi jättää käytetyt kertakäyttöiset suojavaatteet. Sulun keskimmäisessä osassa, joka on vielä altistumisvaarallinen tila, on työntekijän pysyttävä peseytymään ja puhdistamaan henkilösuojainten ja jalkineiden pinnat. Uloimassa eli osastoinnista poistuttaessa viimeisessä osassa on naulakko työntekijän pitovaatteille ja henkilösuojaimille. (Ratu 82-0347 2009)

Sulkutila voidaan rakentaa puurangoista ja muovikalvosta tai lyhytaikaisessa käytössä voidaan käyttää valmissulkua, joka on tehty muovista tai pahvista. Pitkäaikaisessa käytössä voidaan käyttää elementtirakenteista sulkua, johon voidaan asentaa suihku ja vedensuodatusjärjestelmä. Jos kohteessa ei ole mahdollisuutta tehdä pesutiloja työntekijöille, voi sulkutilan myös korvata tarkoitukseen kehitetyllä perävaunuyksiköllä. (Ratu 82-0347 2009) Sulkutilan osien on oltava riittävän tilavat, jotta työntekijä pystyy puhdistautumaan ja pukeutumaan niissä sekä kuljettamaan jätteet pois. Sulkutilan osan vähimmäispinta-alana voidaan pitää 1 m^2 ja korkeutena 1,8 m. Sulkutunnelin läpi virtaa ilmaa osastoinnin alipaineen vaikutuksesta puhtaasta tilasta likaiseen päin, mikä huuhtoo ja puhdistaa sulkutunnelia. Alipaineistuksen häiriintyessä sulkutunnelin kulkuaukkojen

ovien on sulkeuduttava tiiviisti, ettei asbestipölyä pääse leviämään ympäristöön. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017) Ovi voidaan tehdä esimerkiksi kolmesta muovikerroksesta. Keskimmäinen muovikerros teipataan kaikilta sivuilta kiinni ja sen keskelle tehdään aukko, josta työntekijä mahtuu kulkemaan. Ulommat muovikerrokset teipataan yläreunasta ja toisesta sivusta kiinni tunnelin runkoon ja niiden alareunoihin kiinnitetään puurimat pitämään muovit paikoillaan. Ovissa voidaan käyttää myös vetoketjuja, jotka ovat tarkoituksenmukaisia. (Ratu 82-0347 2009) Sulkutilan oven aukon muodolla ei ole Health and Safety Executive:n (HSE) tutkimuksen mukaan juurikaan merkitystä ilmavirtoihin, mutta aukon koko ja ovien paino vaikuttavat hieman osastoinnin alipaineeseen. Mitä isompi reikä on ja kevyempi ovi sitä pienempi on paine-ero. (Pocock *et al.* 2013)

Jos osaston suojaus toteutetaan poikkeavalla tavalla, täytyy siihen saada työsuojeluviranomaisen suostumus. Tällöin täytyy perustella poikkeavan suojauksen käyttö ja tehdä selvitys käytettävästä menetelmästä sekä sen suojaustehokkuudesta. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017)

Osastoinnin rakentamiseen kuluva aika voi arvioida Ratu 84-0386 ohjekortin avulla, josta löytyy työmenekit korjaustöiden yhteydessä tehtävien suojauksien tekemiselle. Ohjekortin mukaan puurunkoisen suojaseinän rakentamiseen muoviverhouksella menee $0,17 \text{ tth/m}^2$, kovalevyverhouksella ja muovilla helpossa kohteessa $0,2 \text{ tth/m}^2$ ja vaikeassa kohteessa $0,4 \text{ tth/m}^2$. Suojaseinään tehtävien oviaukkojen tekemiseen kuluu lisäksi 2 tth/aukko . Työmenekkiä lisää myös muun muassa suojaseinän normaalia suurempi korkeus ($>2,8\text{m}$), kaksinkertainen levytyks tai jos rakenteessa on paljon kulmia. Työmenekkiin vaikuttaa myös joko suurentavasti tai pienentävästi muun muassa työkohteen ahtaus, työmaajärjestelyt ja siirtomatkat sekä työntekijöiden kokemus. Lattian suojaukseen pahvilla kuluu $0,04 \text{ tth/m}^2$ ja ikkunoiden ym. suojaukseen sisäpuolelta kuluu $0,5 \text{ tth/m}^2$. (Ratu 84-0386 2011)

Purkutyössä syntynyt asbestijäte kerätään tiiviisti suljettaviin ja tarpeeksi lujiin pakkauksiin, joista asbestipöly ei pääse leviämään. Pakkaus voi olla esimerkiksi lasikuituvahvistettu säkki, tynnyri tai vastaavan lujuinen pakkaus. Jätepakkausten pinnat puhdistetaan ja mahdollisesti ruiskutetaan pölynsidonta-aineella ennen kuin jätepakkaukset tuodaan asbestipurkuosastoinnin ulkopuolelle. Asbestijätettä sisältävät pakkaukset merkitään varoitusmerkinnällä. Kuvassa 2 on malli varoitusmerkinnästä. Jos jätteessä on krokidoliittia, korvataan varoitusmerkinnän sanat ”sisältää asbestia” sanoilla ”sisältää krokidoliittia/ sinistä asbestia”. Asbestijätettä ei pitäisi välivarastoida työmaalla, vaan se tulisi viedä peitetylle jätelavalle tai suljettavaan jätekonttiin. Asbestijätteen siirrossa voi käyttää roska-kuילua, jos roskakuilu ja jätelava tai erityinen pudotuskontti on alipaineistettu alipaineistajalla, jossa on HEPA-suodatin. (Ratu 82-0347 2009) Asbestijäte kuljetetaan peitetyllä jätelavalla erillään muusta jätteestä asbestijätettä vastaanottavalle kaatopaikalle tai jätteenkäsittelylaitokselle. (RT 18-11248 2016)



Kuva 2. Asbestia sisältävän esineen tai pakkauksen varoitusmerkintä (Ratu 82-0347 2009)

3.1 Osastoinnin alipaineistus ja ilmanvaihtuvuus

Tavoitteena on, että ilma virtaisi alipaineistuksen vaikutuksesta osastointiin puhtaasta tilasta hallitusti tuloilma-aukkojen kautta ja poistuisi ilmanpuhdistimen kautta osaston ulkopuolelle yleensä ulkoilmaan. Asbestityössä käytettävien ilmapuhdistuslaitteiden erotusaste tulee olla 99,97% ilmavirtauksensa kuidusta eikä niissä saa olla vuotokohtia. Jos vain on mahdollista, ilmapuhdistuslaitteet sijoitetaan osastoinnin ulkopuolelle. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017). Poistokanavana voidaan käyttää taipuisaa muoviputkea kuten muovista haitariletkeä tai muovikalvosukkaa, jonka vahvuus on vähintään 0,10 mm. Tulo- ja poistoilma-aukot tulee sijoittaa niin, että ilmavirrat huuhtelevat osastoa mahdollisimman hyvin. (Ratu 82-0347 2009) Ensisijainen korvausilman tuloreitti osastoon on sulkutunnelin kautta. Sen lisäksi osastoon voidaan tehdä erillisiä korvausilma-aukkoja. (Rakennusalan koordinaatioryhmä 2017) Käytännössä osastointiin virtaa myös lähes aina vuotoilmavirtaa osastoinnin epätiivetyksistä. Krokidoliittipurussa sulkutunnelista tuleva korvausilma yksin ei riitä, vaan lisäksi tulee tehdä erilliset korvausilma-aukot, jotka ovat varustettu suodattimilla (Ratu 82-0347 2009).

Alipaineistuksen jatkuvuus pitäisi varmistaa jollain tapaa. Suositeltavaa on järjestää alipaineistus kahdella laitteella, jotka on kytketty eri virtapiireihin tai varata alipaineistajalle erillinen työmaakeskus, jolloin alipaineistajalla on oma sulakkeensa. Tällöin toisen laitteen pettäessä ei alipaineistus katoa kokonaan. (Ratu 82-0347 2009) Alipaineistajan ulospuhalluksessa olisi myös hyvä olla läpät, jotka tiivistyvät ja estävät ilman takaisinvirtauksen alipaineistajan pysähtyessä (Seppälä 2016). Alipaineistuksen toimivuus tarkastetaan ennen purkutyön aloittamista ja osastointiin menemistä. Tarvittaessa voidaan alipaineistusta testata savukokeilla. (Ratu 82-0347 2009)

Alipaineistus ja ilmanvaihto tulee mitoittaa vaadittavan paine-eron lisäksi niin, että osastoinnin ilma vaihtuu 10 kertaa tunnissa ja krokidoliittipurussa 20 kertaa tunnissa. Osastoinnin olisi pysyttävä kaikissa tilanteissa alipaineisena. Alipainetta tulee seurata laitteella, joka rekisteröi ja hälyttää alipaineen haitallisesta muutoksesta joko huomioäänellä ja/tai huomiovalolla. (Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, Työsuojelun vastuualue 2015) Ei ole myöskään hyvä, jos alipaine on liian suuri, sillä se saattaa repiä auki suojaseinien tiivistyksiä, vaikeuttaa ovien aukaisemista ja häiritä rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmää (Koski 2013).

Purkutyö tulee suorittaa tavalla, joka muodostaa mahdollisimman vähän pölyä. Purettavat rakenteet ja materiaalit pyritään poistamaan mahdollisimman ehjinä. Materiaalin pölyävyyttä voidaan vähentää kostuttamalla pinnat tai purkutilan ilma tai injektoimalla purettava materiaali vesisumulla, jossa on pintajännitystä alentavaa kostutus- tai pölynsidontainetta. Kostutusta käytettäessä on hyvä kuitenkin huomioida, että korkea suhteellinen kosteus rasittaa HEPA-suodattimia, jos ne eivät ole niin sanotusti märkälujia. Työssä irtaavaa pölyä voidaan poistaa korkea- ja matalapaineisella kohdepoistolla. Korkeapaineisella kohdepoistolla pöly poistetaan työväliseisiin liitetyllä tai pölyn muodostumiskohteeseen kohdistetulla H luokan teollisuusimurilla, jossa on jätesäiliö, esierotin ja HEPA-suodatin. Matalapaineinen kohdepoisto on HEPA-suodattimella varustettuun ilmanpuhdistajaan yhdistetty pölynkerääjä, jossa on karkeasuodatin. Matalapaineinen kohdepoisto sijoitetaan purkukohteen välittömään läheisyyteen, josta se sieppaa ilmassa olevaa pölyä. (Ratu 82-0347 2009)

Korvausilma-aukkojen vaikutusta osastoinnin paine-eroon on tutkittu HSE:n (Health and Safety Executive) tutkimuksessa. Tilavuudeltaan 60 m³ osastoon korvausilma johdettiin aluksi vain sulkutunnelin kautta, minkä jälkeen osastoinnin seiniin asennettiin yksitellen 1-4 suodattimilla varustettua lisäkorvausilma-aukkoa. Jokaisen korvausilma-aukon läpi virtasi osastointiin noin 100–265 m³/h ilmaa. Ilman lisäkorvausilma-aukkoja osastoinnin paine-ero oli -9,6 Pa, yhdellä lisäkorvausilma-aukolla -8.7 Pa, kahdella lisäkorvausilma-aukolla -7,9 Pa, kolmella lisäkorvausilma-aukolla -6,5 Pa ja neljällä lisäkorvausilma-aukolla -5.6 Pa. Kukin korvausilma-aukko pienensi osaston paine-eroa noin yhdellä Pascalilla. Samassa tutkimuksessa tutkittiin myös alipaineistajan tulo- ja/tai poistoaukkoon liitettyjen joustavien lisäputkien (6 m tai 12 m) ja putkien muodostamien 90° kulmien vaikutusta tilavuusvirtaan. Alipaineistajaan lisätyt putket alensivat tilavuusvirtaa noin 1 %/m ja 90° kulmat noin 2 %/kpl. Alipaineistajan tulopuolelle lisätyillä putkilla oli hieman pienempi vaikutus tilavuusvirtaan kuin poistopuolelle lisätyillä putkilla. (Pocock *et al.* 2013)

HSE:n tutkimuksen mukaan ilman tilavuusvirran suuruudella on suurempi merkitys osastoinnin huuhteluvaikutuksen kannalta kuin alipaineistajan sijainnilla tai sulkutunneleiden lukumäärällä. Toisaalta epäsäännöllisen muotoisissa osastoinneissa alipaineistuslaitteiston sijaintipaikalla voi olla merkittävä vaikutus huuteluvaikutukseen. Sen vuoksi alipaineistuslaitteistot on hyvä sijoittaa sulkutilaa vastapäätä olevalle seinälle. Tutkimuksessa

selvitettiin myös ilmanvaihtuvuutta merkkiainetekniikalla erimuotoisissa osastoinneissa, joiden tilavuudet olivat 60 m^3 ja 87 m^3 . Ilmanvaihtuvuutta seurattiin useammasta mittauspisteestä eri tilavuusvirroilla ($384\text{--}1920 \text{ m}^3/\text{h}$). Tutkimuksessa havaittiin, että tilavuusvirran ollessa osastoinnin sisällä vähemmän kuin $500 \text{ m}^3/\text{h}$ ilma sekoittui huonosti. Esimerkkiosastoinneissa ilmanvaihtokertoimella 8 1/h pienemmän osastoinnin ilman sekoittuminen oli huonoa, mutta suuremmassa osastoinnissa ilma sekoittui hyvin. Tutkimuksessa siis todetaan näin ollen osastoinnin ilman sekoittumiseen vaikuttavan enemmän tilavuusvirta kuin ilmanvaihtokerroin. (Pocock *et al.* 2013)

Samassa HSE:n tutkimusraportissa korjataan myös yleinen harhaluulo ilmanvaihtokertoimesta. Usein käsitetään esimerkiksi ilmanvaihtokertoimen 8 1/h tarkoittavan sitä, että osastoinnin koko ilma vaihtuu ja kaikki ilmassa olevat epäpuhtaudet huuhtoutuvat $1/8$ tunnissa eli $7,5$ minuutissa. Käytännössä ilma ei liiku osastoinnin sisällä ideaalivirtauksen tavoin, vaan ilman epäpuhtauksien pitoisuus laskee eksponentiaalisesti, mikäli ilma on sekoittunut täydellisesti. Eli yhden ilmanvaihdon jälkeen epäpuhtauksien pitoisuus olisi $1/e$ eli noin $36,8 \%$ alkuperäisestä pitoisuudesta ja kahden vaihdon jälkeen epäpuhtauksia olisi jäljellä $1/e^2$ eli noin $13,5 \%$ alkuperäisestä pitoisuudesta. (Pocock *et al.* 2013) Taulukkoon 1 on listattu edellä mainitulla tavalla lasketut eri ilmanvaihtokertoja vastaavat jäljelle jäävät epäpuhtauksien pitoisuudet. Tarkastelu on kuitenkin teoreettinen. Kuitu kulkeutuu ilmavirran mukana eikä välttämättä leviä koko huonetilaan kaasun tavoin. Käytännössä siis tulo- ja poistoilma-aukkojen sijainnit suhteessa epäpuhtauslähteeseen vaikuttavat vapautuvien kuitujen huuhtoutumiseen osastoinnista.

Taulukko 1. Ilmanvaihtokerrat ja teoreettiset epäpuhtauksien jäljelle jäävät pitoisuudet

Ilmanvaihto [krt]	Jäljelle jäävä pitoisuus [%]
1	36,8 %
2	13,5 %
3	5,0 %
4	1,8 %
5	0,7 %
6	0,2 %
7	0,09 %
8	0,03 %
9	0,01 %
10	0,005 %

Kun rakennuksen sisällä olevan osastoinnin alipaineistusta suunnitellaan, on hyvä huomioida ympäröivän rakennuksen painesuhteet ja ilmanvaihto. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä on aina rakennuskohtainen. Esimerkiksi julkisissa rakennuksissa ilmanvaihdon alasajo ilta- ja yöaikaan saattaa muuttaa osastoinnin ylipaineiseksi ympäröiviin tiloihin nähden, jolloin on riski, että pöly pääsee leviämään osastoinnin ulkopuolelle (Kokkonen *et al.* 2013). Tavallisesti rakennukset suunnitellaan ulkoilmaan nähden hieman alipaineisiksi. Rakennuksen paineet suunnitellaan niin, että ilma virtaa puhtaista tiloista niin

sanottuihin likaisiin tiloihin. Asuinrakennuksissa poistoilman päätelaitteita on ainakin keittiöissä, keittokomeroissa, kylpyhuoneissa, vessoissa sekä kodinhoito- ja vaatehuoneissa. (Suomen rakentamismääräyskokoelma D2 2012) Rakennuksen ilmanvaihdon voi järjestää painovoimaisesti, koneellisella poistoilmanvaihdolla tai koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla. Painovoimainen ilmanvaihto toimii ulko- ja sisäilman lämpötilaerojen ja tuulen vaikutuksesta. Painovoimainen ilmanvaihtojärjestelmä on ollut yleinen ennen 1960 –lukua rakennetuissa asuinrakennuksissa. Koneellisessa poistoilmanvaihdossa ilmaa poistetaan koneellisesti poistoilmakanavien kautta ja korvausilma virtaa sisään ulkoseinissä tai ikkunoiden yhteydessä olevien korvausilmaventtiilien kautta. Koneellinen poistoilmajärjestelmä on ollut yleisin ilmanvaihtojärjestelmä asuinkerrostaloissa 1960- luvulta lähtien. Pientaloissa järjestelmä yleistyi 1970- luvulla. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa ilma vaihtuu hallitusti tulo- ja poistoilmakoneiden avulla. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä on yleistynyt 1990- luvun lopulta lähtien. (RT 56-10591 1995, RT 56-10831 2004)

Keskeinen osa ilmanvaihtojärjestelmää on ilmanjako, jolla pyritään poistamaan epäpuhtauksia tilasta mahdollisimman nopeasti ja niin ettei epäpuhtaudet pääse leviämään laajalle alueelle. Osastointia ympäröivän tilan ilmanjako ei välttämättä merkittävästi vaikuta osastoinnin suunnitteluun, mutta ilmanjaon perusteiden tuntemisesta voi olla hyötyä suunniteltaessa osastoinnin sisäistä ilmanjakoa. Yleisimpiä ilmanjakotapoja ovat sekoitettava ja syrjäyttävä ilmanjako. Sekoittavassa ilmanjaossa tuloilma virtaa huoneeseen huonetilan yläosasta. Syrjäyttävässä ilmajaossa tuloilma johdetaan tilaan huoneen alaosasta. Poistoilma poistetaan huonetilan yläosasta tuloilmajärjestelmästä riippumatta. (RT 56-10591)

Sekoittavassa ilmanjaossa tuloilma johdetaan tilaan suurella nopeudella, jolloin tuloilma sekoittuu tehokkaasti tilan ilmaan ja tilaan muodostuu tasaiset olosuhteet. Tuloilmavirta muodostaa pääosan tilan virtauskentästä. Lämpötilaeroista johtuen syntyy tilaan myös sekoittavia konvektiovirtauksia. Poistoilmalaitteiden muodolla ei ole suurta vaikutusta ilman virtauskenttään, mutta niiden sijainnit vaikuttavat oleellisesti ilmanvaihdon tehokkuuteen. Oikea poistoilmalaitteen sijainti on kohdassa, jossa tilan ilma on likaisinta. Sekoittava ilmanjako soveltuu hyvin tiloihin, joissa ei ole suuria paikallisia epäpuhtauslähteitä. Syrjäyttävää ilmanjakoa sitä vastoin käytetään tiloissa, joissa muodostuu runsaasti epäpuhtauksia. Syrjäyttävässä ilmanjaossa pyritään välttämään ilman sekoittumista. Tilaan johdetaan pienellä nopeudella tuloilmaa, joka on hieman tilan ilmaa viileämpää. Viileämpi raikas ilma syrjäyttää lämpimämmän vanhan likaisen ilman, joka siirtyy tilan yläosaan. (Seppänen 1996)

Sekoittavan ja syrjäyttävän ilmanjaon lisäksi on useita muitakin ilmanjakotapoja, joista yhtenä mainittakoon mäntäilmanjako. Mäntäperiaatteessa yhdensuuntainen tuloilma johdetaan tilaan pienellä nopeudella joko vaaka- tai pystysuunnassa koko tilan poikkipinnalle. Mäntäilmanjako vaatii riittävän suuren tuloilmavirran ja tuloilman liikemäärän,

jotta se pystyy voittamaan häiriövirtaukset. Tätä ilmanjakotapaa käytetään muun muassa puhdastiloissa ja leikkaussaleissa. (Sandberg 2014)

Ilmanjaon toimintaa voidaan tutkia määrittelemällä ilman ikä tilan tietyssä pisteessä tai laskemalla ilmanvaihdon hyötysuhde. Ilman ikä voidaan määrittää merkkiainemittauksella sekoittamalla ilmaan vaaratonta kaasua ja seuraamalla kaasun pitoisuutta tarkasteltavissa pisteissä. Tilaan saapuvan ilman iän ajatellaan olevan nolla ja tilassa edetessä ilma vanhenee. Ilman ikä kertoo ilman tilassa kulkeman ajan ennen päätymistä tarkasteltavaan pisteeseen. Pieni ilman ikä kertoo kyseisessä pisteessä tuloilman toiminnan tehokkuudesta. Vastaavasti korkea ilman ikä viestii tarkasteltavan pisteen olevan ilmanjaon katvealueessa, jossa ilma vaihtuu heikommin. Ilmanjaon hyötysuhde ilmaisee tuloilman hyödyntämisen koko tilan ilmanjaon kannalta. Hyötysuhde on heikko, jos tilassa on oikosulkuvirtauksia ja vastaavasti hyvä kun tuloilma virtaa tilan poikki ja saapuu poistoon mahdollisimman myöhään, jolloin se on tullut hyödynnettyä parhaiten. Paras ilmanvaihdon hyötysuhde (100%) on mäntäilmanvaihdoilla. Täysin sekoittavalla ilmanjaolla hyötysuhde on 50%. (Sandberg 2014)

3.2 Virtaustekniikka osastoinnin suunnittelussa

Osastointia suunniteltaessa ja alipaineistajaa valitessa lasketaan tarvittava tilavuusvirta, joka alipaineistajan täytyy pystyä tuottamaan. Tilavuusvirta saadaan laskettua kertomalla osastoinnin tilavuus halutulla ilmanvaihtokertoimella kaavan 1 mukaisesti. Kaavassa (1) on esitetty myös tilavuusvirran ja poistoilma-aukon poikkipinta-alan sekä poistoilmavirran nopeuden yhteys. (Kokkonen *et al.* 2013)

$$Q = N \cdot V_{osastointi} = v \cdot A \cdot 3600 \quad (1)$$

jossa Q on alipaineistajan tilavuusvirta [m^3/h]

N on haluttu ilmanvaihtokerroin [$1/\text{h}$]

$V_{osastointi}$ on osastoinnin tilavuus [m^3]

v on ilmavirran keskinopeus poistoilmakanavassa [m/s]

A on poistoilmakanavan poikkipinta-ala [m^2]

Alipaineistajien tiedoissa ilmoitetaan yleensä ilmamäärä yksikössä m^3/h . Koneen tuottama ilmamäärä tulisi ilmoittaa erikseen ilman suodattimia, suodattimien kanssa sekä myös mahdollisesti likaisilla suodattimilla. Tarvittavan tilavuusvirran perusteella tulisi valita tarpeeksi tehokkaat alipaineistajat. Alipaineistajan valinnassa pitäisi ottaa huomioon myös suodattimien likaantuminen ja siitä aiheutuva ilmamäärän lasku. Alipaineen arvolle asetettu vähimmäisvaatimus -5 Pa voidaan saada pienelläkin tilavuusvirralla ai-

kaan, jos osastointi tehdään tarpeeksi tiiviiksi. Huomiota pitäisi kiinnittää alipaineen lisäksi ilman vaihtuvuuteen, jotta epäpuhtaudet huuhtoutuisivat tehokkaasti pois osastoinnista.

Osastoinnin ilmanvaihdon suunnittelussa poistoilmavirran ja osastoinnin alipaineen välistä yhteyttä voidaan arvioida karkeasti Bernoullin yhtälön avulla (kaava 2). Yhtälö kuvaa kokoniasenergian säilymistä virtauksille, kun aine ajatellaan kokoonpuristumattomaksi. (Seppänen 1988)

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2)$$

, jossa p_1 on tarkastelukohdan 1 paine,

ρ on ilman tiheys,

g on putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s²),

h_1 on tarkastelukohdan 1 korkeus,

v_1 on ilman virtauksen keskinopeus tarkastelukohdassa 1,

p_2 on tarkastelukohdan 2 paine,

h_2 on tarkastelukohdan 2 korkeus,

v_2 on ilman virtauksen keskinopeus tarkastelukohdassa 2.

Bernoullin yhtälön ensimmäinen termi tarkoittaa virtauksen staattista painetta, toinen termi korkeusaseman mukaista potentiaalienergiaa painovoimakentässä ja kolmas termi virtauksen dynaamista painetta. Kaasujen virtauksessa potentiaalienergioiden termit ovat häviävän pieniä muihin termeihin verrattuna ja ne voidaan jättää huomiotta. Tällöin yhtälö sievenee seuraavanlaiseen muotoon. (Seppänen 1988)

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3)$$

Virtausnopeus poistoilma-aukossa voidaan karkeasti laskea kaavasta (1), kun tiedetään osastoinnin tilavuus, poistoilma-aukon poikkipinta-ala ja haluttu ilmanvaihtokerroin. Osastoinnin sisäisen keskimääräisen ilmavirran nopeuden voidaan olettaa olevan $v_1 \approx 0$. Kun virtausnopeus tiedetään, voidaan paine-ero ($p_1 - p_2$) laskea kaavalla (4).

$$p_1 - p_2 = \frac{v_2^2 \rho}{2} \quad (4)$$

Bernoullin yhtälö ei ota huomioon putkivirtauksessa syntyvää painehäviötä, joka muodostuu kitkahäviöistä ja kertahäviöistä. Kitkahäviöt syntyvät virtaavan aineen ja kanava-

seinämän välisestä kitkasta ja kertahäviöitä syntyy muun muassa putkien mutkissa, venttiileissä, poikkipinnan muutoksissa sekä virtauksen haaraantumisissa ja yhtymiskohdissa. Putken kitkahäviöistä syntyvät painehäviöt voidaan laskea yhtälön (5) avulla. (Seppänen 1988)

$$\Delta p = \frac{\lambda \cdot l}{d} \cdot \frac{v^2 \rho}{2} \quad (5)$$

, jossa λ on kitkavastuskerroin

l on putken pituus

d on putken halkaisija

Kitkavastuskertoimen λ arvo määräytyy virtaustyypin ja putken sisäpinnan karheuden mukaan. Virtaus voi olla luonteeltaan laminaarista tai turbulentista. Virtaustyyppi voidaan määrittää Reynoldsin luvun avulla, joka putkivirtaukselle saadaan laskettua kaavasta (6). (Seppänen 1988)

$$R_e = \frac{dv}{\nu} \quad (6)$$

, jossa ν (nimittäjässä) on fluidin kinemaattinen viskositeetti (ilmalle 20 °C lämpötilassa $15,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (Seppänen 1988)).

Karheus k kuvaa pinnan epätasaisuuksien keskimääristä korkeutta ja se ilmoitetaan millimetreinä. Yleisimpien osastoinnin ilmanvaihtokanavamateriaalien kuten muoviputken karheus vaihtelee 0,0015-0,007 mm välillä ja kierresaumatun peltikanavan karheus on noin 0,15 mm (Seppänen 1988). Laminaarisessa virtauksessa putken karheus ei vaikuta syntyviin painehäviöihin ja kitkavastuskerroin on $64/R_e$. Turbulenttisen virtauksen kitkavastuskertoimen määrittäminen on hieman hankalampaa, koska sen arvoon vaikuttaa myös putken sisäpinnan karheus. (Bohl 1988)

Kitkavastuskertoimen laskemiseksi on johdettu erilaisia yhtälöitä erilaisiin tilanteisiin. Kerroin saadaan määritettyä myös Moodyn käyrästä avulla, kun tiedetään Reynoldsin luku ja suhde d/k . Käytännössä mitoitusnopeuttamiseksi määritetään kitkapainehäviö nomogrammeilla, jotka on laadittu standardisoiduille kanavamitoille. (Seppänen 1988)


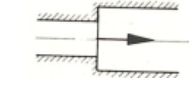
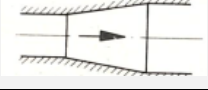
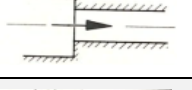
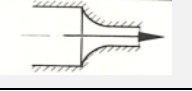

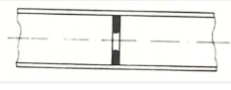
Kanaviston rakenneosissa muodostuu kertahäviöitä, joista aiheutuvat painehäviöt voidaan laskea kaavalla (7).

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{v^2 \rho}{2} \quad (7)$$

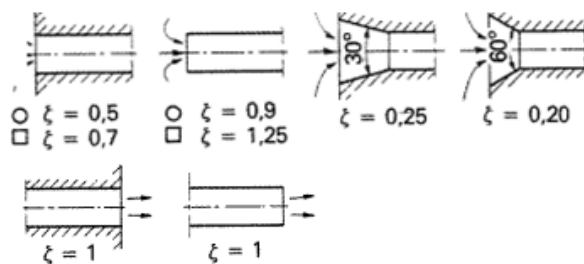
, jossa ζ on kertavastuskerroin. (Bohl 1988)

Kertavastuskerroin riippuu kyseessä olevan rakenneosan rakenteesta ja putken sisähalkaisijasta. Tavallisesti virtaus on kyseisissä rakenneosissa turbulentsia. Tavallisimpia putkiston rakenneosia ovat muun muassa putkikäyrät, erilaiset laajennus- ja supistuskappaleet ja kuristuslaitteet. Myös ilman sisään- ja ulosvirtauksesta syntyy painehäviötä. Taulukossa 2 on muutama kanaviston rakenneosa, joille on annettu kertavastuskertoimet. (Bohl 1988)

Taulukko 2. Kertavastuskertoimet putkiston rakenneosissa

Rakenneosa	Piirros	ζ -kerroin
Sisään- ja ulosvirtaus		kuva 2
Äkillinen laajennus		$\zeta_2 = \left(\frac{A_1}{A_2} - 1\right)^2$
Diffuusori		kuva 3
Äkillinen supistus		kuva 4
Suutin		kuva 5
Suunnanmuutos		kuvat 6, 7 ja 8
Kuristuslaitteet		kuva 9

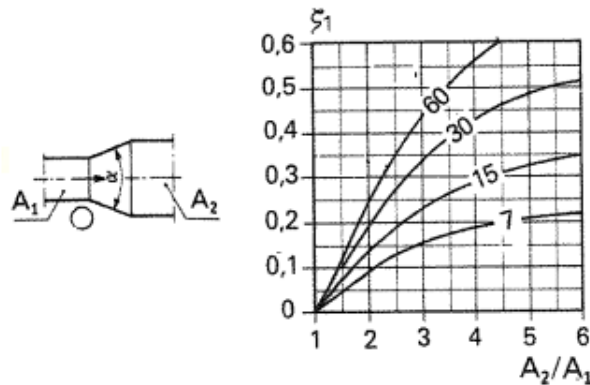
Sisäänvirtaus kuvaa tilannetta, jossa putki alkaa avoimena imujohtona tai ilma virtaa kammioista kanavaan. Ulosvirtauksessa ilma kulkee päinvastaiseen suuntaan, esimerkiksi kanavasta kammioon. Putken alku- ja loppupään kertavastuskertoimia on kuvassa 3. Ulosvirtauksen kertavastuskerroin on yksi, kun putken pää on suora. Jos putken pää laajenee, kertavastuskerroin on pienempi kuin yksi.



Kuva 3. Sisään- ja ulosvirtaus, kertavastuskertoimia (Sandberg 2014)

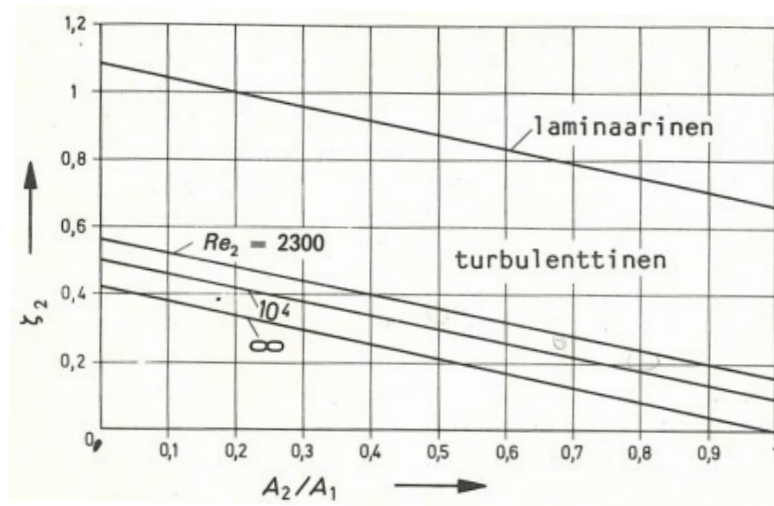
Kun liitetään erikokoisia putkia toisiinsa, käytetään laajennus tai supistuskappaleita. Taulukossa 2 äkillisen poikkipinnan laajentumisen kaavassa alaviite 1 tarkoittaa virtaussunnassa ensimmäistä eli kapeampaa putken osaa ja alaviite 2 jälkimmäistä eli laajempaa putken osaa. (Bohl 1988) Tästä kaavasta johtamalla saadaan kerroin myös ilman ulosvirtaukselle. Jos laajemman osan pinta-ala oletetaan äärettömäksi, niin äkillisen laajennuksen kertavastuskertoimeksi tulee yksi.

Vähittäisen poikkipinnan laajennuksen eli diffuusorin painehäviö riippuu suurimmaksi osaksi seinämän karheudesta ja geometrisista mitoista A_1, A_2 ja α (kuva 3). Diffuusorin vastuskerroin voidaan määrittää poikkipinta-alasuhteen ja aukenemiskulman funktiona kuvasta 4, joka pätee keskimääräiselle pinnan karheudelle. Diffuusorin aiheuttama painehäviö on huomattavasti pienempi kuin äkillisen poikkipinnan laajentumisen, jos se on mitoitettu oikein. (Bohl 1988)



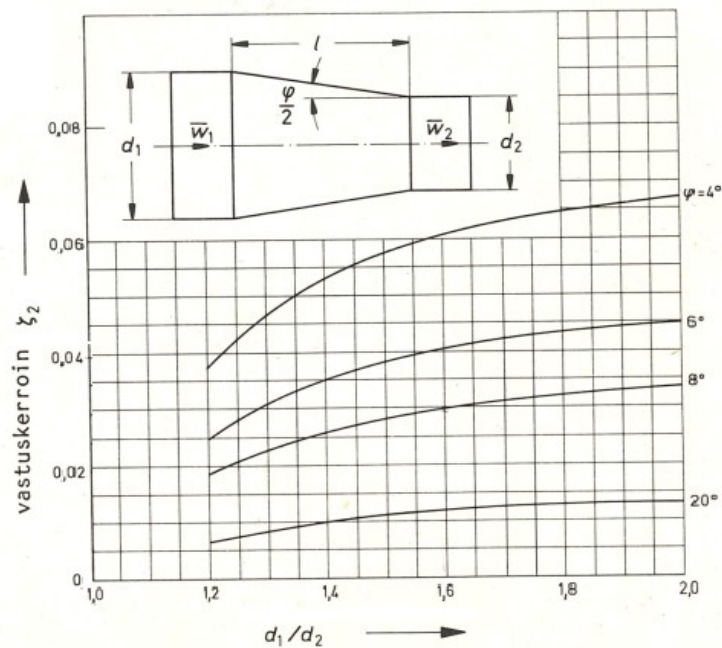
Kuva 4. Vastuskertoimia ympyräpoikkipintaiselle diffuusorille (Sandberg 2014, muokattu)

Äkillisen poikkipinnan supistumisen aiheuttama painehäviö voidaan periaatteessa laskea samalla tavalla kuin poikkipinnan laajenemisessakin. Haasteena on, ettei suihkun poikkipinnan todellista supistumista ahtaimmassa kohdassa yleensä tiedetä irtoamisalueiden takia. Vastuskerroin voidaan kuitenkin katsoa kuvasta 5, kun tiedetään supistussuhde $\frac{A_2}{A_1}$. Nyt alaviite 1 tarkoittaa rakenteen laajempaa osaa ja alaviite 2 kapeampaa osaa. (Bohl 1988)



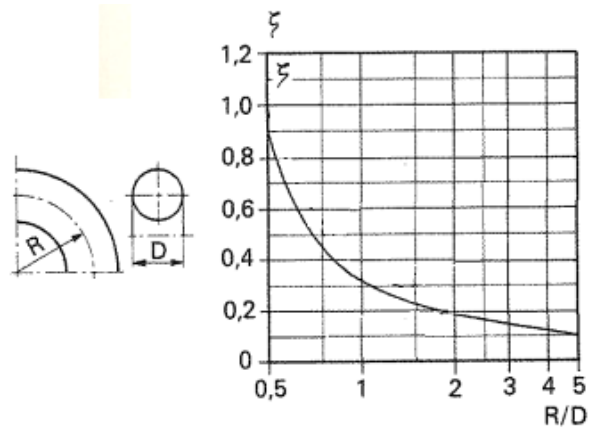
Kuva 5. Vastuskertoimia äkilliselle supistukselle (Bohl, 1988)

Vähittäisen poikkipinnan suppenemisen eli suuttimen kertavastuskerroin on pintakarheuden, Reynoldsin luvun, kulman φ ja halkaisijasuhteen $\frac{d_1}{d_2}$ funktio. Kerroin voidaan katsoa kuvasta 6. Suuttimen aiheuttama painehäviö on pienempi kuin äkillisessä suppenemisessä pienempien kitka- ja irtoamishäviöiden johdosta. (Bohl 1988)



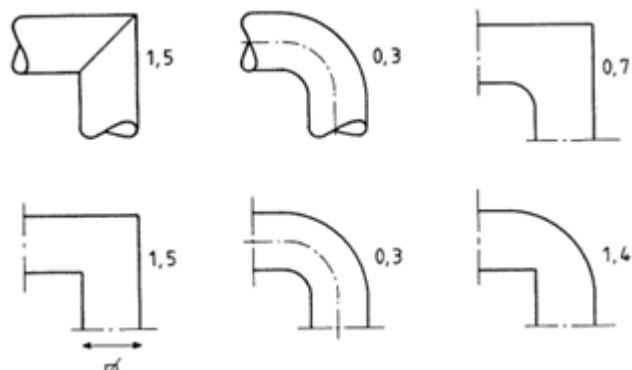
Kuva 6. Suuttimen vastuskertoimet (Bohl, 1988)

Putkikäyrissä syntyy kitkahäviöiden lisäksi irtoamishäviöitä ja sekundaarivirtauksen aiheuttamia häviöitä. Painehäviö käyrissä lasketaan normaaliin tapaan virtausnopeuden perusteella. (Bohl 1988) Kertavastuskerroin 90° :en kummalle voidaan katsoa kuvasta 7, kun tiedetään käyristysuhde R/D .



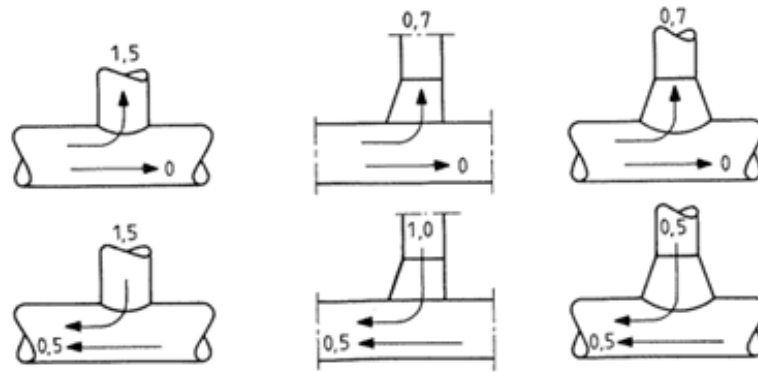
Kuva 7. Suunnanmuutoksen huomioiva kerroin (Sandberg 2014, muokattu)

Jos putki ei ole pyöreä tai käyristyssuhdetta ei tiedetä, voidaan kertavastuskerroin arvioida likimääräisesti, kuvan 8 avulla, jossa on annettu likimääräisiä kertavastuskertoimen arvoja erimallisille putkikäyrille.



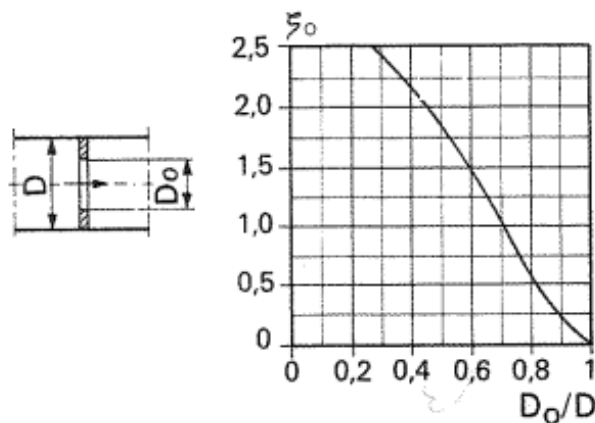
Kuva 8. Likimääräisiä kertavastuskertoimia putkikäyrille (Seppänen 1988, muokattu)

Putkien risteyskohdissa muodostuviin kertahäviöihin vaikuttaa ilmavirtojen suunnat sekä liitoksen muoto. Erilaisten T- kappaleiden likimääräisiä kertavastuskertoimia ζ_T on kuvassa 9. (Seppänen 1988)



Kuva 9. T- kappaleiden likimääräisiä kertavastuskertoimia (Seppänen 1988, muokattu)

Kuristuslaitteiden eli kuristuslaipan, suuttimen tai venturisuuttimen aiheuttama pysyvä painehäviö lasketaan virtausnopeudella v , joka on ilmapirran nopeus ennen kuristuslaitetta. Kertavastuskertoimen kuristuslaipalle voi katsoa kuvasta 10. (Sandberg 2014)



Kuva 10. Kuristuslaipan kertavastuskertoimia (Sandberg 2014)

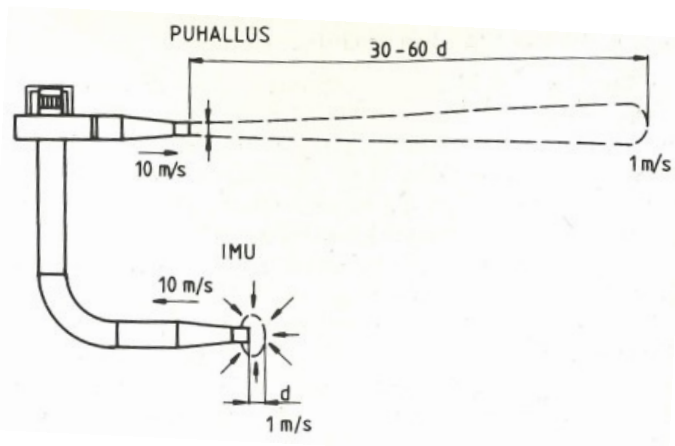
Putkiston kokonaispainehäviö saadaan laskemalla yhteen suorien putkiosuuksien häviöt ja kertavastuksien aiheuttamat häviöt kaavan (8) tavoin. (Bohl, 1988)

$$\Delta p_{kok} = \left(\frac{\lambda l}{d} + \Sigma \zeta \right) \cdot \left(\frac{v^2 \rho}{2} \right) \quad (8)$$

Poikkeuksena on kuitenkin tapaus, jossa useita putken osia rakennetaan välittömästi peräkkäin. Tällöin yksittäisten osien kertavastuksia ei voi laskea yhteen, koska rakenneosien sisään- ja ulosvirtausolosuhteet ovat erilaiset kuin kokeissa, joissa kertavastuksien arvot on määritetty. (Bohl, 1988)

Huonetilan virtauskenttään vaikuttavat ensisijaisesti tulo- ja poistoilmaelimet. Tuloilmalla on näistä kahdesta vielä huomattavasti suurempi vaikutusalue. Kuvasta 11 näkee, kuinka ilmapirran nopeus pienenee tulo- ja poistoilma-aukkojen läheisyydessä. Tuloil-

maelimen läheisyydessä virtausnopeus laskee kymmenesosaan noin 30-60 halkaisija mitan etäisyydellä, kun taas imun lähellä samaan virtausnopeuden laskuun riittää vain yhden halkaisijan etäisyys. (Seppänen 1988)



Kuva 11. Ilmavirran nopeudet imun ja puhalluksen läheisyydessä (Seppänen 1988)

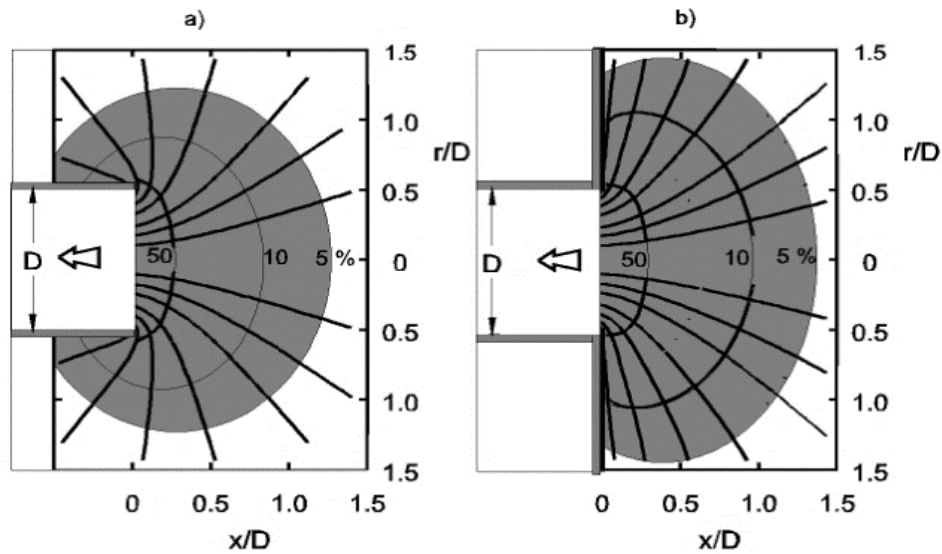
Tuloilmalla voidaan siis haluttaessa hallita huonetilan ilmavirtauksia, poistoilmalla se on huomattavasti vaikeampaa. Poistoilman tärkeä tehtävä on kuitenkin poistaa huonetilan epäpuhtaudet, joten päätelaite kannattaa sijoittaa paikkaan, jonne epäpuhtaudet luonnostaan kulkeutuvat, kuten esimerkiksi konvektiovirtausten mukana huonetilan yläosiin.

3.3 Kohdepoistojen mitoittaminen

Kohdepoiston tehokkuuteen vaikuttavat monet tekijät kuten muun muassa imuaukon muoto ja poistoilmavirta, kohdepoiston lähellä olevat häiriövirtaukset sekä epäpuhtauslähteen ominaisuudet. Monista muuttuvista tekijöistä johtuen kohdepoistojen mitoitus tarkasti on haastavaa, joten mitoittamiseen on usein käytetty sieppausnopeuteen perustuvaa yksinkertaistettua menetelmää. Sieppausnopeudella tarkoitetaan sellaista imun aikaansaamaa virtausnopeutta, joka pystyy päästölähteen läheisyydessä sieppaamaan epäpuhtaan ilman kohti imuaukkoa. Sieppausnopeudelle ei pystytä antamaan tarkkaa arvoa, sillä se vaihtelee tapauskohtaisesti. Suuntaa antavia arvoja on kuitenkin annettu epäpuhtauden vapautumisnopeuksien mukaan. Alhaisella epäpuhtauden vapautumisnopeudella riittäisi sieppausnopeudeksi 0,3-0,5 m/s, melko alhaisella 0,5-1,0 m/s, melko suurella 1,0-2,5 m/s ja suurella 2,5-10 m/s. (Säämänen et al. 2004)

Kun sieppausnopeus on valittu, lasketaan kohdepoiston tarvitsema poistoilmavirta. Se saadaan laskettua, kun tiedetään epäpuhtauslähteen etäisyys imuaukosta ja ilman virtauskenttä imuaukon läheisyydessä. Imun vaikutusetäisyys on lyhyt, jo noin aukon halkaisijan etäisyydellä imuaukosta ilmavirran nopeus on vain noin kymmenesosa poistokanavan ilmavirran nopeudesta. Kuvassa 12 näkyy pyöreän laipattoman (a) ja laipallisen (b) imuaukon virtaviivat ja virtausnopeudet prosentteina imuaukon keskimääräisestä ilmavirran nopeudesta. Imun lyhyen vaikutusalueen vuoksi tulisi kohdepoiston imuaukko sijoittaa

mahdollisimman lähelle epäpuhtauslähdettä. Käytännössä pelkän imun vaikutusetäisyys on suurimmillaan noin 0,5 m. (Säämänen et al. 2004)



Kuva 12. Imuaukon virtaviivat ja ilman virtausnopeudet (Säämänen et al. 2004)

Kun epäpuhtaus on saatu siepattua kohdepoiston imuaukkoon, on se kuljetettava kanavistoa pitkin suodattimien kautta ulos. Kun suunnitellaan hiukkasmaisten epäpuhtauksien kuljettamista kanavistossa, valitaan kuljetusnopeus pölytyypin mukaan, ettei pöly laskeudu ja kerry kanavistoon. Keveähkölle pölylle suositellaan kuljetusnopeudeksi 15 m/s, tavalliselle teollisuuspölylle 20 m/s ja raskaalle pölylle 25 m/s. Suurempia kuljetusnopeuksia ei suositella käytettävän kanaviston kulumisen ja tarpeettoman painehäviön kasvun vuoksi. Kohdepoistojen kanavistoina kannattaa käyttää pyöreitä kanavia. Pyöreissä kanavissa on tasaisempi nopeusjakauma kuin suorakaidekanavissa, joten pölyn kerääntyminen pyöreään kanavaan on vähäisempää. (Säämänen et al. 2004)

Pölynerotusjärjestelmä ja puhallin ovat viimeiset osat kohdepoistojärjestelmässä. Asbestityössä käytettävässä pölynerotusjärjestelmässä on kolme osaa; esierotin, hienosuodatin ja HEPA-suodatin (Ratu 09-3038 2006). Puhallin valitaan niin, että se pystyy tuottamaan tarvittavan ilmavirran ja paine-eron, jolla se pystyy voittamaan kaikki järjestelmän osissa tapahtuvat painehäviöt. Toimintapiste on kanaviston vastuskäyrän ja puhaltimen ominaiskäyrän leikkauspisteessä. Vastuskäyrä saattaa muuttua esimerkiksi suodattimen likaantumisessa tai kanavistoon tehdyissä muutoksissa, joten yleensä valitaan hieman suunniteltua suuremman ilmavirran tuottava puhallin. Kanavisto olisi hyvä suunnitella niin, että se on mahdollisimman lyhyt puhaltimen jälkeen. (Säämänen et al. 2004)

3.4 Häiriö- ja hätätilanteet

Osastoinnin häiriö- tai hätätilanteita voivat olla muun muassa alipaineistus- tai kohdepoistolaitteiston toimintahäiriö, suojarakenteiden epätiivisyys, tapaturma tai onnettomuus-

tilanteet, kuten esimerkiksi tulipalo. Alipaineistuksen häiriö voi johtua sähkökatkosta, laiteviasta tai vaikka ympäröivien tilojen ilmanvaihdon muutoksista. Esimerkiksi tilojen tehostetusta tuuletuksesta tai ilmanvaihdon alasajosta ilta- ja yöaikaan tai viikonloppuisin. Myös tuulenpaine, erityisesti puuskittainen tuuli voi aiheuttaa painevaihteluita ja häiritä osastoinnin alipaineistusta. Sähkökatkoon voi varautua varaamalla työmaalle oman varasähköjärjestelmän. Laitevian varalta on suositeltavaa käyttää alipaineistukseen kahta alipaineistajaa, mistä oli maininta edellisessä luvussa. Ympäröivien tilojen ilmanvaihto tulisi olla hallinnassa eikä siinä saisi tapahtua muutoksia, jotka voisivat sotkea osastoinnin ilmanvaihdon. Ympäröivien tilojen käyttäjiä tulisi tiedottaa asiasta ja ilmanvaihdon säätö tulisi olla estetty ulkopuolisilta asbestipurkutyön ajan. HSE:n tutkimuksessa huomattiin myös, että ympäröivien tilojen ilman lämpötilan vaihtelu päivän aikana vaikutti osastoinnin alipaineistukseen noin yhden Pascalin verran (Pocock *et al.* 2013).

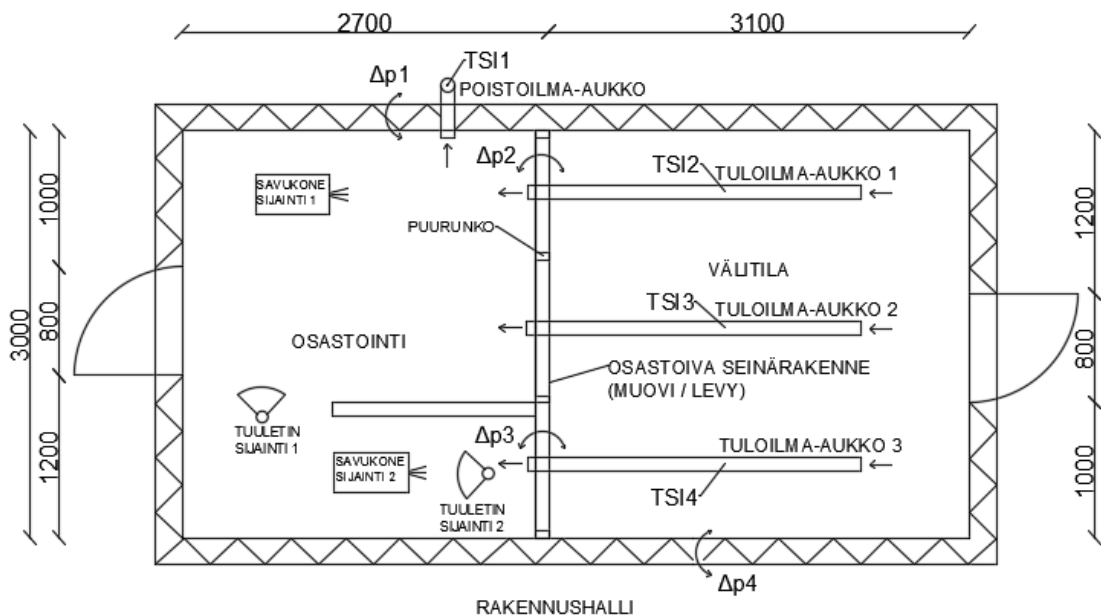
Suojarakenteiden epätiivelys voi johtua muun muassa huonosti toteutetuista liitoksista ja läpivienneistä, suojarakenteen rikkoutumisesta tai ovien epätiivistä sulkeutumisesta. Osastoinnin seinään vahingossa tuleva pieni repeämä tai aukko ei välttämättä aiheuta huomattavaa painehäviötä osastointiin, mutta kun reikä tai viilto on tarpeeksi suuri, yli 100 cm² kokoinen aukko tai 2 m pituinen viilto, aiheuttaa se jo näkyvän paine-eron laskun (Pocock *et al.* 2013).

Työkohteesta riippuen saattaa osastoinnin rakenteelliseen toteuttamiseen olla erityisvaatimuksia. Jos esimerkiksi kohteessa on erityiset paloturvallisuusmääräykset, voi suojaseinänä käyttää palosuojattua suojamuovia, joka luokitellaan vaikeasti syttyviin materiaaleihin tai muuta palonkestävää materiaalia. Jos osastointi on alttiina sääoloille, tulee osastointi tehdä vesitiiviiksi. Työkohteen valmistelujen yhteydessä tulee varmistaa myös veden- ja virransyötön varajärjestelmä hätätilanteen varalta. (SLIC 2006)

4. OSASTOINNIN SUOJAUSTEHOKKUUDEN TESTAUSMENETELMÄT

4.1 Mittauslaitteisto

Laboratoriossa toteutettu tutkimus ja mittaukset tehtiin Tampereen yliopiston Hervannan kampuksen rakennushallissa. Osastoivilla seinärakenteilla suoritettavat tiiveystestit tehtiin testiosastossa, joka rakennettiin rakennushallissa olevaan 80-luvulla valmistuneeseen sääräsitelaitteeseen (kuva 13). Laitteen sisään rakennettiin puurunko, johon kiinnitettiin yksitellen testattavat seinärakenteet. Puurunko tiivistettiin sääräsitelaitteiston seiniä, lattiaa ja kattoa vasten muovilla ja alumiiniteipillä sekä polyuretaanivaahdolla. Laitteiston vaipan läpi menneet pienet reiät, jotka oli tehty aikaisemmin seinien ja katon läpi vedetyille johdoille, tukittiin ja tiivistettiin muun muassa silikonilla ja tiivistysteipillä. Osastoinnin syvyys oli 2,7 m, leveys 3,0 m, korkeus 2,0 m ja tilavuus näin ollen oli 16,2 m³. Osastoivan seinän leveys oli 3,0 m ja korkeus 2,0 m. Sääräsitelaitteen toiseen päähän jäi tila, jota tässä työssä kutsutaan välitilaksi. Välitilan syvyys oli 3,1 m, leveys 3,0 m ja korkeus 2,0 m. Osastointiin järjestettiin hallittu tuloilma osastoivan seinärakenteen läpi kolmesta vaihtoehtoisesta kohdasta (tuloaukko 1 – tuloaukko 3). (Linnainmaa *et al.* 2019)

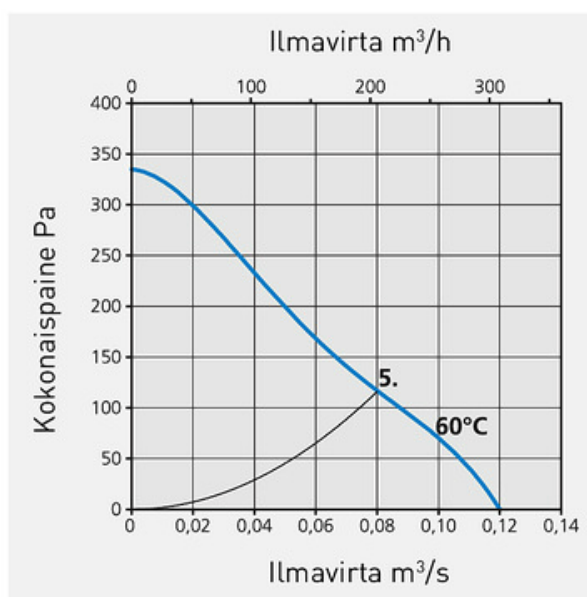


Kuva 13. Käytetyn koejärjestelyn pohjakuva mittauspisteineen (Linnainmaa *et al.* 2019)

Tuloilma johdettiin osastointiin 3,0 m pitkistä peltisistä pyöreistä kierresaumakanavista, joihin asennettiin ilmannopeusmittarit. Tuloilma-aukkoja oli yhtä aikaa auki yksi tai kaksi kappaletta. Poistoilma johdettiin ulos osastoinnista yhteensä noin 6,7 m pitkää peltistä

kierresaumakanavaa pitkin. Poistoilmaputki nousi sääräsitelaitteen katolle ja siihen muodostui kaksi 90 °: en kulmaa. Poistoilmaputkeen kiinnitetty ilmannoepusmittari oli kanavan pystysuoralla osalla noin metrin etäisyydellä ensimmäisestä poistoilmakanavan mutkasta (kuva 14). Kaikki osastoinnin ilma-aukot sijaitsivat korkeussuunnassa seinien alaosissa, noin 20 cm korkeudella. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Osastointiin luotiin alipaine kanavapuhaltimella (Online CK-125C 8098006, 62W), jossa oli suora ilman läpivirtaus. Tuotevalikoimaluettelosta 2016-2017 löytyy kuvaaja kanavapuhaltimen ominaiskäyrästä (kuva 14), jossa näkyy kanavapuhaltimen ilmavirran ja kokonaispaineen suhde 60 °C lämpötilassa.



Kuva 14. Kanavapuhaltimen ominaiskäyrä (Online Tuotevalikoimaluettelo 2016-2017)

Puhaltimeen liitettiin säädin, jolla voitiin säätää puhaltimen tehoa ja siten ilman tilavuusvirtaa poistoilmakanavassa. Poistoilmaputken vaakasuoraan osaan sääräsitelaitteen katolle asennettiin lisäksi virtaussäädin, jolla pystyttiin myös säätämään ilman tilavuusvirtaa poistoilmaputkessa sekä noin 70 cm pitkä piippu, jolla voitiin tarvittaessa ohjata lisäilmaa kanavaan ja pienentää siten osastoinnista imettyä ilmamäärää (kuva 15). Virtaus säätimellä ja piipulla saatiin säädettyä poistoilman tilavuusvirtaa vielä pienemmäksi kuin pelkällä puhaltimen tehon säädöllä, jotta osastointiin saatiin tarpeeksi pieni paine-ero. (Linnainmaa *et al.* 2019)



Kuva 15. Mittauslaitteiston poistoilmaputki, virtaussäätimet, piippu, poistoilmapuhallin ja sen tehon säädin. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Ilmavirranmittauksissa käytettiin neljää puolisuuntariippuvaista ilmannoepusanturia (TSI Air Velocity Transducer 8465). Yksi ilmannoepusanturi sijoitettiin poistoilmaputkeen (TSI1) ja kolme muuta ilmannoepusanturia sijoitettiin tuloilmaputkiin (TSI2, TSI3 ja TSI4). (Linnainmaa *et al.* 2019)

Osastoinnin ja ympäristön välistä paine-eroa mitattiin neljällä paine-eroanturilla (Huba Control, tyyppi 694). Ensimmäinen paine-eroanturi (Δp_1) mittasi paine-eroa osastoinnin ja rakennushallin välillä, toinen ja kolmas paine-eroanturi (Δp_2 ja Δp_3) mittasi paine-eroa osastoinnin ja välitilan välillä ja neljäs paine-eroanturi (Δp_4) mittasi paine-eroa välitilan ja rakennushallin välillä. Rakennushalli edusti testeissä purkutilaa ympäröiviä sisätiloja, joiden olosuhteita ei hallittu purkutyöhön liittyen. Kaikki anturit kytkettiin tietokoneeseen, josta voitiin seurata ilmavirran nopeuksia ja paine-eroja sekä tallentaa testeissä syntyneitä dataa. Kuvassa 16 on paine-eroanturin teknisiä tietoja. (Linnainmaa *et al.* 2019)



Kuva 16. Paine-eroanturi

Käytössä oli lisäksi savukone (Eurolite Dynamic Fog 1500) ja paineilmalaitte. Savukoneesta generoitavalla savulla voitiin visuaalisesti tarkkailla osastoinnin tiiveyttä. Kun osastoinnin puolelle laskettiin savua, pystyttiin välitilan puolelta havaitsemaan osastovivassa seinärakenteessa mahdollisesti olevat vuotokohdat, joista savua pääsi välitilaan. Tilojen välisiä paine-eroja voitiin häiritä aiheuttamalla paineilmalla vähäistä ylipainetta välitilaan tai osaston sisälle. (Linnainmaa *et al.* 2019)

4.2 Laboratoriokokeet

Kokeissa testattiin yhteensä kolmea erilaista seinäjärjestelmää, joita olivat:

1. Muovi
2. Muovi + ovi
3. Levyrakenne

Tuloilma tuli kaikissa osastoivan seinärakenteen tiiveystesteissä aukosta 2 (ks. kuva 13). Muoviseinä tehtiin 0,2 mm:n paksuisesta polyeteenikalvosta. Muovista leikattiin kolme noin metrin levyistä ja reilun kahden metrin korkuista kappaletta, jotka kiinnitettiin puurunkoon niittaamalla. Muovikalvo tiivistettiin alumiiniteipillä puurunkoa vasten. Ovelista versiota muoviseinärakenteesta testattiin vetoketjullisella valmismuoviovellalla. Ovi asennettiin puurungon reunimmaiseen aukkoon kiinnittämällä ovi alumiiniteipillä jo olemassa olevaan muoviseinään, johon viillettiin oven kohdalle aukko. Levyrakenteinen seinä rakennettiin 15,5 mm:n paksuisista erikoiskipsilevyistä. Levyt kiinnitettiin puurunkoon ruuvaamalla ja liitokset tiivistettiin polyuretaanivaahdolla ja alumiiniteipillä. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Jokaisen seinäjärjestelmän kohdalla tehtiin ensin vuototarkastelu merkkisavulla. Kokeet eri paine-erojen arvoilla sekä eri ilmanvaihtokertoimilla suoritettiin vuototarkastelun jälkeen. Koetilanteissa mitatut paine-erojen arvot ja ilmavirran nopeudet tallennettiin tietokoneelle. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Koetilanteita olivat:

- 1) Vuototarkastelu merkkisavulla
- 2) Vakio paine-ero, hallittu tuloilma kiinni
 - a) -5 Pa
 - b) -10 Pa
 - c) -15 Pa
 - d) -40 Pa
- 3) Vakio paine-ero, hallittu tuloilma auki
 - a) -5 Pa
 - b) -10 Pa
 - c) -15 Pa
 - d) -40 Pa/ maksimi
- 4) Vakio ilmanvaihtokerroin, hallittu tuloilma auki
 - a) 5 l/h
 - b) 10 l/h
 - c) maksimi
- 5) Ilmanjakotavat
 - a) Tarkastelu merkkisavulla
 - b) Virtauslaskenta

Vuototarkastelussa kanavapuhallin oli pois päältä ja hallittu tuloilma-aukko kiinni. Väli-tilan ovi pidettiin avoimena ja osastoinnin puoleinen ovi kiinni. Merkkisavua laskettiin kerralla kolmen sekunnin ajan osastoinnin sisälle. Osastoivan seinärakenteen läpi silmämääräisesti havaitut vuodot kirjattiin ylös. Viiden minuutin kuluttua merkkisavun laske- misesta osastointiin johdettiin osaston puolelle paineilmaa, joka aiheutti osastointiin pie- nen ylipaineen. Paineilmaa pidettiin päällä noin 30 sekuntia. Vuodot osastoivan rakenteen yli tarkistettiin uudelleen ja kirjattiin ylös. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Toisessa koetilanteessa hallittu tuloilma oli suljettu. Haluttu alipaine saatiin osastointiin säätämällä poistoilman tilavuusvirtaa. Jokaisella paine-eron arvolla suoritettiin vähintään kahden tunnin pituinen seurantamittaus. Kolmannessa koetilanteessa hallittu tuloilma oli auki ja haluttu alipaine säädettiin poistoilmavirran avulla kuten edellisessäkin koetilan- teessa. Toinen koetilanne kuvasi hyvin tiivistä osastointia ja kolmannessa koetilanteessa korvausilma tuotiin osastointiin hallitusti. Toisten ja kolmannen koetilanteen ilmanvaihtokertoimia vertailtiin keskenään. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Ilmanvaihtokertoimien mittauksissa hallittu tuloilma oli auki. Poistoilman tilavuusvirtaa säädettiin niin, että osastointiin saatiin haluttu ilmanvaihtokerroin. Jokaiselle koetilan- teelle, jossa ilmanvaihtokerroin oli vakio, suoritettiin vähintään tunnin pituinen mittaus. Mittausdatasta nähtiin eri ilmanvaihtokertoimien aiheuttamat paine-erot. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Poistoilmakanavan keskimääräinen ilmavirran nopeus laskettiin kaavan 1 avulla ratkaisemalla ilmavirran keskinopeus poistoilmakanavassa. Osastoinnin tilavuus oli 16,2 m³ ja poistoilmakanavan halkaisija oli 100 mm, joten kanavan poikkipinta-ala oli 7854 mm². Taulukossa 3 on esitetty poistoilmakanavan keskimääräiset ilmavirran nopeudet osastoinnin ilmanvaihtokertoimien mukaan. Suurin keskimääräinen ilmavirran nopeus, joka käytävissä oleva puhallin pystyi tuottamaan, oli 6,6 m/s. Tällä ilmavirran nopeudella osastoinnin ilma vaihtui 11,5 kertaa. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Taulukko 3. Poistoilmavirran nopeudet ilmanvaihtokertoimien mukaan

Ilmanvaihtokerroin [1/h]	Tilavuusvirta [l/h]	Keskimääräinen ilmavirran nopeus [m/s]
5	81 000	2,9
10	162 000	5,7
11,5	186 300	6,6

Merkkisavulla tutkittiin vuototarkastelun lisäksi myös ilman huuhtoutumista osastoinnista eri ilmanjakotavoilla. Tuloilma-aukkoja oli auki yhtä aikaa joko yksi tai kaksi. Poistoilma-aukon paikka oli kaikissa koetilanteissa samassa kohdassa. Savua generoitiin osastointiin kahdesta eri paikasta, jotka ovat merkitty pohjakuvaan (sijainti 1 ja sijainti 2, kuva 12). Savua generoitiin osastointiin kerrallaan kolmen sekunnin ajan. Aikaa mitattiin siitä hetkestä lähtien, kun savua generoitiin osastointiin siihen hetkeen saakka, kun puhaltimen ulospuhallusilmassa ei näkynyt enää savua. Osastoinnin sisälle tuloilma-aukkojen 2 ja 3 väliin rakennettiin kevyt väliseinä, joka oli osassa koetilanteita paikallaan taulukon 4 mukaisesti. Väliseinän paikka näkyy pohjakuvassa (kuva 12). Muutamassa koetilanteessa, joissa väliseinä oli paikallaan, testattiin myös tuulettimen vaikutusta savun huuhtoutumiseen. Tuuletin sijoitettiin joko väliseinän ja oviaukon väliin suunnattuna kohti seinää, jossa poistoilma-aukko sijaitsi (sijainti 1) tai lähelle aukkoa 3 väliseinän taakse suunnattuna pois päin aukosta 3 (sijainti 2). Koetilanteet on taulukoitu taulukkoon 4, jossa näkyvät tuloilma-aukkojen paikat, väliseinän olemassaolo, savukoneen sijainti ja tuulettimen käyttö ja sijainti. Ilmanvaihtokerroin kyseisissä koetilanteissa oli noin 10 1/h. (Linnainmaa 2019)

Taulukko 4. Merkkisavukokeiden koetilanteet (Linnainmaa et al. 2019)

Koetilanne	Tuloilma- aukko	Väliseinä	Savukone	Tuuletin
1	1	Ei	sijainti 1	Ei
2	1	Ei	sijainti 2	Ei
3	2	Ei	sijainti 1	Ei
4	2	Ei	sijainti 2	Ei
5	3	Ei	sijainti 1	Ei
6	3	Ei	sijainti 2	Ei
7	1	Kyllä	sijainti 1	Ei
8	1	Kyllä	sijainti 2	Ei
9	2	Kyllä	sijainti 1	Ei
10	2	Kyllä	sijainti 2	Ei
11	3	Kyllä	sijainti 1	Ei
12	3	Kyllä	sijainti 2	Ei
13	2	Kyllä	sijainti 1	sijainti 1
14	2	Kyllä	sijainti 2	sijainti 1
15	2	Kyllä	sijainti 1	sijainti 2
16	2	Kyllä	sijainti 2	sijainti 2
17	2&3	Ei	sijainti 1	Ei
18	2&3	Ei	sijainti 2	Ei
19	2&3	Kyllä	sijainti 1	Ei
20	2&3	Kyllä	sijainti 2	Ei

Oletuksia ilman huuhtoutumiselle osastoinnista eri ilmanjakotavoilla oli:

- Mitä lähempänä tuloilma-aukko olisi poistoilma-aukkoa, sitä nopeammin savu huuhtoutuisi osastoinnista.
- Väliseinän lisääminen osastointiin hidastaisi savun kulkua osastoinnin läpi.
- Kahdella tuloilma-aukolla savu huuhtoutuisi osastoinnista nopeammin kuin yhdellä tuloilma-aukolla.
- Tuulettimen lisäys osastoinnin sisälle nopeuttaisi savun poistumista osastoinnista.
- Savun huuhtoutuminen kestäisi kauemmin generoitaessa savua sijainnista 2 kuin sijainnista 1.

4.3 Virtauslaskenta

Osastoinnin sisällä liikkuvien ilmavirtojen nopeudet jäivät alle laboratoriossa käytössä olevien mittareiden havaintorajojen, joten ilmanjakotapojen vaikutusta ilman virtauskenttiin osastoinnin sisällä ei pystytty tutkimaan laboratoriossa. Erilaisten osastointien ilmavirtausten tarkasteluun käytettiin Ansys fluent- virtauslaskentaohjelmistoa, jolla pyrittiin selvittämään eri ilmanjakotapojen vaikutusta osastoinnin sisällä liikkuviin ilmavirtauksiin. Simuloinnilla tutkittiin neljän eri mallisen osastoinnin ilmanjakotapoja suorittamalla

erilaisia koetilanteita, joissa muuttuvina komponentteina olivat tulo- ja poistoilma-aukkojen määrät ja paikat sekä osastointien paine-erojen arvot. Läheskään kaikkia eri yhdistelmiä ilma-aukkojen paikoista ei simuloitu, vaan yhdistelyistä valittiin tapaukset, jotka ajateltiin olevan toteutettavissa käytännössä. Simuloinnilla pyrittiin löytämään tapaus, jossa osastoinnin ilma huuhtoutuisi mahdollisimman hyvin.

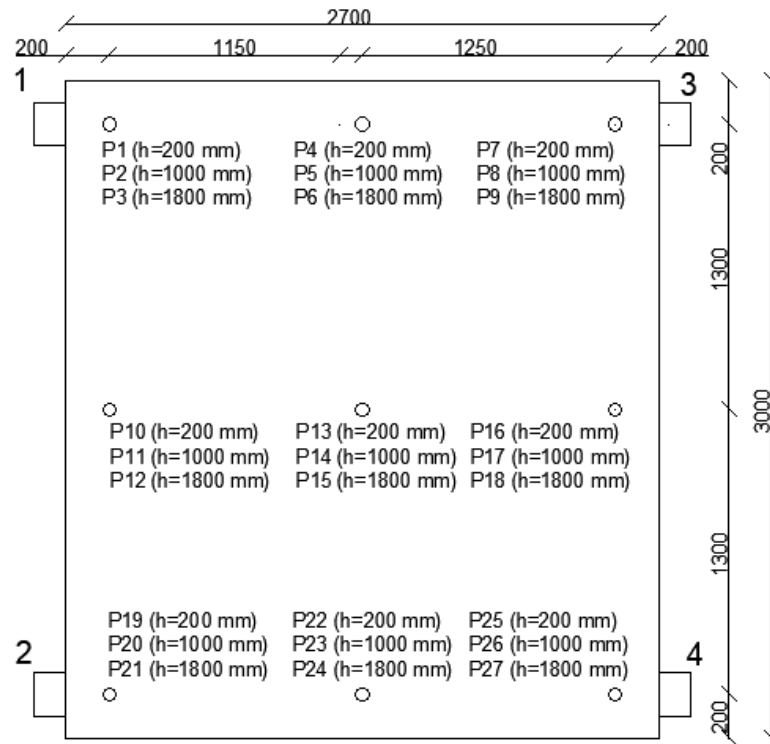
Ilmanvaihtokertoimenä simuloinnissa käytettiin jokaisessa osastoinnissa 10 l/h, joka on suositusarvo ilmanvaihtuvuudelle asbestiosastoinnissa. Tulo- ja poistoilma-aukkojen halkaisijat laskettiin halutun ilmanvaihtokertoimen ja paine-eron perusteella jokaiselle osastoinnille erikseen. Ilma-aukkojen paikat leveys- ja syvyysuunnassa on merkitty ja numeroitu pohjakuviin. Korkeussuunnassa ilma-aukkoja on useimmassa tapauksessa kaksi samassa paikassa, seinän ala- ja yläosassa, 150 mm - 200 mm etäisyydellä lattia- ja katopinnoista.

Osastointeihin luotiin sisälle mittauspisteitä, jotka mittasivat ilmavirran nopeutta suunta-riippumattomasti. Pohjakuviin on merkitty mittauspisteiden paikat leveys- ja syvyysuunnassa. Korkeussuunnassa jokaisessa merkityssä paikassa on kolme mittauspistettä, joiden korkeusasemat on merkitty pohjakuviin pisteen tunnusteen perään sulkeisiin. Ilma-aukkojen kohdilla pisteet olivat aina ilma-aukkojen keskiakselilla syvyysuunnassa 200 mm etäisyydellä aukosta. Mittauspisteiden virtausnopeuksien avulla vertailtiin keskenään eri ilmanjakotapoja.

Laskenta suoritettiin tasapainotilanteessa, jossa huonetilan ja ilmavirtojen lämpötilat olivat vakioita ja poistoilmavirta pysyi tilanteissa aina saman suuruisena. Ilmanpaine oli 101 300 Pascalia, lämpötila 20 °C ja ilman tiheys 1,2 kg/m³. Laskentaverkko koostui rakenteellisista kuusisivuisista heksaedrielementeistä ja virtauslaskennassa käytettiin $k-\varepsilon$ turbulenssimallia. Verkotusta tihennettiin pintojen läheisyydessä niin sanotulla inflaatio- eli rajakerroksella. Poistoilma-aukkojen reunaehtona oli poiston massavirta [kg/s] (mass-flow-outlet) ja tuloilma-aukot määritettiin tuloaukoiksi (inlet-vent).

4.3.1 Osastointi 1

Ensimmäinen simuloitava osastointi oli saman mallinen ja kokoinen kuin laboratoriossa ollut testiosastointi (tilavuus 16,2 m³). Tulo- ja poistoilma-aukoille tehtiin yhteensä 8 mahdollista paikkaa, neljä molemmalla pidemmällä seinällä, kaksi seinien alaosissa ja kaksi seinien yläosissa. Kaikissa tilanteissa oli auki yksi tulo- ja yksi poistoilma-aukko. Kuvassa 17 on pohjakuva ensimmäisestä simuloitavasta osastoinnista. Kuvassa näkyy mahdolliset paikat tulo- ja poistoilma-aukoille (1-4) sekä 27 kappaletta mittauspisteitä (P1-P27).



Kuva 17. Ensimmäisen osastoinnin pohjakuvat, joissa näkyvät mittauspisteiden sekä tulo- ja poistoilma-aukkojen paikat.

Koetilanteet tulo- ja poistoilma-aukkojen sekä paine-erojen osalta ensimmäiselle simuloitulle osastoinnille näkyvät taulukossa 5. Ensimmäisessä osastoinnissa tulo- ja poistoilma-aukkojen paikkojen ja paine-erojen yhdistelmiä oli yhteensä 8 kappaletta. Ilmanvaihtokerroin oli kaikissa koetilanteissa 10 1/h. Tilanteissa 1-4 paine-ero oli -10 Pa ja tilanteissa 5-8 paine-ero oli -20 Pa:n ja -30 Pa:n välillä. Ilma poistui jokaisessa tilanteessa kohdasta 4 seinän alaosa.

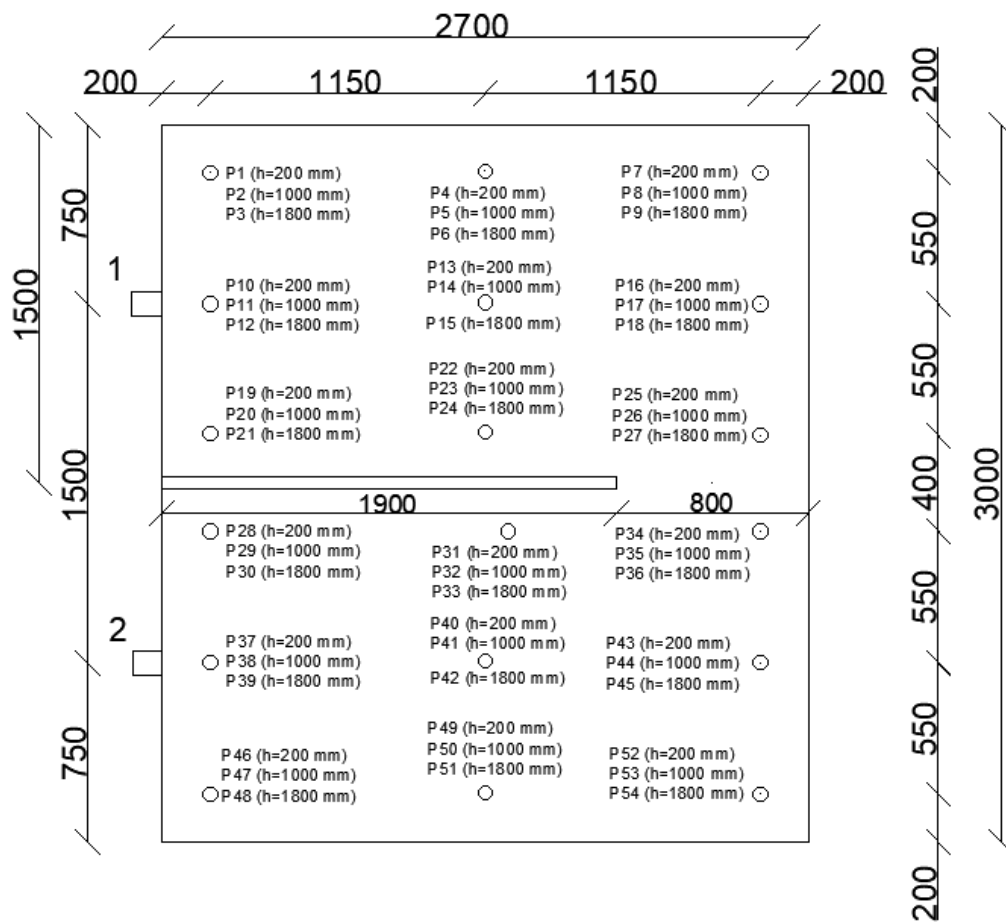
Taulukko 5. Ensimmäisen simuloitavan osastoinnin ilma-aukkojen paikkojen yhdistelmät.

Koetilanne	Tulo	ht [mm]	Poisto	hp [mm]	Paine-ero [Pa]	Ilmanvaihto- kerroin [1/h]	Ø [mm]
1	1	1800	4	200	-10	10	120
2*	2	200	4	200	-10	10	120
3	3	1800	4	200	-10	10	120
4	4	1800	4	200	-10	10	120
5	1	1800	4	200	-20-(-30)	10	100
6*	2	200	4	200	-20-(-30)	10	100
7	3	1800	4	200	-20-(-30)	10	100
8	4	1800	4	200	-20-(-30)	10	100

Tähdellä (*) merkityissä tilanteissa tulo- ja poistoilma-aukot ovat samassa kohti vastakkaisilla seinillä, jolloin tilanteissa todennäköisesti syntyy oikosulkuvirtaus. Tilanteet oletetaan siten olevan huonoja vaihtoehtoja.

4.3.2 Osastointi 2

Toinen osastointi oli muuten samanmuotoinen ensimmäisen simuloitavan osastoinnin kanssa, mutta keskelle osastointia lisättiin 1900 mm leveä ja 100 mm paksu väliseinä. Toiseen reunaan jäi 800 mm leveä ja 2000 mm korkea oviaukko. Tilan ajateltiin kuvaavan omakotitalon pesutilojen yleistä pohjaratkaisua, jossa pesuhuone ja sauna ovat sijoitettu peräkkäin. Tulo- ja poistoilma-aukkojen mahdollisia paikkoja oli yhteensä neljä, kaksi seinän alaosassa ja kaksi seinän yläosassa. Ilma-aukkojen paikat sijaitsivat samalla seinustalla väliseinän molemmin puolin. Kuvassa 18 näkyy toisen simuloitavan osastoinnin pohjakuva tulo- ja poistoilma-aukkojen mahdollisilla paikoilla sekä osastoinnin sisällä olevat mittauspisteet (P1-P54).



Kuva 18. Toisen osastoinnin pohjakuva tulo- ja poistoilma-aukkoineen.

Koetilanteet toiselle simuloidulle osastoinnille näkyvät taulukossa 6. Ilma tuli osastointiin joko ilma-aukosta 1 seinän yläosasta tai ilma-aukoista 2 seinän ylä- tai alaosasta. Ilma poistui osastoinnista jokaisessa tilanteessa seinän alaosasta aukosta 1. Koetilanteet 1 ja 4 kuvaavat tilannetta, jossa saunan puolelle ei ole mahdollisuutta tehdä ilma-aukkoa ja osastoinnin ilmanvaihto tapahtuu vain pesuhuoneen oven kautta. Tämä on oletettavasti huono tilanne. Muissa tilanteissa oletettiin saunan puolella olevan ikkuna tai muu yhteys

ulkoilmaan, jonka kautta pystyttiin järjestämään poistoilmareitti. Poisto- ja tuloilma-aukkoja oletettiin olevan molempia osastossa vain yhdet kappaleet ja ne olivat halkaisijaltaan 100 mm tai 120 mm riippuen halutusta paine-erosta. Simuloinnit tehtiin ilmanvaihtokerroksen arvoilla 10 l/h. Tilanteissa 1-3 paine-ero oli -10 Pa ja tilanteissa 4-6 paine-ero oli -20 Pa:n ja -30 Pa:n välillä. Näin ollen toisessa osastoinnissa tulo- ja poistoilma-aukkojen paikkojen ja paine-eron yhdistelmiä oli yhteensä 6 kappaletta.

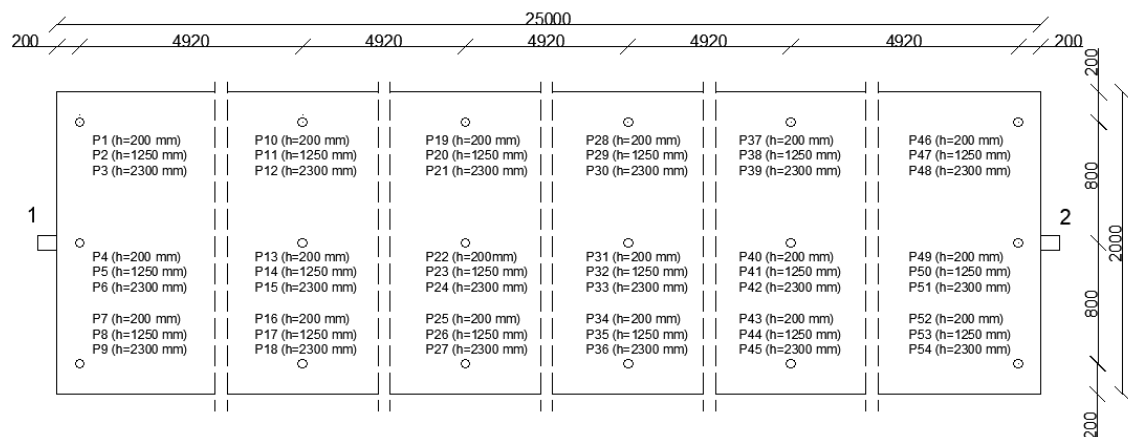
Taulukko 6. Toisen simuloidun osastoinnin tulo- ja poistoilma-aukkojen paikkojen yhdistelmät.

Koetilanne	Tulo	h_t [mm]	Poisto	h_p [mm]	Paine-ero [Pa]	\varnothing [mm]
1	1	1800	1	200	-10	120
2	2	1800	1	200	-10	120
3	2	200	1	200	-10	120
4	1	1800	1	200	-20-(-30)	100
5	2	1800	1	200	-20-(-30)	100
6	2	200	1	200	-20-(-30)	100

Oletuksena oli, että tulo- ja poistoilma-aukon ollessa väliseinän eri puolilla, olisi ilmanvaihtuvuus olisi parempi osastoinnissa kuin silloin kun ilma-aukot olisivat samalla puolella väliseinää.

4.3.3 Osastointi 3

Kolmas simuloitava osastointi oli pitkän ja kapean mallinen tila, joka kuvasti pitkää käytävää (kuva 19). Mittauspisteitä oli yhteensä 54 kappaletta (P1 - P54). Osastoinnin leveys oli 2,0 m, syvyys 25,0 m ja korkeus 2,5 m, jolloin osastoinnin tilavuus oli 125 m³.



Kuva 19. Kolmannen simuloitavan osastoinnin pohjakuva mitoilla ja mittauspisteillä.

Kolmannen osastoinnin simuloitavat koetilanteet näkyvät taulukossa 7. Tulo- ja poistoilma-aukot sijoitettiin päätyseiniin, joissa oli yhteensä neljä mahdollista paikkaa ilma-aukoille. Ilma-aukkojen halkaisijat olivat 280 mm tai 330 mm halutusta paine-erosta riip-

puen. Ilmanvaihtokerroin oli kaikissa tilanteissa 10 l/h. Tavoitteena kolmannella osastoinnilla oli lähinnä tutkia kuinka pitkälle tuloilmavirran huuhteleva vaikutus yltää, kun tuloilma-aukko ja poistoilma-aukko on sijoitettu samalle päätyseinälle ja katsoa kuinka tilanne muuttuu, kun poistoilma-aukko sijoitetaan toiseen päätyyn. Myös paine-erojen vaikutusta huuhtelevuuteen tutkittiin. Paine-ero oli -10 Pa tilanteissa 1-3 ja tilanteissa 4-6 paine-ero oli -20 Pa:n ja -30 Pa:n välillä. Kolmannessa osastoinnissa tulo- ja poistoilma-aukkojen paikkojen ja paine-eron yhdistelmiä oli yhteensä 6 kappaletta.

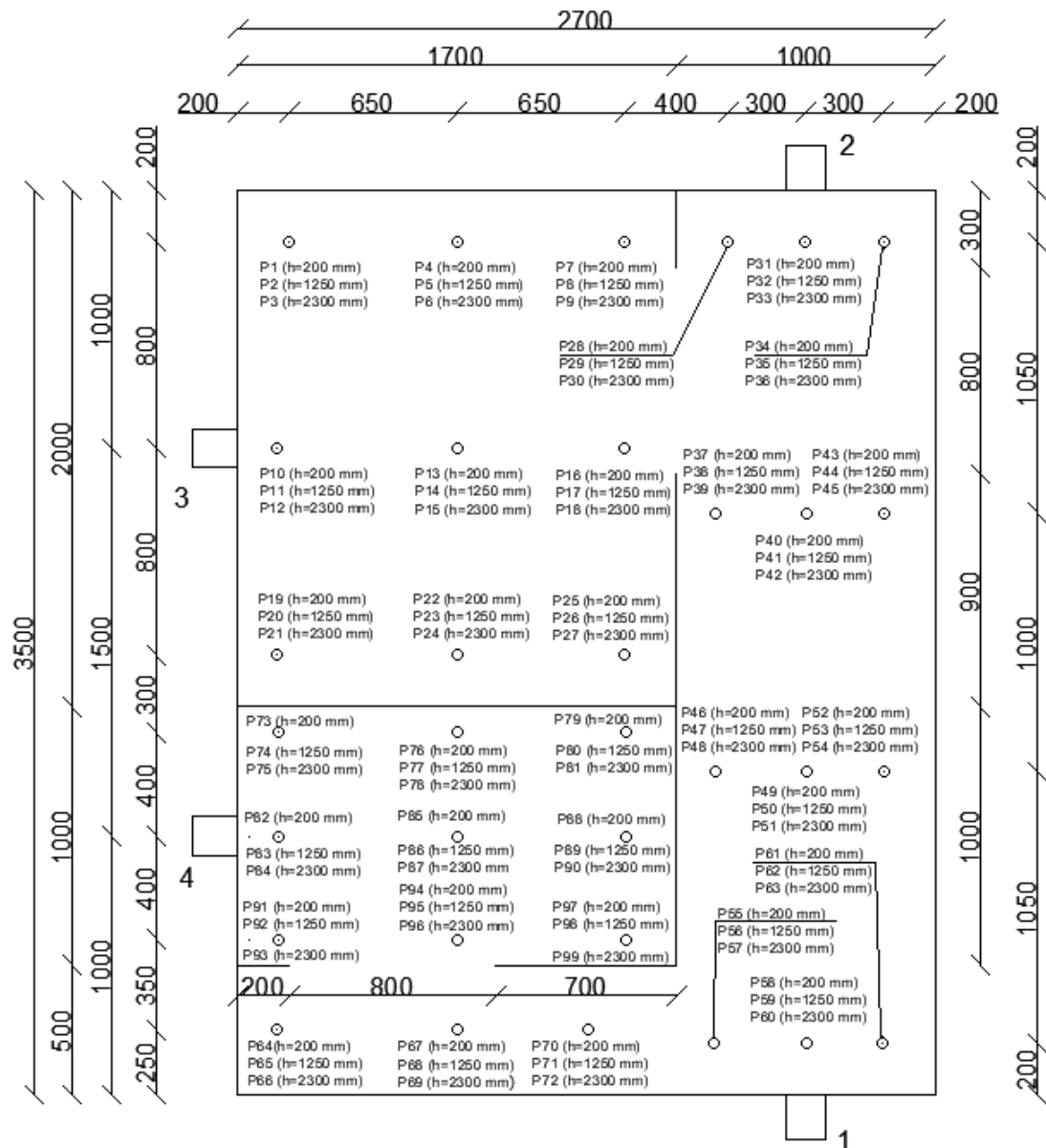
Taulukko 7. Kolmannen osastoinnin koetilanteet

Koetilanne	Tulo	ht [mm]	Poisto	hp [mm]	Paine-ero [Pa]	Ø [mm]
1	1	2300	1	200	-10	330
2	2	2300	1	200	-10	330
3	2	200	1	200	-10	330
4	1	2300	1	200	-20-(-30)	280
5	2	2300	1	200	-20-(-30)	280
6	2	200	1	200	-20-(-30)	280

Oletuksena oli, että ilman vaihtuvuus ja huuhtelevuus paranevat, kun poistoilma-aukon siirtää tuloilma-aukon kanssa samasta päädyistä vastakkaiseen päätyyn.

4.3.4 Osastointi 4

Neljäs osastointi oli muodoltaan simuloitavista osastoinneista monimutkaisin. Osastoinnissa oli kapea L-kirjaimen muotoinen käytävä ja kaksi huonetta käytävän molemmissa päissä (kuva 20). Osastoinnin korkeus oli 2,5 m, leveys yhteensä 2,7 m ja syvyys yhteensä 3,5 m, jolloin tilavuus oli noin 23,5 m³. Oviaukot olivat 0,8 m leveitä ja 2,5 m korkeita. Mittauspisteitä osastoinnin sisällä oli 99 kappaletta.



Kuva 20. Neljännän simuloitavan osastoinnin pohjakuva

Ilmanvaihtokertoimena simuloinnissa käytettiin 10 l/h. Tuloilma tuli joko yhdestä tai kahdesta aukosta osastointiin. Ilma-aukkojen halkaisijat näkyvät taulukossa 8. Tulo- ja poistoilma-aukoille oli yhteensä neljä vaihtoehtoa, kahdessa kohtaa seinän alareunassa (1 ja 2) ja kahdessa kohtaa seinän yläreunassa (3 ja 4). Tilanteissa 1-5 sekä 11-13 paine-ero oli -10 Pa ja tilanteissa 6-10 sekä 14-16 paine-ero oli -20 Pa:n ja -30 Pa:n välillä. Neljännessä osastoinnissa tulo- ja poistoilma-aukkojen paikkojen ja paine-eron yhdistelmiä oli yhteensä 16 kappaletta. Neljännän simuloitavan osastoinnin koetilanteet on listattu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Neljännen simuloitavan osastoinnin koetilanteet

Koetilanne	Tulo	ht [mm]	Poisto	hp [mm]	Paine-ero [Pa]	Ø [mm]
1	2	200	1	200	-10	140
2	3	2300	1	200	-10	140
3	4	2300	1	200	-10	140
4	2	200	3	2300	-10	140
5	2	200	4	2300	-10	140
6	2	200	1	200	-20-(-30)	120
7	3	2300	1	200	-20-(-30)	120
8	4	2300	1	200	-20-(-30)	120
9	2	200	3	2300	-20-(-30)	120
10	2	200	4	2300	-20-(-30)	120
11	3 & 4	2300/2300	1	200	-10	100
12	4 & 2	2300/200	3	2300	-10	100
13	3 & 2	2300/200	4	2300	-10	100
14	3 & 4	2300/2300	1	200	-20-(-30)	85
15	4 & 2	2300/200	3	2300	-20-(-30)	85
16	3 & 2	2300/200	4	2300	-20-(-30)	85

Ilman jakautuminen huoneisiin oletettiin olevan heikkoa, kun poistoilma-aukko sijaitsi kohdassa 1 ja tuloilma-aukko kohdassa 2. Tällöin todennäköisesti muodostuisi oikosulkuvirtaus. Huoneiden ilmanvaihdon oletettiin parantuvan, kun huoneissa oli tulo- tai poistoilma-aukot.

Oletuksena oli myös, että useammalla tuloilma-aukolla osastoinnin ilmanvaihto olisi parempi eli ilma jakautuisi laajemmalle alueelle tasaisemmin kuin yhdellä tuloilma-aukolla. Suuremmilla ilma-aukoilla eli pienemmillä paine-eroilla ja ilmavirran nopeuksilla ilman virtauksen ajateltiin olevan myös tasaisempi. Simuloinnilla pyrittiin löytämään mahdollisimman hyvä ilmanjakotapa kyseiseen osastointiin.

5. MITTAUSTULOKSET

5.1 Laboratoriokokeet

Mittaustuloksista ensimmäisenä käydään läpi Tampereen yliopiston rakennushallissa tehtyjen laboratoriokokeiden tulokset. Laboratoriokokeista ensimmäisenä tehtiin osastointien vuototarkastelu merkkisavulla, minkä jälkeen tutkittiin osastointien ilmanvaihtokerroimia ja alipaineita. Viimeisenä tutkittiin ilmanjakotapoja merkkisavun avulla.

5.1.1 Vuototarkastelu merkkisavulla

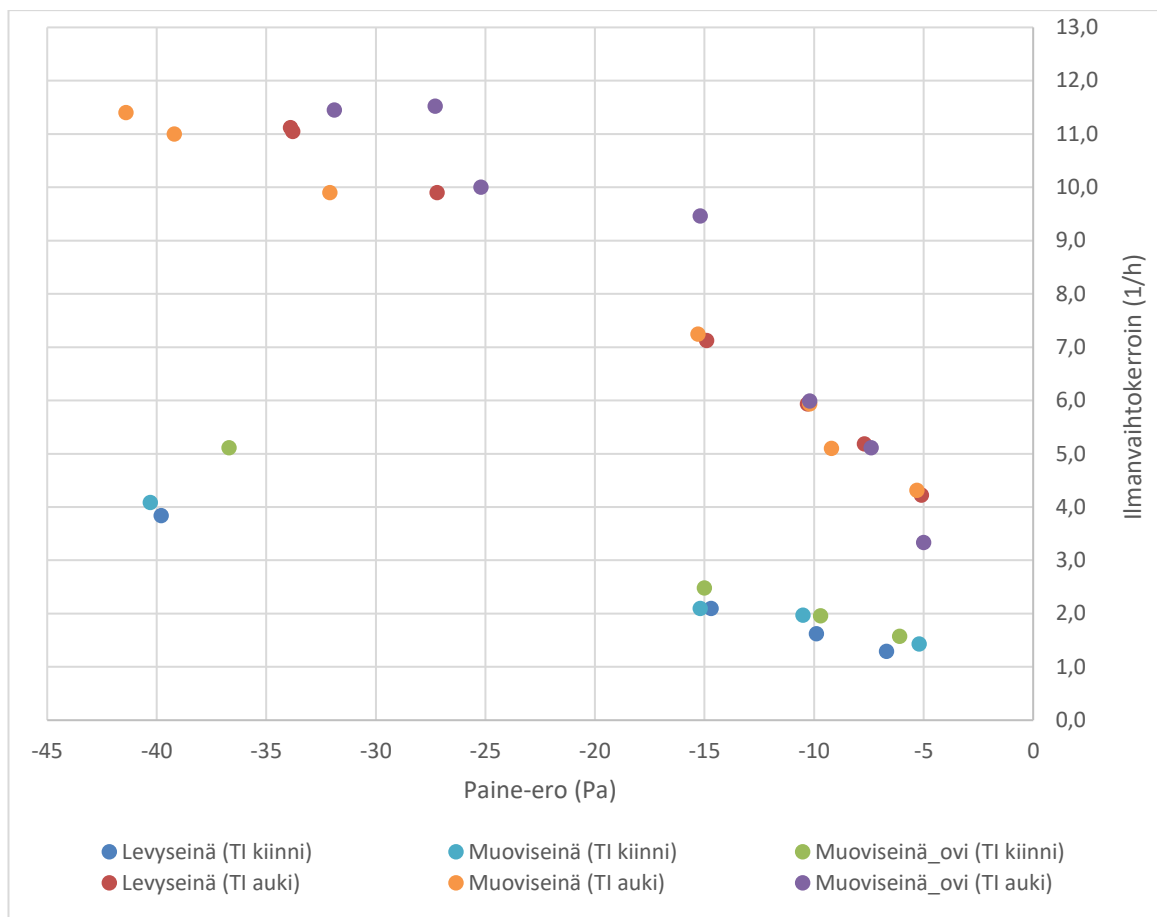
Ensimmäinen vuototarkastelu merkkisavulla tehtiin muoviseinälle. Tasapainotilassa savua vuoti hieman välitilaan osastoivan seinän yläreunasta ja muovikalvon liitoksesta pystytolppaan seinän keskiosasta. Yläreunan vuoto johtui teipin huonosta kiinnityksestä kattoon osastoinnin sisäpuolella. Katossa oli rosainen kohta, johon teippi ei ollut kunnolla liimautunut ja teippi oli osittain irronnut. Vuoto seinän keskiosassa johtui muovikalvon ja rungon pystytolpan liitoksessa olleesta rypystä. Liitoskohdassa muovi oli kolmin kerroin rypyn kohdalla ja teipin tartunta oli pettänyt. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Muoviseinän ovellisen version vuototarkastelussa savua näkyi tulevan raosta, joka oli syntynyt pystytolpan ja muovikalvon liitokseen. Puukehikkoon oli kyseisessä kohdassa kiinnitetty kaksi kerrosta muovikalvoa. Kalvoista toinen oli aikaisemmassa testattavassa rakenteessa ollut muovikalvo, johon oli tehty reikä kulkuaukoksi ja jonka päälle oli teipattu valmis vetoketjullinen muoviovi. Oven vetoketjun läpi ei näkynyt vuotoa, kun rakennetta testattiin merkkisavulla. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Levyrakenteiselle seinälle tehdyssä vuototarkastelussa havaittiin merkkisavun pääsevän välitilaan puurungon yläpuun ja levyn liitoksesta noin 10 senttimetrin matkalta. Lähempää katsottuna kyseisessä kohdassa näkyi pieni rako, jota polyuretaanivaaho ei ollut konnaan täyttänyt. (Linnainmaa *et al.* 2019)

5.1.2 Ilmanvaihtokerroin ja alipaine

Vuototarkasteluissa havaitut vuotokohdat korjattiin ennen seuraavien kokeiden suorittamista. Laboratoriossa tehtyjen kokeiden 2 ja 3 tulokset on esitetty kuvassa 21. Osastointien ilmanvaihtokertoimen arvot testatuilla seinärakenteilla on esitetty kuvassa paine-eron funktiona. (Linnainmaa *et al.* 2019)



Kuva 21. Testiosastoinnin ilmanvaihtokerroin paine-eron funktiona eri seinärakenteilla (Linnainmaa et al. 2019)

Kuvasta 20 pystyy huomaamaan, että tuloilman ollessa kiinni osastoinnin ilmanvaihtokerroin oli pienempi kuin tuloilman ollessa auki. Tiiviillä osastoinnilla voidaan siis saavuttaa tavoiteltu alipaine pienelläkin alipaineistajan tilavuusvirralla, mutta ilmanvaihtuvuus jää pieneksi. Paine-eron seurannalla ei siten voida pelkästään varmistamaa osastoinnin toimivuutta. (Linnainmaa et al. 2019)

Eri seinärakenteiden tiiveyttä arvioitiin laskemalla myös osastoinnin vuotoilmavirta. Vuotoilmavirta on laskettu vähentämällä poistoilmavirrasta tuloilmavirta. Erotuksesta jäljelle jäävä vuotoilmavirta on tullut osastointiin epätiiveyskohdista rakenteiden läpi. Osastoinnin vuotoilmavirta ei vastaa suoraan tutkitun osastoivan seinärakenteen tiiveyttä, sillä osastoinnissa oli myös kolme muuta seinää sekä lattia ja katto, joiden tiiveyttä ei oltu mitattu, mutta joiden tiiveys kuitenkin pysyi kutakuinkin samana koetilanteiden välillä. (Linnainmaa et al. 2019)

Taulukko 9. Osastoivien seinien mitatut vuotoilmavirrat.

Seinärakenne	Tilanne	Vuotoilmavirta [l/s]	Toteutunut paine-ero [Pa]	
Muoviseinä	Tuloilma kiinni	-5 Pa	6,4E-06	- 5,2
		-10 Pa	8,9E-06	- 10,5
		-15 Pa	9,4E-06	- 15,2
		-40 Pa	1,8E-05	- 40,3
	Tuloilma auki	-5 Pa	4,7E-06	- 5,3
		-10 Pa	5,9E-06	-10,2
		-15 Pa	7,3E-06	- 15,3
		-40 Pa	1,6E-05	- 39,2
Muoviseinä ovella	Tuloilma kiinni	-5 Pa	7,1E-06	- 6,1
		-10 Pa	8,8E-06	-9,7
		-15 Pa	1,1E-05	-14,9
		-40 Pa	2,3E-05	-36,7
	Tuloilma auki	-5 Pa	6,4E-06	- 4,9
		-10 Pa	9,5E-06	- 10,2
		-15 Pa	2,1E-05	- 15,2
		-40 Pa	2,0E-05	- 31,9
Levyseinä	Tuloilma kiinni	-5 Pa	5,8E-06	- 6,7
		-10 Pa	7,3E-06	- 9,9
		-15 Pa	9,4E-06	- 14,7
		-40 Pa	1,7E-05	- 39,8
	Tuloilma auki	-5 Pa	4,5E-06	- 5,1
		-10 Pa	6,7E-06	- 10,3
		-15 Pa	8,1E-06	- 14,9
		-40 Pa	1,4E-05	- 33,8

Osastoivien seinien rakenteiden tiiveyksissä ei ilmennyt merkittäviä eroja vuotoilmavirtojen perusteella. Kaikilla testatuilla osastoivilla seinärakenteilla pystyttiin saavuttamaan hyvä tiiveystaso. (Linnainmaa *et al.* 2019)

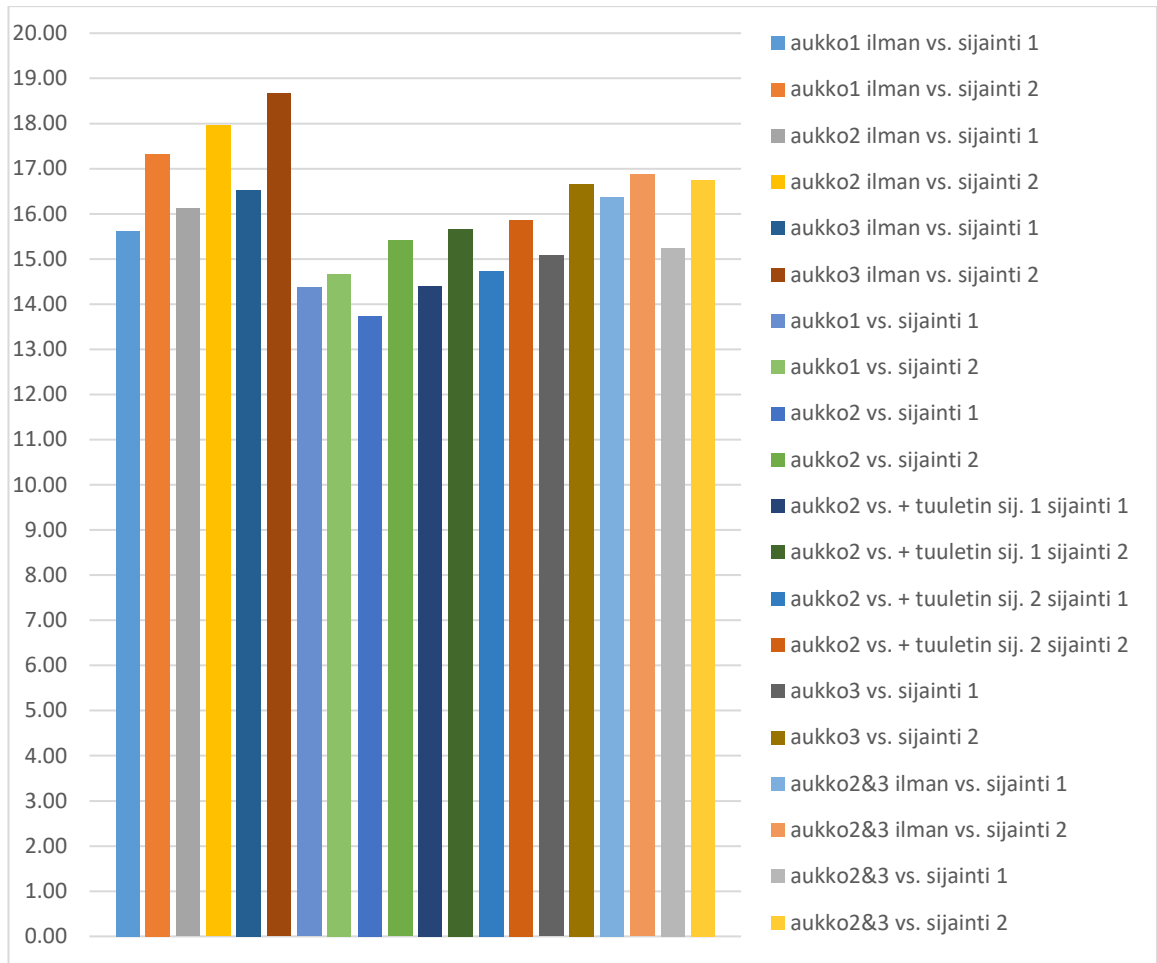
5.1.3 Ilmanjakotavan tutkiminen merkkisavulla

Ilmanjakotapaa tutkittiin mittaamalla merkkisavun haihtumiseen kuluvaa aikaa. Aikaa mitattiin siitä hetkestä lähtien, kun savua generoitiin osastointiin siihen hetkeen saakka, kun puhaltimen ulospuhallusilmassa ei näkynyt enää savua. Jokaisesta tilanteesta tehtiin kaksi mittausta, joista laskettiin keskiarvot. Ilmanopeusantureilla mitattiin poistoilmavirran keskimääräistä nopeutta, josta laskettiin osastoinnin ilmanvaihtokerroin. Jokaisessa tilanteessa mitattiin osastoinnin sisältä myös ilman lämpötila ja suhteellinen kosteus. Mittaustulokset on merkitty taulukkoon 10. Väliseinä on lyhennetty taulukossa ja kaaviossa kirjaimilla vs. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Taulukko 10. Merkkisavulla tehtyjen tutkimusten tulokset.

	<i>Tilanne</i>	<i>Keskiarvo [min:sek]</i>	<i>T [°C]</i>	<i>RH [%]</i>	<i>Ilmanvaihto- kerroin [1/h]</i>
1	aukko1 ilman vs.				
	sijainti 1	15.37.30	25	44	10,2
	sijainti 2	17.20.00			10,2
2	aukko1 vs.				
	sijainti 1	14.22.30	24	51	10,2
	sijainti 2	14.40.00			10,1
3	aukko2 ilman vs.				
	sijainti 1	16.07.30	26,5	40	10,0
	sijainti 2	17.57.30			10,1
4	aukko2 vs.				
	sijainti 1	13.45.00	27	33	10,1
	sijainti 2	15.25.00			10,1
5	aukko3 ilman vs.				
	sijainti 1	16.32.30	26,5	36	10,0
	sijainti 2	18.40.00			10,2
6	aukko3 vs.				
	sijainti 1	15.05.00	26,5	35	10,0
	sijainti 2	16.40.00			10,0
7	aukko2 vs. + tuuletin sijainti 1				
	sijainti 1	14.25.00	25,5	43	10,0
	sijainti 2	15.40.00			10,0
8	aukko2 vs. + tuuletin sijainti 2				
	sijainti 1	14.45.00	24,5	50	10,1
	sijainti 2	15.52.30			10,0
9	aukko2&3 ilman vs.				
	sijainti 1	16.22.30	26	36	10,2
	sijainti 2	16.52.30			10,2
10	aukko2&3 vs.				
	sijainti 1	15.15.00	27	33	10,1
	sijainti 2	16.45.00			10,1

Tuloksista tehtiin kaavio (kuva 22), jossa pystyakselilla on savun hälvenemiseen kulunut aika.



Kuva 22. Kaavio savukokeiden tuloksista

Kaaviosta nähdään, että ilman väliseinää tuloilman tullessa aukosta 1 savu huuhtoutui osastoinnista nopeammin kuin tuloilman tullessa aukosta 2. Samoin tuloilman tullessa aukosta 2 savu huuhtoutui nopeammin kuin ilman tullessa aukosta 3. Väliseinän kanssa savukoneen sijainnilla 1 tehdyissä mittauksissa ilman tullessa aukosta 1 savun huuhtoutuminen kesti kauemmin kuin ilman tullessa aukosta 2. Tämä saattoi johtua siitä, että ilman tullessa aukosta 1 savukone ja tuloilma-aukko olivat vastakkain, jolloin tuloilmavirta puhalsi savua poispäin poistoilma-aukolta ja esti osan savun suoran pääsyn poistoilma-aukkoon. Muiden mittaustulosten perusteella savu huuhtoutui osastoinnista nopeammin kun tuloilma-aukko oli lähempänä poistoilma-aukkoa. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Väliseinän ollessa osastoinnissa paikallaan savun huuhtoutuminen oli nopeampaa kuin ilman väliseinää kaikkien mittaustulosten mukaan. Oletuksena ennen testejä oli, että väliseinällä savun huuhtoutuminen kestäisi kauemmin. Näiden tulosten perusteella oletus oli väärä eikä väliseinän lisääminen hidastanut savun huuhtoutumista osastoinnista vaan päinvastoin nopeutti sitä. Selityksenä saattoi olla se, että kun savu oli kerran tullut väliseinän toiselle puolelle eli samalle puolelle poistoilma-aukon kanssa, väliseinä mahdollisesti esti osan savun kiertämisen takaisin väliseinän taakse. Tällöin osa savusta

jäi mahdollisesti kiertämään pienemmälle alueelle väliseinän ja sivuseinän väliin. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Kahden tuloaukon tilanteita (aukko 2&3) vertailtiin väliseinän ja savukoneen sijainnin suhteen samanlaisiin tilanteisiin, joissa oli samat tuloilma-aukot (aukko 2 tai aukko3) auki yksi kerrallaan. Tilanteissa, joissa ei ollut väliseinää ja savua generoitiin sijainnista 1, kahdella tuloilma-aukolla savun huuhtoutuminen kesti kauemmin kuin yhdellä tuloilma-aukolla, mutta savua generoitaessa sijainnista 2 savu huuhtoutui nopeammin kahdella tuloilma-aukolla kuin yhdellä. Tilanteissa, joissa väliseinä oli paikallaan kahdella aukolla savun huuhtoutuminen kesti kauemmin kuin tuloilman tullessa vain yhdestä aukosta riippumatta savukoneen sijainnista. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Tuulettimen kanssa savun hälveneminen kesti kauemmin kuin samassa tilanteessa ilman tuuletinta. Tuulettimen sijainti 2 oli mittausten perusteella vielä huonompi kuin tuulettimen sijainti 1. Tuuletin todennäköisesti lisäsi ilman kiertoa osastoinnissa, mutta ei kuitenkaan mittaustulosten perusteella nopeuttanut savun kulkeutumista ulos osastoinnista. (Linnainmaa *et al.* 2019) Tuuletin saattaa heikentää osastoinnin puhdistumista, jos tuuletin siirtää epäpuhtautta osastoinnissa alueelle, jossa ilmanvaihto on heikko.

Kaaviosta huomataan, että sijainnista 1 generoitu savu huuhtoutui osastosta nopeammin, kuin sijainnista 2 generoitu savu. Tämä oli oletettu tulos, sillä savukoneen sijainti 1 oli lähempänä poistoilma-aukkoa. Osa savusta päätyi todennäköisesti heti poistoilma-aukkoon, jolloin osastointiin jäi kiertämään savua vähemmän ja poistui siten nopeammin osastoinnista. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Mittaustulosten mukaan lyhin savun huuhtoutumisaika oli tilanteessa, jossa väliseinä oli paikallaan, tuloilma tuli aukosta 2 ja savua generoitiin sijainnista 1. Tämä tulos käy muiden tulosten kanssa yhteen, sillä väliseinän lisäys sekä savun generointi sijainnista 1 sijainnin 2 sijaan nopeutti savun huuhtoutumista osastoinnista myös muiden mittaustulosten perusteella. Tuloilman tuleminen aukosta 2 saattoi vahvistaa väliseinän vaikutusta, kun tuloilma virtasi keskeltä osastointia tilan poikki ja mahdollisesti esti osan sijainnista 1 päästetyn savun kulun väliseinän taakse. (Linnainmaa *et al.* 2019)

Testien aikana savua tarkkailtaessa huomattiin savun liikkeestä tuloilman vaikuttavan osastoinnin sisäilmavirtoihin melko voimakkaasti. Tuloilma puhalsi savua tuloilma-aukolta pois päin vastakkaista seinää kohti. Osa savusta todennäköisesti lähti kiertämään seinää pitkin ylös kohti kattoa ja kulkeutui sieltä mahdollisesti uudelleen tuloilma-aukolle. Testeissä savun liikkeen näki selvästi juuri savun päästön jälkeen, mutta melko nopeasti savu sekoittui osastointiin niin ettei sen liikkeen suuntaa pystynyt erottamaan. (Linnainmaa *et al.* 2019)

5.2 Virtauslaskenta

Virtauslaskennalla tutkittiin, miten erimallisissa osastoinneissa erilaiset ilmanjakotavat vaikuttivat osastointien sisäisiin ilmavirtauksiin. Jokaisesta koetilanteesta on otettu kuva, jossa näkyy ilmavirran nopeudet virtaviivoina (pathlines). Ilmavirran nopeudet esitetään kuvissa väriasteikolla 0-5 m/s. Vaikka useassa tilanteessa tuloilma-aukkojen lähellä ilmavirran nopeus ylittää 5 m/s, asteikolla saatiin osastoinnin sisäiset ilmavirran nopeudet erottumaan paremmin kuin, jos maksimi nopeus olisi ollut suurempi. Virtauslaskennasta saadut mittauspisteiden ilmavirran nopeuksien arvot merkittiin pohjakuviin. Pohjakuvissa on jokaisen mittauspisteen kohdalla päällekkäin kolme arvoa, joista alin on lähinnä lattiatasoa, keskimmäinen on tilan keskitasolla ja ylin on lähinnä kattoa. Kuvat on koottu liitteisiin A-D. Osastointien jokaisesta koetilanteesta laskettiin ilmavirran nopeuden keskiarvo, maksimiarvo, minimiarvo ja hajonta sekä paine-eron keskiarvo. Tulokset koottiin taulukoihin osastoinneittain.

Koetilanteiden kesken tehtiin vertailuja ilmanjakotapojen perusteella ja siten pyrittiin selvittämään mikä ilmanjakotapa kussakin osastoinnissa olisi hyvä. Tilanteita vertailtiin keskenään ilmavirran nopeuksien sekä hajonnan avulla.

5.2.1 Osastointi 1

Ensimmäisen simuloidun osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeudet ja paine-erojen arvot näkyvät taulukossa 11. Nurkka 1 tarkoittaa pisteitä P1-P3, nurkka 2 pisteitä P19-P21, nurkka 3 pisteitä P7-P9 ja nurkka 4 pisteitä P25-P27.

Taulukko 11. Ensimmäisen simuloidun osastoinnin ilmavirran nopeudet ja paine-erot.

Koetilanne	Ilmavirran nopeuden keskiarvo [m/s]					Paine-ero [Pa]
	Koko osastointi	Nurkka 1	Nurkka 2	Nurkka 3	Nurkka 4	Koko osastointi
1	0,44	1,46	0,17	0,48	0,23	- 11,30
2*	0,43	0,18	1,46	0,17	0,53	- 11,28
3	0,46	0,50	0,25	1,46	0,27	- 11,27
4	0,48	0,25	0,52	0,21	1,54	- 11,12
5	0,64	2,32	0,25	0,65	0,23	- 21,57
6*	0,54	0,20	2,09	0,22	0,56	- 23,63
7	0,61	0,58	0,30	2,13	0,33	- 24,43
8	0,61	0,33	0,50	0,23	2,22	- 23,92

Nurkkien ilmavirran nopeuksien keskiarvoista huomaa hyvin, että nurkissa, joissa on tuloilma-aukko, on myös suurin keskiarvo. Taulukosta näkee myös, että tuloilma-aukkoa vastapäätä olevassa nurkassa on aina toiseksi suurin ilmavirran nopeus. Paine-erot ovat lähellä tavoiteltuja arvoja, vaikka ilma-aukkojen halkaisijat laskettiin karkeasti ottamatta kerta- ja kitkahäviöistä aiheutuvia painehäviöitä huomioon. Tämä selittyy osaksi

osastoinnin yksinkertaisella muodolla. Käytännössä paine-erot olisivat jonkin verran pienempiä, koska todellisuudessa rakenteissa on aina hieman ilmavuotoja.

Liitteessä A olevista kuvista huomaa kuinka tuloilman vaikutus yltää huomattavasti pidemmälle kuin imun vaikutus poistoilma-aukon läheisyydessä. Pintojen lähellä olleet mittauspisteet olivat aina 200 mm etäisyydellä seinä-, lattia- tai kattopinnoista tai ilma-aukkojen suista, joten imun vaikutus ei näkynyt mittauspisteiden arvoissa yhtä selkeästi kuin tuloilmavirran vaikutus. Tuloilma purkautui tuloilma-aukoista ikään kuin puhallussuihkun tavoin ja törmäsi lähes jokaisessa ensimmäisen simuloitavan osastoinnin koetilanteessa edessä olevaan seinään. Törmätessään seinään ilmavirta hajaantui ja muutti suuntaa.

Tilanteiden 2 ja 6 oletettiin olevan huonoimpia tilanteita osastoinnin ilmanvaihdon kannalta. Taulukon 11 perusteella koko osastoinnin ilmavirran nopeuksien keskiarvot olivat näissä tilanteissa pienimmät eli oletus oli tältä osin oikein.

Taulukossa 12 näkyy ensimmäisen simuloitavan osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat.

Taulukko 12. Ensimmäisen osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat.

Koetilanne	Ilmavirran nopeus [m/s]		
	Maksimi	Minimi	Keskihajonta
1	4,08	0,06	0,80
2*	4,13	0,04	0,84
3	4,09	0,04	0,80
4	4,19	0,07	0,83
5	6,80	0,03	1,36
6*	6,03	0,09	1,17
7	5,96	0,09	1,17
8	6,18	0,11	1,20

Maksimi- ja minimiarvot mitattiin aina tuloilma-aukkoa lähimpänä olevasta mittauspisteestä. Minimiarvot mitattiin useimmiten osastoinnin keskeltä. Joissain tilanteissa, joissa paine-ero oli suurempi, oli minimiarvo mitattu samasta tai vastakkaisesta nurkasta missä tuloilma-aukko oli, niin että jos tuloilma-aukko oli ylhäällä, minimiarvo oli mitattu alapuolelta lähimpänä lattiaa olevasta mittauspisteestä kuten tilanteissa 5 ja 6. Ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot noudattivat melko tarkasti kaavaa 4 eli maksimi- ja minimiarvot olivat suuremmat tilanteissa, joissa oli suurempi paine-eron arvo. Ilmavirran nopeuksien minimiarvot sen sijaan pysyivät lähes samoina, vaikka paine-eron arvot muuttuivat. Ilmavirran nopeuksien keskihajonta kuvaa sitä kuinka paljon ilmavirran nopeuksien arvot eri mittauspisteissä keskimäärin erosivat koko osastoinnin ilmavirran nopeuden keskiarvosta. Koetilanteissa 5-8, joissa oli suuremmat paine-erojen ja ilmavirran nopeuksien arvot kuin koetilanteissa 1-4, oli myös suuremmat ilmavirran nopeuksien keskihajonnat. Tästä voidaan päätellä,

että mitä suurempia paine-ero ja maksimi ilmavirran nopeus ovat, sitä isompi ilmavirran nopeuksien hajonta osastoinnin sisällä on.

5.2.2 Osastointi 2

Toisena simuloidun osastoinnin tulokset ovat taulukossa 13, johon on taulukoitu koetilanteiden ilmavirran nopeuksien ja paine-erojen keskiarvot. Kylpyhuone tarkoitti pisteitä P1-P27 ja sauna tarkoitti pisteitä P28-P54.

Taulukko 13. Toisen simuloidun osastoinnin ilmavirran nopeudet ja paine-erot

Koetilanne	Ilmavirran nopeuden keskiarvo [m/s]			Paine-ero [Pa]
	Koko osastointi	Kylpyhuone	Sauna	Koko osastointi
1	0,29	0,42	0,15	-11,13
2	0,29	0,15	0,43	-11,14
3	0,28	0,14	0,42	-11,10
4	0,40	0,58	0,21	-28,53
5	0,36	0,19	0,54	-25,93
6	0,36	0,17	0,54	-24,72

Kylpyhuoneen ja saunan keskimääräisistä ilmavirran nopeuksista huomaa, että huoneessa, jossa tuloilma-aukko oli, oli myös keskimääräisesti suurempi ilmavirran nopeus. Näissä tilanteissa kyseinen ero oli noin kolminkertainen. Ilmavirran nopeuksien eron pystyy huomaamaan myös liitteen B kuvista. Paine-erojen toteutuneet arvot olivat lähellä tavoiteltuja arvoja.

Toisen osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat ovat taulukossa 14.

Taulukko 14. Toisen osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat.

Koetilanne	Ilmavirran nopeus [m/s]		
	Maksimi	Minimi	Keskihajonta
1	4,23	0,03	0,58
2	4,28	0,03	0,59
3	4,23	0,06	0,58
4	5,88	0,08	0,79
5	6,06	0,04	0,82
6	5,67	0,08	0,77

Taulukon 14 arvoista huomaa, että toisen simuloidun osastoinnin maksimi- ja minimiarvot olivat lähes samanlaiset kuin ensimmäisessä simuloidussa osastoinnissa. Tämä johtui siitä, että osastoinneissa oli samat tavoitellut paine-erot. Ilmavirran nopeuksien keskiha-

jonnat suurenivat samalla tavalla kuin ensimmäisessä osastoinnissa paine-eron suurentuessa. Tuloilma-aukon sijainnin muutos ei näkynyt ilmavirran nopeuksien keskihajontojen arvoissa. Poistoilma-aukko eli alipaineistaja kannattaisi sijoittaa mahdollisimman lähelle epäpuhtauslähdettä eli tämänkaltaisessa osastoinnissa ainakin samaan huoneeseen purun kanssa. Tuloilma-aukko kannattaisi sijoittaa niin, että ilma virtaisi osastoinnin läpi eli tässä tapauksessa mahdollisuuksien mukaan toiseen huoneeseen. Jos toiseen huoneeseen ei ole mahdollista tehdä ilma-aukkoa, voi tuloilman tuoda esimerkiksi letkulla toiseen huoneeseen.

5.2.3 Osastointi 3

Kolmannen simuloidun osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeudet ja alipaineen arvot ovat taulukossa 15. Pääty 1 tarkoittaa pisteitä P1-P9 ja pääty 2 tarkoittaa pisteitä P46-P54.

Taulukko 15. Kolmannen simuloidun osastoinnin ilmavirran nopeudet ja paine-erot

Koetilanne	Ilmavirran nopeuden keskiarvo [m/s]			Paine-ero [Pa]
	Koko osastointi	Pääty 1	Pääty 2	Koko osastointi
1	0,35	0,70	0,04	-11,90
2	0,36	0,27	0,66	-13,79
3	0,36	0,22	0,63	-12,73
4	0,40	0,86	0,04	-21,85
5	0,36	0,18	0,54	-21,88
6	0,40	0,18	0,77	-21,77

Kolmannen simuloidun osastoinnin ilmavirran nopeuksista huomaa, että päädyssä, jossa tuloilma-aukko oli, oli myös suurempi ilmavirran nopeus. Ensimmäisessä ja neljännessä koetilanteessa, joissa tulo- ja poistoilma-aukot olivat molemmat päädyssä 1, oli päädyn 2 keskimääräinen ilmavirran nopeus hyvin pieni, noin 5-6 % päädyn 1 keskimääräisestä ilmavirran nopeudesta. Muissa tilanteissa, joissa tulo- ja poistoilma-aukot olivat eri päädyissä, oli päädyn 1 keskimääräinen ilmavirran nopeus noin 25-40 % päädyn 2 keskimääräisestä ilmavirran nopeudesta. Ilma-aukkojen paikat eivät näyttäneet vaikuttavan paine-erojen arvoihin ja toteutuneet paine-erot olivat lähellä tavoiteltuja arvoja.

Liitteissä olevista ilman virtaviivakuvista näkee, että ilma alkoi pyörteillä käytävässä. Pyörre kehittyi pienemmällä alipaineen arvoilla lähelle tuloilma-aukkoa. Suuremmilla alipaineen arvoilla pyörre muodostui kauemmaksi tuloilma-aukosta, lähemmäksi osastoinnin keskiosaa paitsi koetilanteessa 4, jossa tulo- ja poistoilma-aukko olivat samassa päädyssä. Koetilanne 4 oli siis lähes samanlainen virtaviivakuvan perusteella kuin koetilanne 1, vaikka paine-eron arvo oli kaksinkertainen. Näistä koetilanteista (1 ja 4) myös huomaa kuinka osastoinnin toisessa päässä, jossa ei ollut tulo- eikä poistoilma-aukkoa, ilmavirran nopeudet olivat pienemmät kuin muissa koetilanteissa, joissa ilma-aukot olivat osastointien molemmissa päissä.

Taulukossa 16 on kolmannen osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat.

Taulukko 16. *Kolmannen osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat.*

<i>Koetilanne</i>	<i>Ilmavirran nopeus [m/s]</i>		
	Maksimi	Minimi	Keskihajonta
1	4,39	0,01	0,64
2	4,66	0,00	0,67
3	4,33	0,02	0,64
4	5,10	0,00	0,76
5	3,94	0,02	0,60
6	5,46	0,01	0,78

Ilmavirran nopeuden maksimi- ja keskihajonnat olivat myös kolmannen osastoinnin osalla samaa luokkaa kuin aikaisempien simuloitujen osastointien ilmavirran nopeuksien vastaavat arvot. Viidennen koetilanteen maksimi- ja keskihajonnat poikkesi muista hieman enemmän. Ilmavirran nopeuden minimiarvot olivat hyvin pieniä, lähellä nollaa. Pienimmät ilmavirran nopeudet olivat niin sanotusti pussin perällä koetilanteissa 1 ja 4. Muissa koetilanteissa ilmavirran nopeuden minimiarvot olivat osastoinnin keskialueilla, suuremmalla alipaineen arvolla hieman lähempänä poistoilma-aukkoa. Alipaineistaja ja tuloilma-aukko kannattaisi sijoittaa pitkässä käytävän muotoisessa osastoinnissa vastakkaisiin pätyihin.

5.2.4 Osastointi 4

Neljännessä osastoinnissa koetilanteita vertailtiin keskenään ilma-aukkojen paikkojen ja tuloilma-aukkojen määrien perusteella. Neljännen simuloitun osastoinnin ilmavirran nopeuksien ja paine-erojen arvot ovat taulukossa 17. Iso huone tarkoitti pisteitä P1 - P27 ja pieni huone tarkoitti pisteitä P73 - P99.

Taulukko 17. Neljännen simuloidun osastoinnin ilmavirran nopeudet ja paine-erot

Koetilanne	Ilmavirran nopeuden keskiarvo [m/s]			Paine-ero [Pa]
	Koko osastointi	Iso huone	Pieni huone	Koko osastointi
1	0,22	0,07	0,07	-12,62
2	0,20	0,43	0,01	-12,43
3	0,17	0,00	0,52	-12,61
4	0,26	0,14	0,08	-12,23
5	0,25	0,08	0,12	-11,18
6	0,25	0,08	0,07	-23,62
7	0,30	0,59	0,03	-23,33
8	0,16	0,01	0,44	-24,23
9	0,27	0,13	0,08	-24,08
10	0,27	0,07	0,11	-23,61
11	0,29	0,38	0,38	-14,40
12	0,27	0,10	0,37	-13,33
13	0,28	0,36	0,06	-12,13
14	0,34	0,47	0,44	-25,56
15	0,39	0,15	0,46	-26,51
16	0,42	0,52	0,10	-26,04

Koko osastoinnin ilmavirran nopeuksien keskiarvoista pystyi huomaamaan, että koetilanteissa 3 ja 8 oli muita pienemmät keskimääräiset ilmavirran nopeudet. Tuloilma-aukko oli näissä koetilanteissa pienemmässä huoneessa ja poistoaukko oli pienempää huonetta lähempänä olevassa käytävän päädyssä. Näissä koetilanteissa ison huoneen keskimääräiset ilmavirran nopeudet olivat pienimmillään ja pienemmän huoneen keskimääräiset ilmavirran nopeudet suurimmillaan eli ilmavirran nopeudet olivat jakautuneet epätasaisesti osastoinneissa. Koetilanteissa 2 ja 7 keskimääräiset ilmavirran nopeudet erosivat myös suuresti ison ja pienen huoneen välillä. Näissä koetilanteissa tuloilma-aukko oli isossa huoneessa ja poistoilma-aukko samassa kohtaa kuin koetilanteissa 3 ja 8. Koko osastoinnin keskimääräinen ilmavirran nopeus oli kuitenkin näissä koetilanteissa suurempi kuin koetilanteissa 3 ja 8, koska ilma virtasi pidemmän matkan isommasta huoneesta poistoilma-aukolle kuin pienemmästä huoneesta. Koetilanteissa 12, 13, 15 ja 16 ison ja pienen huoneen keskimääräisten ilmavirran nopeuksien ero oli myös melko suuri. Huoneessa, jossa oli tuloilma-aukko, oli huomattavasti suurempi keskimääräinen ilmavirran nopeus kuin huoneessa, jossa oli poistoilma-aukko. Kuitenkin huoneessa, jossa oli poistoilma-aukko, oli isompi keskimääräinen ilmavirran nopeus kuin huoneessa, jossa ei ollut ollenkaan ilma-aukkoja. Muissa koetilanteissa ilmavirran nopeudet olivat jakautuneet huoneiden kesken melko tasaisesti. Erityisesti koetilanteissa 11 ja 14, joissa tuloilma-aukot sijaitsivat molemmissa huoneissa, huoneiden keskimääräiset ilmavirran nopeudet olivat hyvin lähellä toisiaan. Paine-erot olivat lähellä tavoiteltuja paine-eroja.

Neljännen osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat ovat taulukossa 18.

Taulukko 18. Neljännen osastoinnin koetilanteiden ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat.

Koetilanne	Ilmavirran nopeus [m/s]		
	Maksimi	Minimi	Keskihajonta
1	4,48	0,03	0,53
2	4,45	0,00	0,51
3	4,21	0,00	0,49
4	4,50	0,03	0,53
5	4,78	0,02	0,56
6	6,22	0,02	0,68
7	5,84	0,01	0,75
8	2,83	0,00	0,36
9	6,30	0,03	0,67
10	6,23	0,02	0,67
11	4,79	0,02	0,70
12	4,61	0,03	0,59
13	4,27	0,02	0,63
14	5,80	0,02	0,85
15	6,32	0,06	0,85
16	6,91	0,02	0,99

Ilmavirran nopeuksien maksimi- ja minimiarvot sekä keskihajonnat olivat lähellä aikaisempien simuloitujen osastointien vastaavia arvoja. Ilmavirran nopeuden minimiarvot olivat suurimmassa osassa koetilanteita hyvin pieniä niin kuin kolmannessakin osastoinnissa. Molempiin kyseessä oleviin osastointeihin (3. ja 4.) siis muodostui paikkoja, joissa ilman vaihtuminen oli heikkoa. Ilmavirran nopeuden keskihajonta oli hieman suurempi, kun osastoinnin alipaine oli suurempi ja kun osastoinnissa oli kaksi tuloilma-aukkoa yhden sijaan. Koetilanteen 8 ilmavirran maksimi nopeus ja keskihajonta eroavat normaalia enemmän muista saman sarjan arvoista, joten koetilanteen kohdalla on todennäköisesti tapahtunut jokin virhe ilmavirran nopeuden mittauksessa. Monimuotoisessa osastoinnissa tulo- eli korvausilma-aukkoja kannattaisi tehdä jokaiseen erilliseen huoneeseen ja poistoilma-aukko eli alipaineistaja kannattaisi sijoittaa tilaan, jossa tiedetään olevan eniten tai pölyisintä purettavaa. Jos tuloilma-aukkoja ei pysty tekemään jokaiseen huoneeseen, kannattaa harkita osastoinnin pilkkomista pienempiin osiin, ettei osastointiin syntyisi paikkoja, joissa ilmanvaihto on heikkoa.

5.3 Mittaustulosten luotettavuus

5.3.1 Laboratoriokokeet

Rakennushallin isojen ulko-ovien avaaminen ja sulkeminen vaikutti jonkin verran hallin lämpötilaan, eniten talven kovilla pakkasilla. Hallin ovien avaaminen sekä hallin oma ilmastointi vaikutti todennäköisesti myös osastoinnin ja rakennushallin väliseen paine-

eroon. Useimmat mittaukset kestivät keskimäärin 1-2 tuntia, jotkin mittaukset kestivät yön tai jopa viikonlopun yli. Mittauksien aikana ei tarkkailtu paikan päällä rakennushallin olosuhteita. Mittausdatasta tehdystä paine-ero- käyrästä pystyi näkemään rakennushallin ilmastoinnin vaikutuksen osastoinnin paine-eroon, kun paine-ero- käyrässä tapahtui toistuvasti tiettyyn vuorokaudenaikaan samankaltainen paine-eron muutos. Muutokset olivat maksimissaan suuruudeltaan kolmen Pascalin luokkaa.

Paine-eromittareiden tarkkuus oli $\pm 1 \%$ ja ilmannoepsantureiden tarkkuus oli $\pm 2 \%$ lukemasta. Puolisuuntariippuvaisten ilmannoepsantureiden paikka ja asento poisto- ja tuloilmaputkissa saattoi hieman vaikuttaa ilmavirran nopeuksien arvoihin.

Ilmanjaon tutkimisessa merkkisavukokeilla oli monta tekijää, jotka saattoivat vaikuttaa mittaustuloksiin. Savua laskettiin osastointiin kolmen sekunnin impulsseina painamalla kaukosäätimen nappia käsin kolmen sekunnin ajan. Savun määrä saattoi siis hieman vaihdella johtuen inhimillisestä tarkkuusvirheestä. Rakennushallin olosuhteet ja sää vaikuttivat myös mittaustuloksiin. Testiosastointi sijaitsi seinän vierellä, jonka yläosassa oli koko rakennushallin pituinen ikkuna. Ikkunaa ei pystytty peittämään. Aurinkoisella säällä aurinko paistoi ikkunasta hallin sisälle ja testiosastoinnin katolla olevaan puhaltimeen, josta savun hälvenemistä seurattiin. Auringon valon osuessa savuun, näkyi savu huomattavasti selvemmin ja pidempään kuin pilvisellä säällä. Savutestit koitettiin tehdä kaikki samantyyppisellä, aurinkoisella säällä, mutta joissain tilanteissa pilvi tuli auringon eteen, jolloin savun erottaminen oli hankalampaa. Virheiden vähentämiseksi joka tilanteelle tehtiin kaksi mittausta, joista laskettiin keskiarvo.

5.3.2 Virtauslaskenta

Käytännössä asbestipurkutyömaalla käytettävät kohdepoistojärjestelmät sekä sulikutunnelit vaikuttavat osastoinnin ilmavirtoihin. Tässä työssä on simuloitu vain yksinkertaistettu ilmanjako osastoinnissa ilman lisäpuhaltimia ja -imureita. Ilmavirtaukset ovat tästä syystä vain teoreettisia, suuntaa antavia arvioita. Kohdepoistojärjestelmät todellisuudessa oletettavasti parantavat osastoinnin ilman huuhtelevuutta varsinkin paikoissa, joihin jää helposti ilmataskuja. Teoriassa tiiviissä ideaalimallissa ilmavirrat ovat tasapainotilassa yhtä suuret tulo- ja poistoilma-aukoissa, kun osastointiin ei virtaa vuotoilmaa. Käytännössä osastointiin vuotaa jonkin verran ilmaa epätiivetykskohdista, jolloin poistoilmavirta on hieman suurempi kuin tuloilmavirta.

Virtauslaskennassa tuloilma oli samassa lämpötilassa osastoinnin sisäilman kanssa, joten mallissa ei esiintynyt ali- tai yllämpöisestä tuloilmasta johtuvia konvektiovirtauksia. Osastoinnin sisälle ei myöskään mallinnettu mitään lämmönlähteitä, jotka olisivat aiheuttaneet konvektiovirtauksia. Käytännössä tuloilma ei välttämättä ole saman lämpöistä osastoinnin sisäilman kanssa ja yleensä osastoinnin sisällä on myös joitain lämmönlähteitä kuten esimerkiksi työmiehiä ja työkoneita. Näistä käytännössä ilmenevistä ilman lämpötilaeroista syntyy konvektiovirtauksia, jotka vaikuttavat osastoinnin sisällä ilman

liikkeisiin ja ilmanjakoon. Lämpötilaerot olisivat todennäköisesti vaikuttaneet simuloinnissa eri ilmanjakotapojen vertailuihin ja tuloksiin.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA TULOSTEN HYÖDYNTÄMINEN

Osastointimenetelmän toimivuuteen liittyen yhtenä tavoitteena oli selvittää, miten osastointi kannattaa rakentaa. Osastoinnin rakentamiseen liittyviä ohjeita löytyi muun muassa menetelmäkuvauksesta Ratu 82-0347 Asbestia sisältävien rakenteiden purku, jossa kerrottiin asbestipurkutyön osastointimenetelmästä vaiheittain. Laboratoriossa testattiin muovista ja rimoista tehtyä seinää sekä levyrakenteista seinää. Muoviseinää testattiin myös oven kanssa. Osastoivien seinien rakenteiden tiiveyksissä ei ilmennyt merkittäviä eroja vuotoilmavirtojen perusteella. Kaikilla testatuilla osastoivilla seinärakenteilla pystyttiin saavuttamaan hyvä tiiveystaso. Laboratoriossa testattaessa muovista tehtyä osastoivaa seinää havaittiin varmemmaksi tavaksi kiinnittää muovi rungon ulkopuolelle, jolloin teipit puristuvat alipaineen vaikutuksesta osastointiin päin. Jos muovikalvo halutaan asentaa rungon sisäpuolelle, voidaan kalvon päälle kuitenkin kiinnittää listat, jotka varmistavat muovikalvon pysymisen paikallaan. Muovikalvo on hyvä asettaa runkotolppien päälle mahdollisimman suorassa, ettei saumoihin tule ryppyjä. Ryppejen kohdalla teippi irtoaa helpommin, jolloin on riski epätiiveyskohdan syntymiselle. Myös alustan laatu ja puhtaus vaikuttavat teipin tarttumiseen ja liitoksen tiiveyteen. Tiivistysteipin- tai massan tartunnan takaamiseksi on hyvä käyttää kullekin rakennusmateriaalille sopivaa tuotetta. Jos osastoinnissa käytetään hyväksi olemassa olevia rakenteita, tulee myös niiden tiiveys tarkistaa ja tiivistä mahdolliset epätiiveyskohdat.

Asbestipurkutyön osastointimenetelmää on Suomessa määräystasolla käsitelty melko suppeasti. Valtioneuvoston asetuksessa asbestityön turvallisuudesta (VNa 798/2015) on määrätty osastointimenetelmästä lähinnä vain osastoinnin ja ympäristön välisestä paine-erosta ja kulkuyhteydestä osastointiin. Laboratoriossa ja virtauslaskennalla testattiin ilmanvaihdon ja ilmanjakotavan vaikutusta osastointimenetelmän toimivuuteen. Testien tuloksien perusteella voidaan todeta, ettei pelkällä paine-eron seurannalla voida varmistaa osastoinnin toimivuutta. Tiiviissä osastoinnissa määrätty alipaine voidaan saavuttaa pienelläkin alipaineistajan tilavuusvirralla, mutta ilmanvaihtuvuus voi jäädä hyvin pieneksi, jolloin epäpuhtaudet eivät huuhtoudu tehokkaasti pois osastoinnista. Erityisesti monimuotoisissa osastoinneissa pitäisi kiinnittää huomioita ilmanvaihtoon ja ilmanjakotapaan osastoinnin alipaineistuksen lisäksi. Health and Safety Executive:n (Pocock *et al.* 2013) julkaisussa on tutkittu myös ilmanvaihdon vaikutusta osastointien toimivuuteen ja tulokset olivat samansuuntaisia.

Osastointeja koskevat periaatteet soveltuvat myös muihin osastointia vaativiin töihin. Asbestipurkutyön lisäksi osastointeja käytetään muun muassa kosteus- ja mikrobivauriopurkutöissä sekä muissa pölyä tuottavissa korjaustoimissa käytössä olevissa rakennuksissa.

7. YHTEENVETO

Laboratoriossa tehtyjen testien perusteella voidaan merkkisavua suositella osastoivien rakenteiden tiiveyden testaamiseen. Merkkisavu on edullinen ja helppo tapa havaita osastoivissa rakennusosissa olevat ilmavuodot. Merkkisavulla voidaan myös visualisoida ilman liikkeitä osastoinnin sisällä ja nähdä vaihtuuko ilma alueella, jossa tullaan suorittamaan pölyä tuottavaa purkutyötä. Laboratoriossa tehtyjen vuototarkastelujen perusteella osastoivan rakenteen materiaalilla ei ollut huomattavaa vaikutusta osastoinnin tiiveyteen. Kaikilla testatuilla vaihtoehdoilla oli saavutettavissa hyvä tiiveystaso.

Nykyisin asbestipurkutyön osastointien suunnittelussa keskitytään lähinnä riittävän alipaineen saavuttamiseen. Pelkkä paine-eron seuranta ei kuitenkaan riitä varmistamaan osastoinnin toimivuutta. Osastoinnin mitoitus olisi hyvä tehdä niin sanotusti ilmanvaihto edellä laskemalla ensin tilavuuden ja halutun ilmanvaihtokertoimen mukaan alipaineistajan tarvittava tilavuusvirta ja lisäämällä osastointiin riittävä määrä korvausilma-aukkoja, niin että alipaineen arvo ja ilmanvaihto saadaan järkevälle tasolle.

Osastoinnin ilmanvaihtokertoimen lisäksi on tärkeää ottaa huomioon ilmanjakotapa. Hyvä ilmanvaihto- ja jako laimentaa työssä vapautuvia epäpuhtauksia nopeasti ja tehokkaasti. Osastoinnin ilmanjaon suunnitteluun vaikuttaa olennaisesti osastoinnin koko ja muoto sekä asbestipitoisen materiaalin purkutapa ja sijainti osastoinnin sisällä. Kokeissa havaittiin tuloilman hallitsevan osastoinnin ilmavirtoja. Tuloilman vaikutusalue osastoinnissa ylettyi huomattavasti pidemmälle kuin poistoilman vaikutusalue. Sen vuoksi tuloilma-aukon sijoittamista kovin lähelle epäpuhtauslähdettä kannattaa välttää, jottei epäpuhtaudet leviä tuloilman mukana ympäri osastointia. Poistoilma-aukon eli imun vaikutusetäisyys oli puolestaan lyhyt ja sen vaikutus osastoinnin ilmanjakoon oli vähäisempi, mutta poistoilma-aukon paikalla oli kuitenkin vaikutusta ilman liikkeisiin tiloissa, joissa oli useampia huoneita tai muita esteitä ilman vapaalle liikkeelle. Poistoilma-aukko eli alipaineistaja kannattaa sijoittaa epäpuhtauslähteen läheisyyteen, jotta epäpuhtaudet poistuisivat osastosta mahdollisimman nopeasti. Tuloilma-aukot kannattaa sijoittaa mahdollisimman etäälle poistoilma-aukosta, jotta ilma vaihtuisi koko osastoinnissa. Kannatta välttää tilanteita, joissa tulo- ja poistoilma-aukot sijaitsevat lähellä toisiaan. Voimakkaamman tuloilman ilmavirta voi estää epäpuhtauksien pääsyn alipaineistajaan, vaikka suunniteltu ilmanvaihtokerroin toteutuisi. Osastoinnin sisäinen este kuten esimerkiksi väliseinä saattaa tehostaa ilman vaihtumista, jos se estää epäpuhtauksien leviämistä tai oikosulkuvirtausten syntymistä. Erillisen ilmakierron käyttäminen osastoinnissa voi joko parantaa tai heikentää ilmanvaihtuvuutta riippuen sijoittelusta.

Projektin kaikkien osapuolten tutkimustulokset löytyvät Työterveyslaitoksen julkaisusta Asbestipurkutyön turvallisuuden ja siihen liittyvien testaus- ja mittaustoimintojen kehittäminen- AsbTest (Linnainmaa *et al.* 2019).

LÄHTEET

- Bohl, W. (1988). Teknillinen virtausoppi. Sonator, 269 s.
- Ekman, A. (2011). Toimiva asbestipurku. Työturvallisuuskeskus TTK, rakennus- ja putkijohtoalan työalatoimikunta, 33 s + liit. 9 s.
- Eurofins Expert Services Oy, Henkilösertifiointi (2018). [Viitattu 12.3.2019] Saatavissa: <https://www.rakentamisesertifikaatti.fi/>
- Euroopan johtavien työsuojelutarkastajien komitea (SLIC) (2006). Hyvien toimintatapojen käytännön opas asbestiin liittyvien riskien ehkäisemiseksi tai minimoimiseksi työssä, jossa esiintyy (tai saattaa esiintyä) asbestia: työnantajille, työntekijöille ja työsuojelutarkastajille. Euroopan komissio, 128 s.
- Hengityслиitto, Asbestisairaudet. [Viitattu 17.4.2019] Saatavissa: <https://www.hengityслиitto.fi/fi/hengityssairaudet/asbestisairaudet>
- Kokkonen, A., Linnainmaa, M., Koski, H., Kanerva, T., Laamanen, J., Lappalainen, V., Merivirta, M-L., Oksa, P., Piirainen, J., Rautiala, S., Säämänen, A., Pasanen, P. (2013). Pölynhallinta korjausrakentamisessa. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta. Kopiojyvä Oy, 142 s + liit. 201 s.
- Koski, H., Pasanen, P., Linnainmaa, M. (2013). Ohjeita korjausrakentamisen pölyntorjuntaan. VTT, Itä-Suomen yliopisto ja Työterveyslaitos.
- Laki eräistä asbestipurkutöitä koskevista vaatimuksista 684/2015
- Linnainmaa, M., Kokkonen, A., Kulmala, I., Kähkönen, H., Mäkelä, E., Annala, P., Kemppainen, N., Kanerva, T., Nuora, T., Säämänen, A., Häkkinen, E., Pasanen, P. (2019). Asbestipurkutöiden turvallisuuden ja siihen liittyvien testaus- ja mittaus-toimintojen kehittäminen- AsbTest. Työterveyslaitos. PunaMusta Oy.
- Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirasto, Työsuojelun vastuualue (2015). Tiedote yrityksille: Asbestilainsäädäntö muuttuu vuoden 2016 alusta. Saatavissa: <https://ek.fi/wp-content/uploads/Asbestilainsaadanto-muuttuu-tiedote-yrityksille-11.11..pdf>
- Pocock, D., Bennett, S., Saunders, J. (2013). Ventilation of enclosures for removal of asbestos containing materials. Health and Safety Executive, HSE.
- Rakennusalan koordinaatioryhmä (2017). Ohje asbestipurkutöitä koskevan lain soveltamiseksi.

Rakennusalan koordinaatioryhmä (2017). Ohje asbestityön turvallisuutta koskevan asetuksen soveltamiseksi.

Rakennusteollisuus RT ry ja Rakennustietosäätiö RTS (2006). Ratu 09-3038 2006 Asbestityökoneet. Rakennustieto Oy.

Rakennustieto säätiö (1995). RT 56-10591 Ilmanvaihto ja ilmastointijärjestelmät.

Rakennustieto säätiö RTS (2004). RT 56-10831 Asuinrakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän peruskorjaus ja –parannus.

Rakennustieto säätiö RTS (2016). RT 18-11248 Asbestikartoitukseen perustuva purkutyön suunnittelu ja toimenpiteet kiinteistössä.

Sandberg, E., Heinonen, J. (2014). Ilmastointilaitoksen mitoitus, Ilmastointitekniikka osa 2. Talotekniikka- Julkaisut Oy, 647 s.

Seppälä, A. (2016). Asbesti- ja haitta-ainesaneerauksen käsikirja. ASTQ Supply House Oy, 91 s + liit 12 s.

Seppänen, O. (1988). Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. LVI- kustannus Oy, 351 s.

Säämänen, A., Riipinen, H., Kulmala, I., Welling, I. (2004). Pölyntorjunta. VTT automaatio, Tampereen aluetyöterveyslaitos ja Lappeenrannan aluetyöterveyslaitos.

Talonrakennusteollisuus ry ja Rakennustietosäätiö RTS (2009). Ratu 82-0347 Asbestia sisältävien rakenteiden purku. Rakennustieto Oy.

Talonrakennusteollisuus ry ja Rakennustietosäätiö RTS (2011). Ratu 84-0386 Suojaus. Rakennustieto Oy.

Työsuojeluhallinto, Työolot, Rakennusala, Asbesti [Viitattu 20.4.2019]. Saatavissa: <http://www.tyosuojelu.fi/tyoolot/rakennusala/asbesti>

Valtioneuvoston asetus asbestityön turvallisuudesta 798/2015

Ympäristöministeriö (2012). D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, määräykset ja ohjeet.

LIITE A: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 1

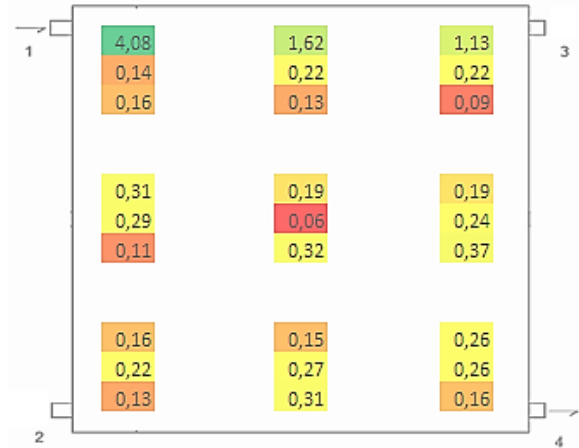
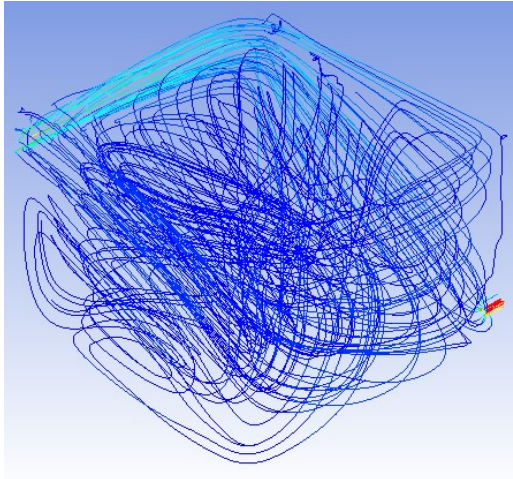
Suluissa kerrotaan tulo- ja poistoilma-aukkojen (T ja P) paikat paikan numerolla sekä ilmaisulla ”ylä” tai ”ala” sen mukaan onko ilma-aukko seinän ylä- vai alaosassa.

Ilmavirran nopeuden asteikko on 0 – 5 m/s.

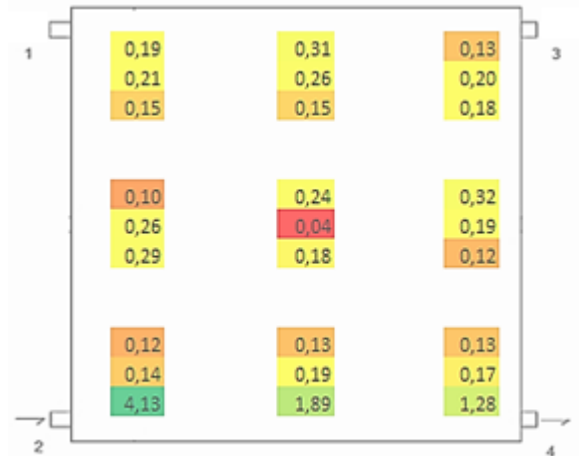
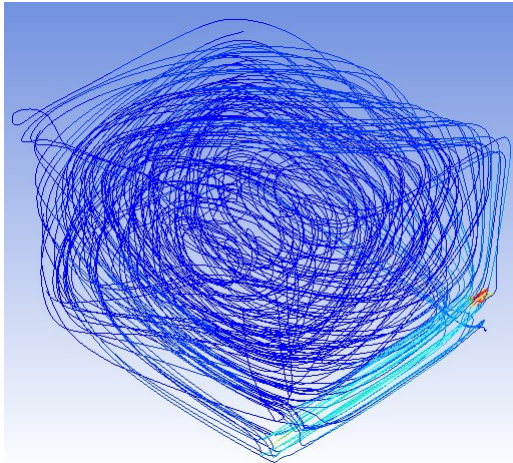


Kuvattu paikan 2 ylänurkasta.

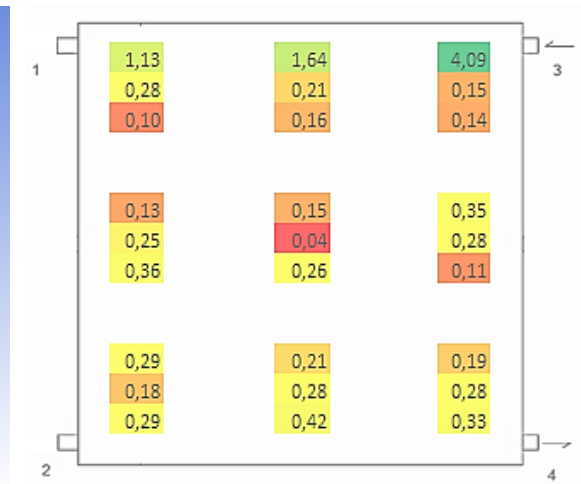
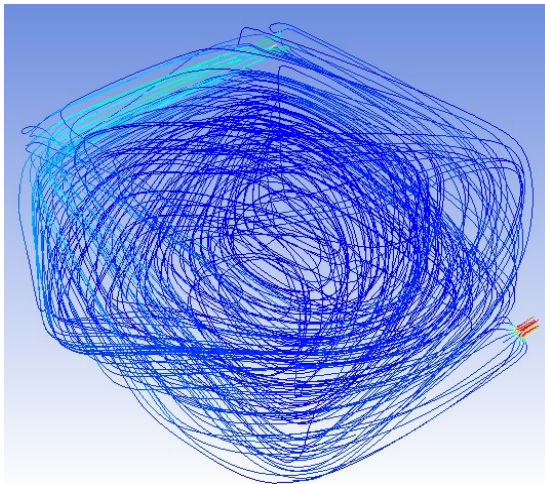
Tilanne 1 (T:1 ylä, P:4 ala)



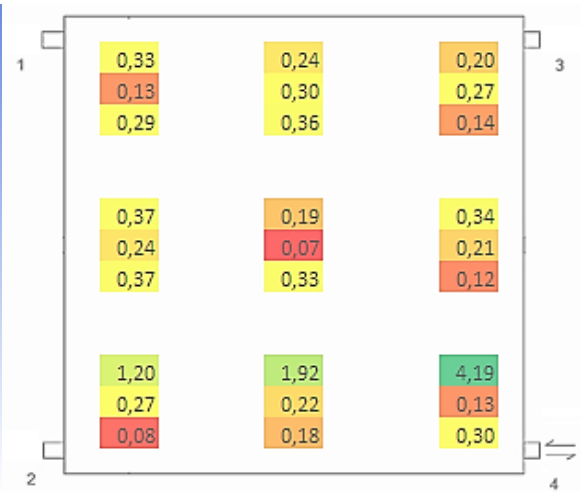
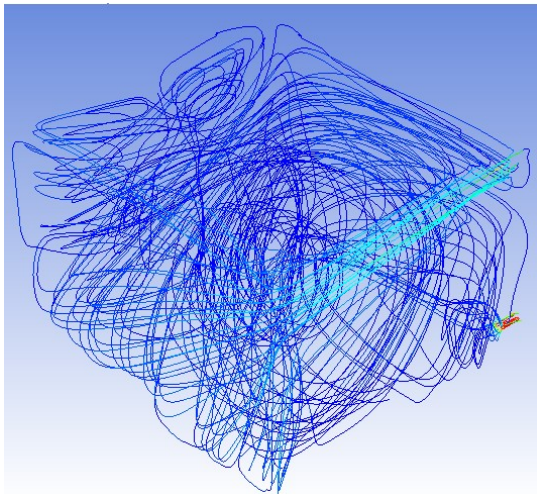
Tilanne 2 (T:2 ala, P:4 ala)



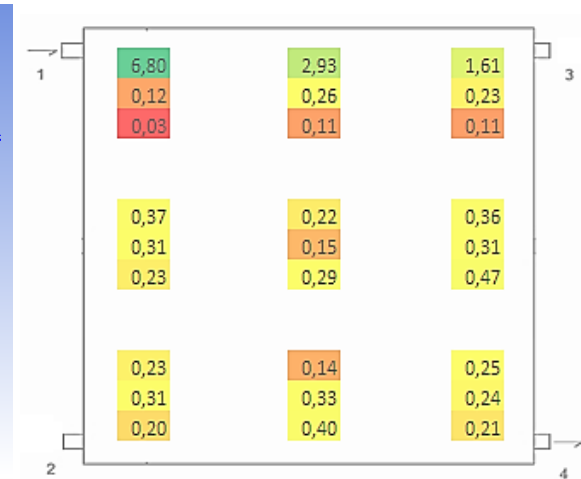
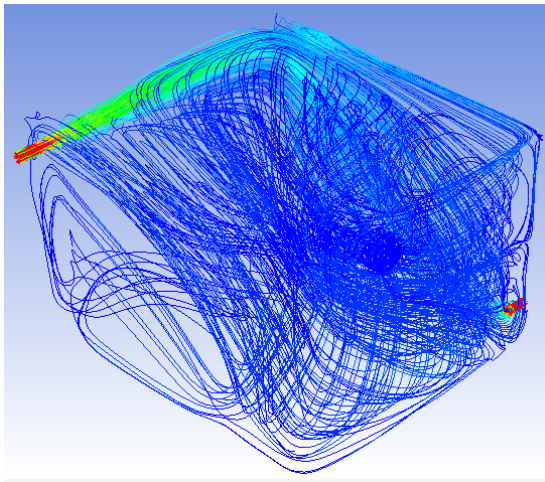
Tilanne 3 (T:3 ylä, P:4 ala)



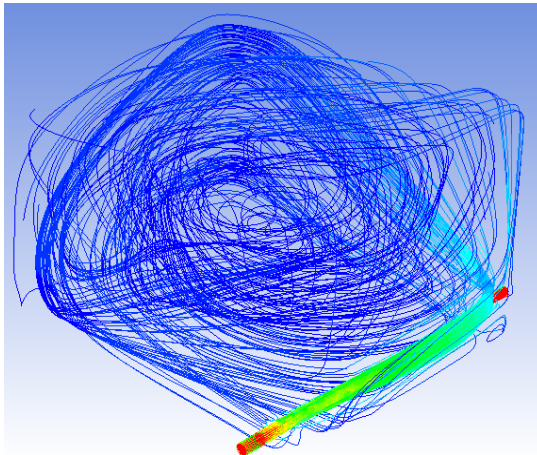
Tilanne 4 (T:4 ylä, P:4 ala)



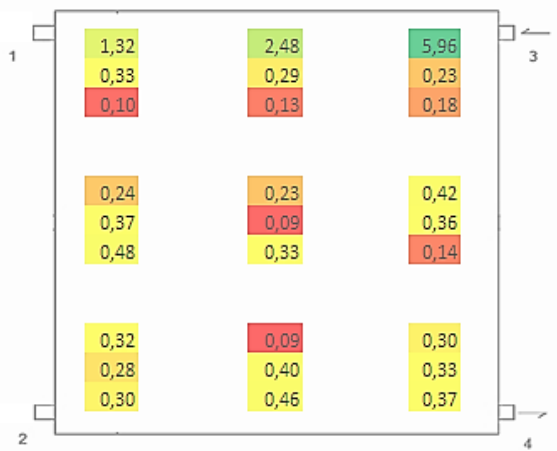
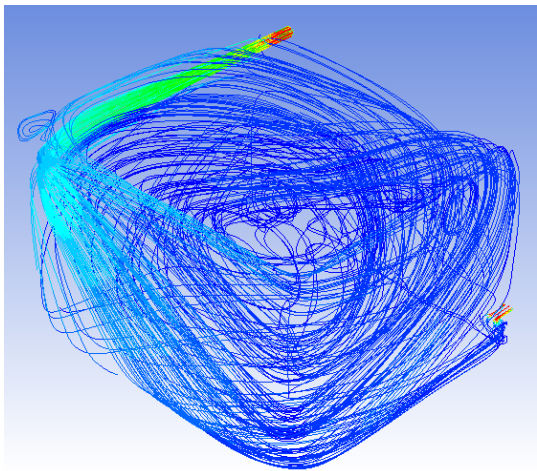
Tilanne 5 (T:1 ylä, P:4 ala)



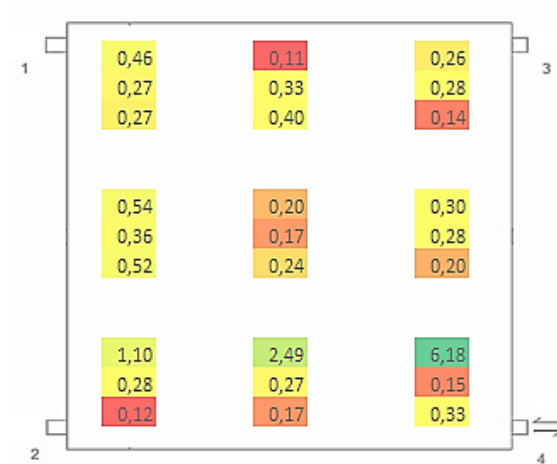
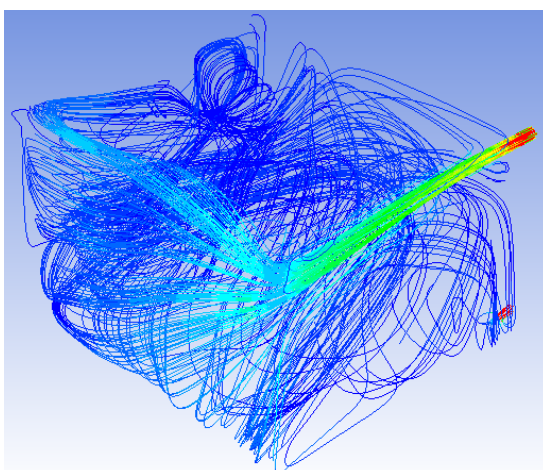
Tilanne 6 (T:2 ala, P:4 ala)



Tilanne 7 (T:3 ylä, P:4 ala)



Tilanne 8 (T:4 ylä, P:4 ala)



LIITE B: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 2

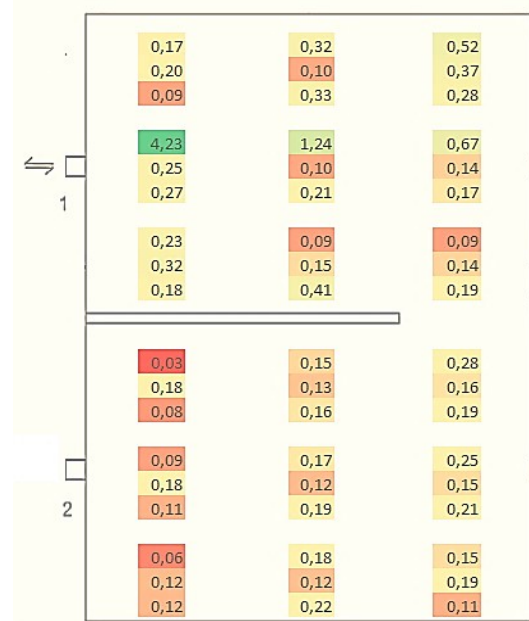
Suluissa kerrotaan tulo- ja poistoilma-aukkojen (T ja P) paikat paikan numerolla sekä ilmaisulla ”ylä” tai ”ala” sen mukaan onko ilma-aukko seinän ylä- vai alaosassa.

Ilmavirran nopeuden asteikko on 0 – 5 m/s.

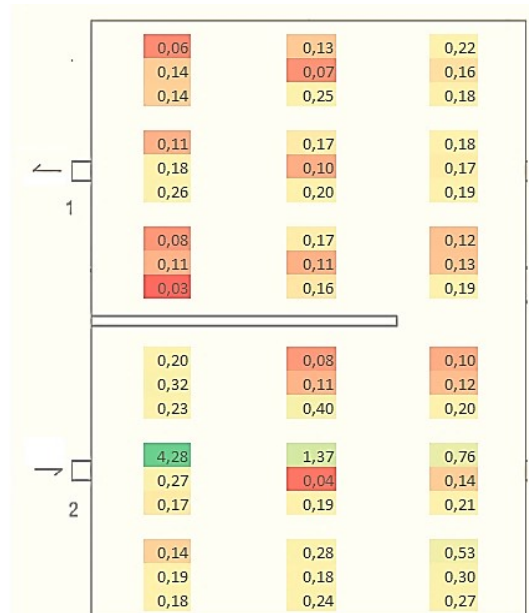
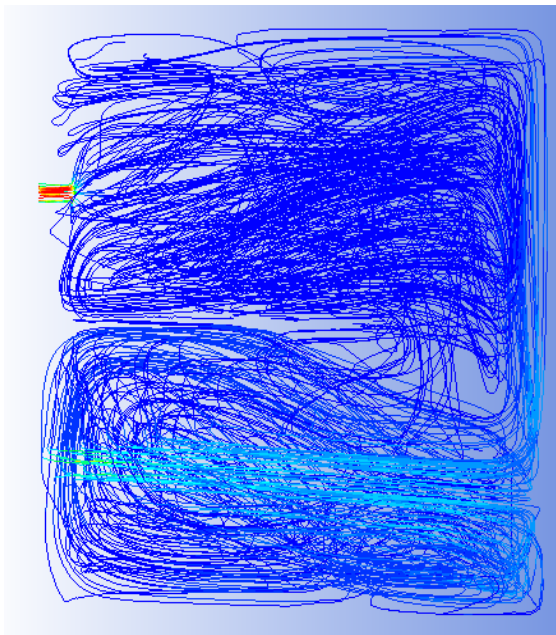


Kuvattu päältä.

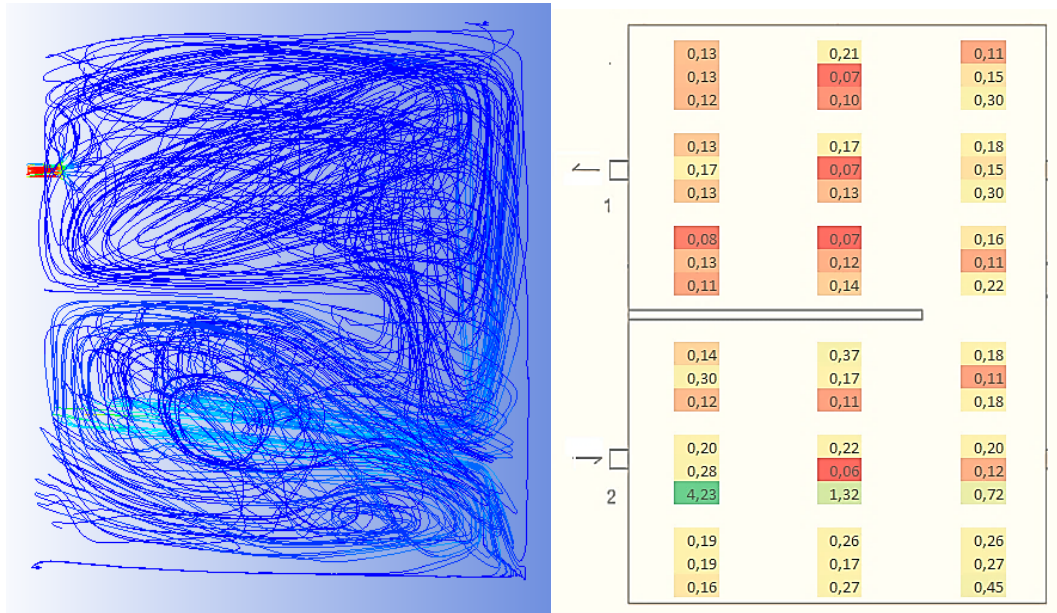
Tilanne 1 (T: 1 ylä, P:1 ala)



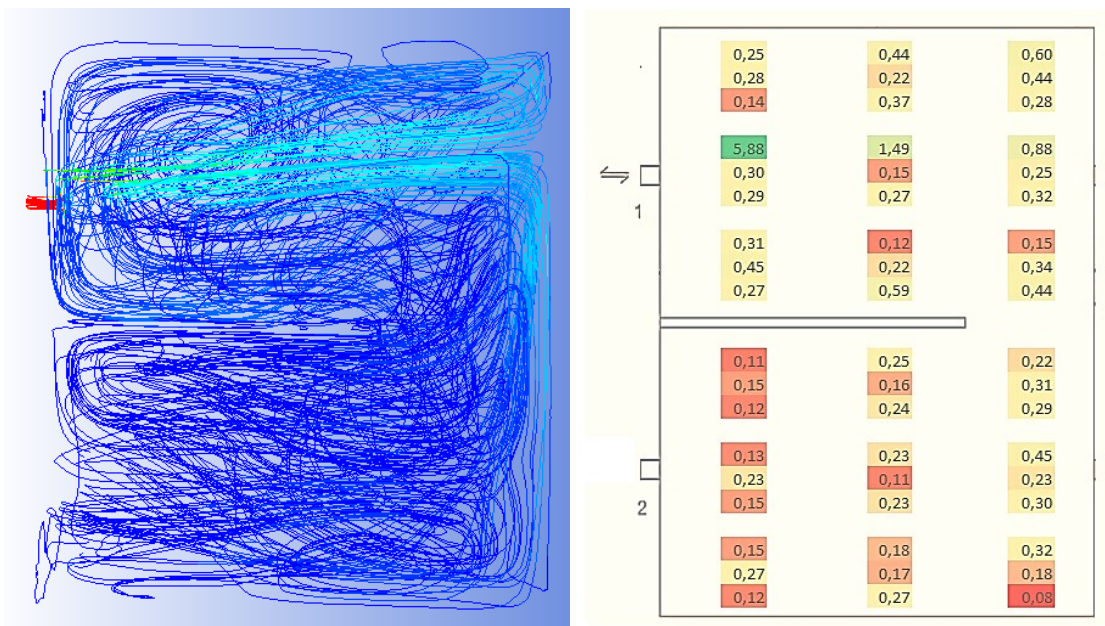
Tilanne 2 (T:2 ylä, P:1 ala)



Tilanne 3 (T:2 ala, P: 1 ala)



Tilanne 4 (T: 1 ylä, P: 1 ala)



Tilanne 5 (T:2 ylä, P: 1 ala)



	0,15	0,18	0,34
	0,24	0,17	0,17
	0,13	0,28	0,26
← 1	0,13	0,20	0,33
	0,21	0,07	0,20
	0,26	0,22	0,23
	0,08	0,21	0,16
	0,13	0,15	0,22
	0,04	0,19	0,21
→ 2	0,25	0,14	0,11
	0,35	0,23	0,21
	0,14	0,45	0,25
	6,06	1,72	0,80
	0,33	0,09	0,15
	0,23	0,22	0,24
	0,18	0,32	0,54
	0,22	0,25	0,26
	0,18	0,29	0,29


Tilanne 6 (T: 2 ala, P: 1 ala)



	0,15	0,25	0,13
	0,14	0,16	0,19
	0,15	0,15	0,31
← 1	0,17	0,21	0,21
	0,22	0,11	0,21
	0,12	0,15	0,18
	0,12	0,08	0,20
	0,17	0,13	0,17
	0,14	0,17	0,32
→ 2	0,20	0,48	0,26
	0,39	0,22	0,18
	0,28	0,14	0,11
	0,25	0,31	0,27
	0,37	0,10	0,16
	5,67	1,40	0,94
	0,17	0,38	0,34
	0,21	0,20	0,31
	0,22	0,37	0,61

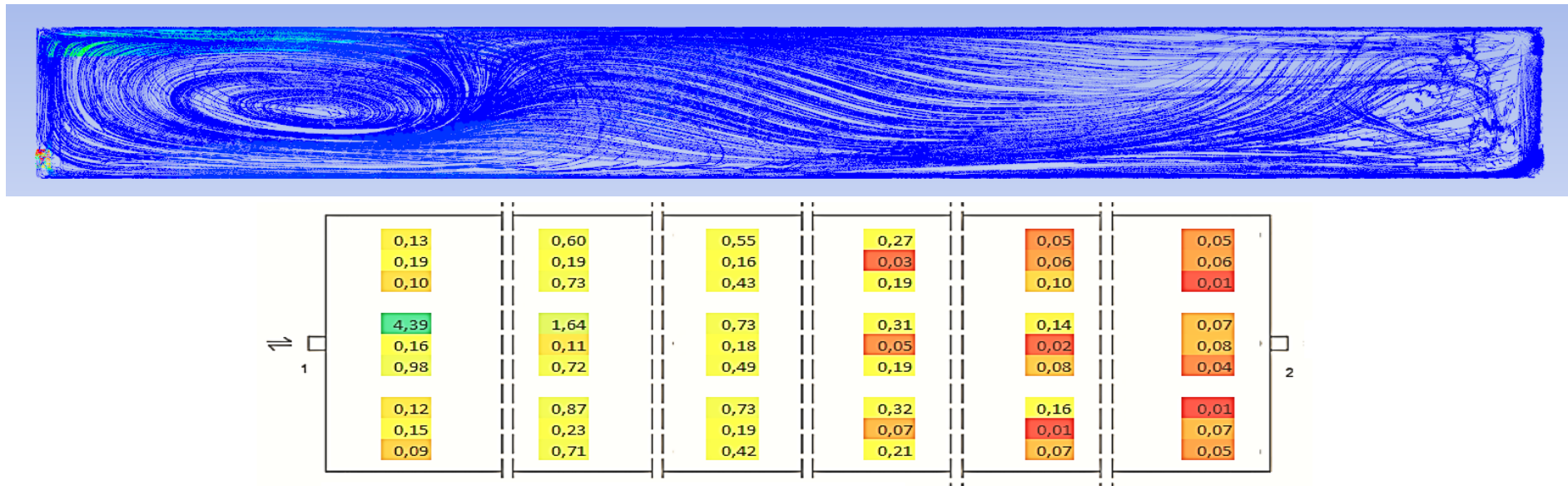
LIITE C: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 3

Suluissa kerrotaan tulo- ja poistoilma-aukkojen (T ja P) paikat paikan numerolla sekä ilmaisulla ”ylä” tai ”ala” sen mukaan onko ilma-aukko seinän ylä- vai alaosassa.

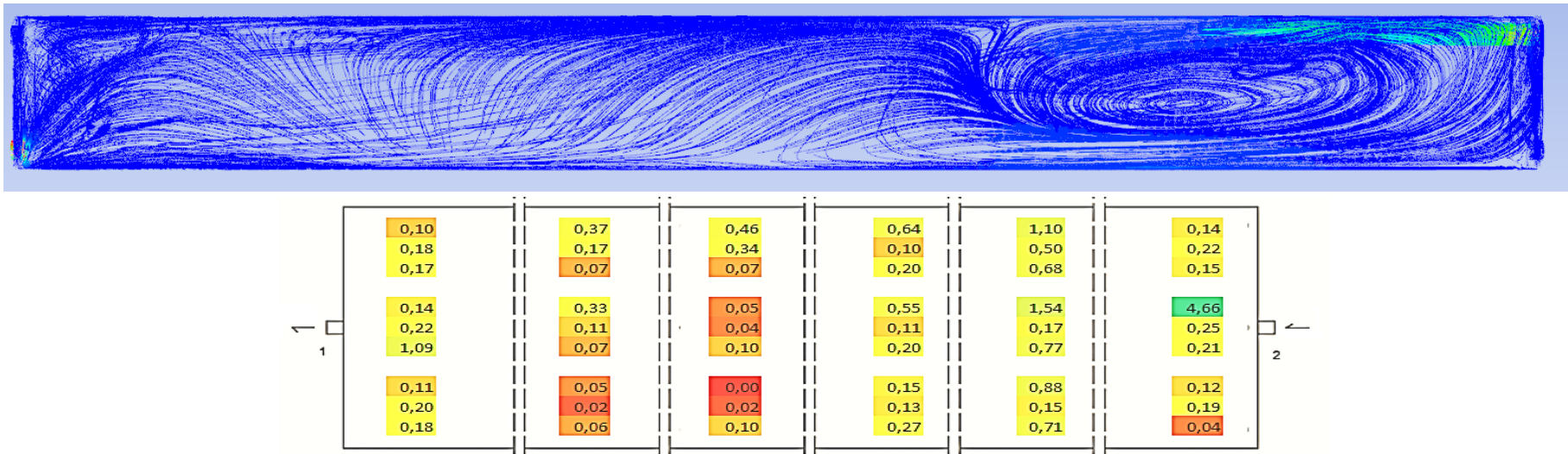
Ilmavirran nopeuden asteikko on 0 – 5 m/s. 

Kuvattu sivulta.

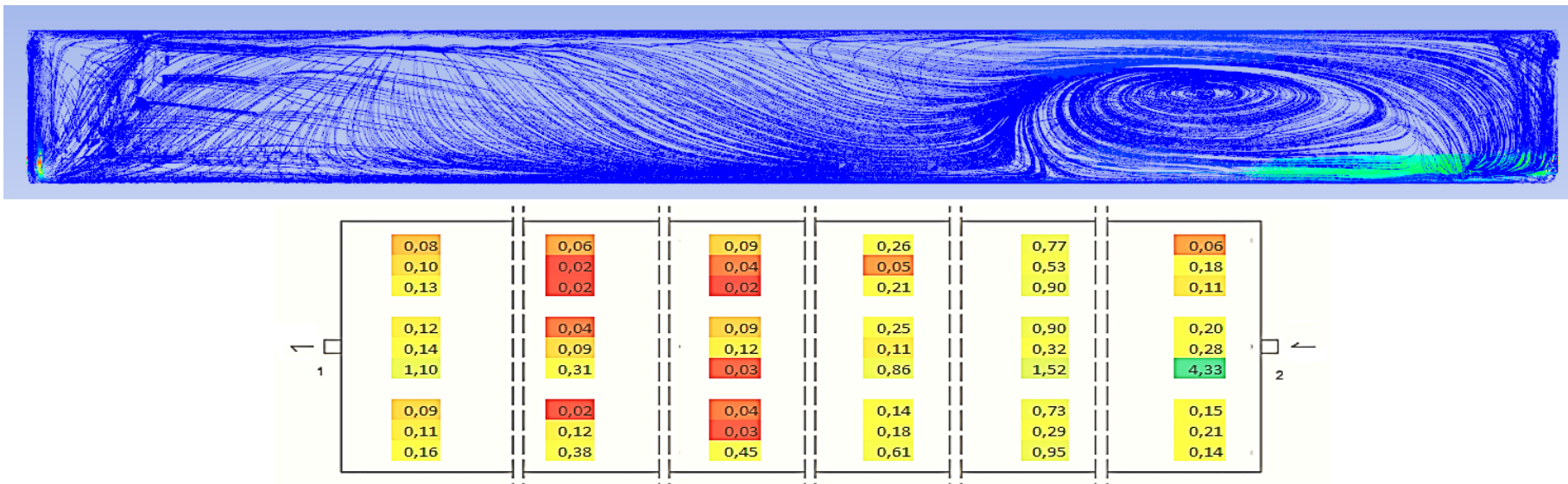
Tilanne 1 (T:1 ylä, P:1 ala)



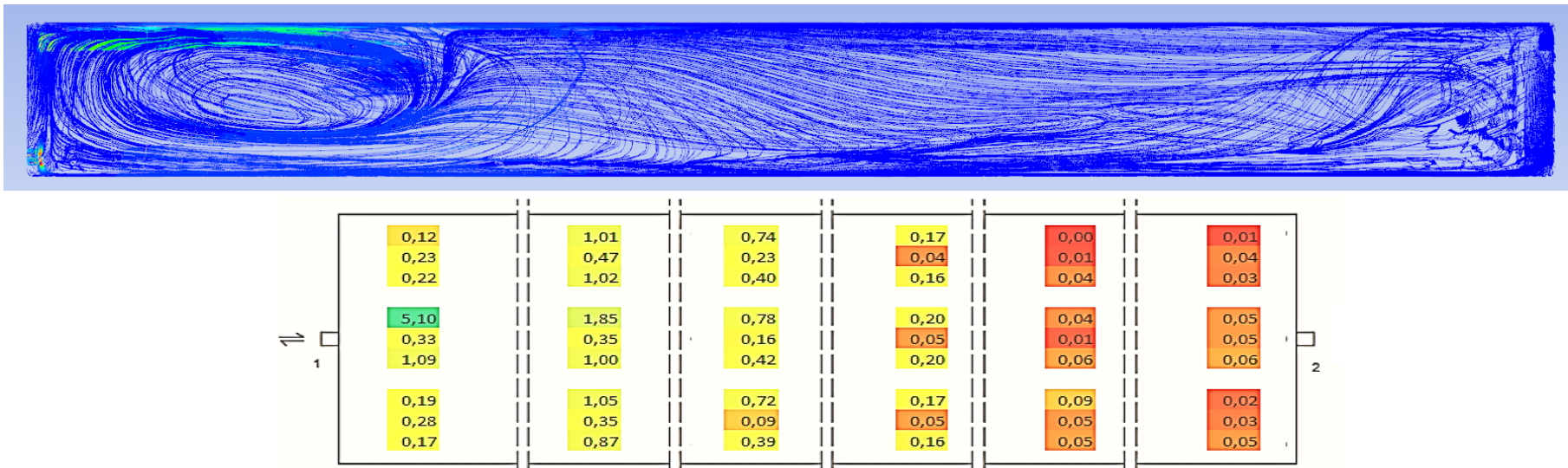
Tilanne 2 (T:2 ylä, P: 1 ala)



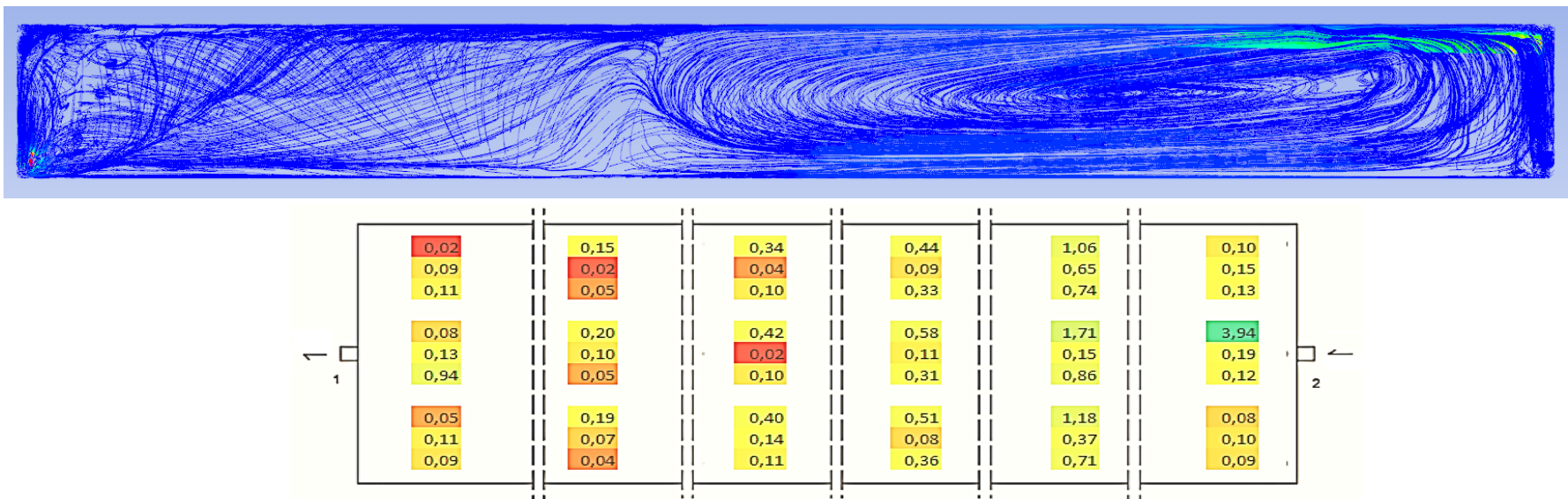
Tilanne 3 (T:2 ala, P:1 ala)



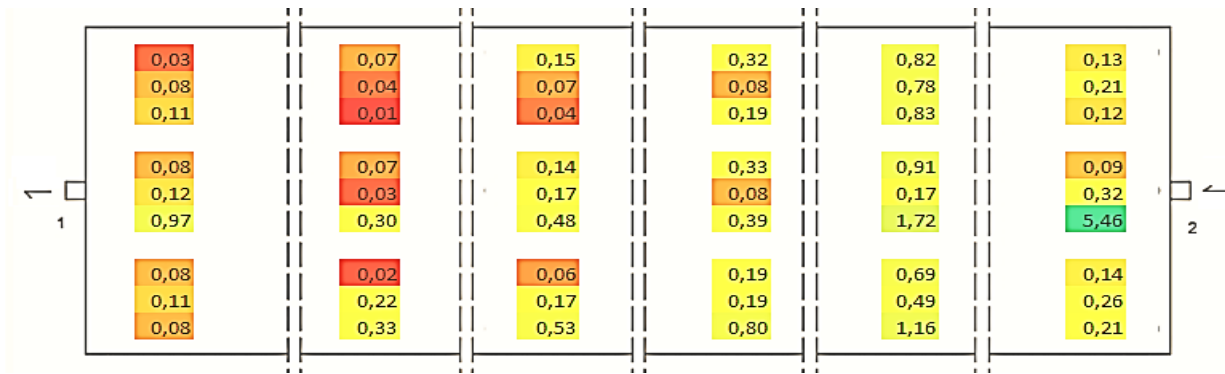
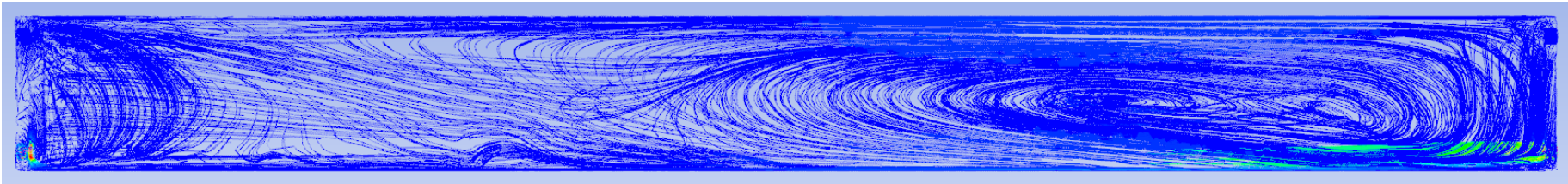
Tilanne 4 (T: 1 ylä, P:1 ala)



Tilanne 5 (T:2 ylä, P:1 ala)



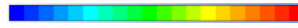
Tilanne 6 (T:2 ala, P:1 ala)



LIITE D: VIRTAUSLASKENNAN TULOKSIA, OSASTOINTI 4

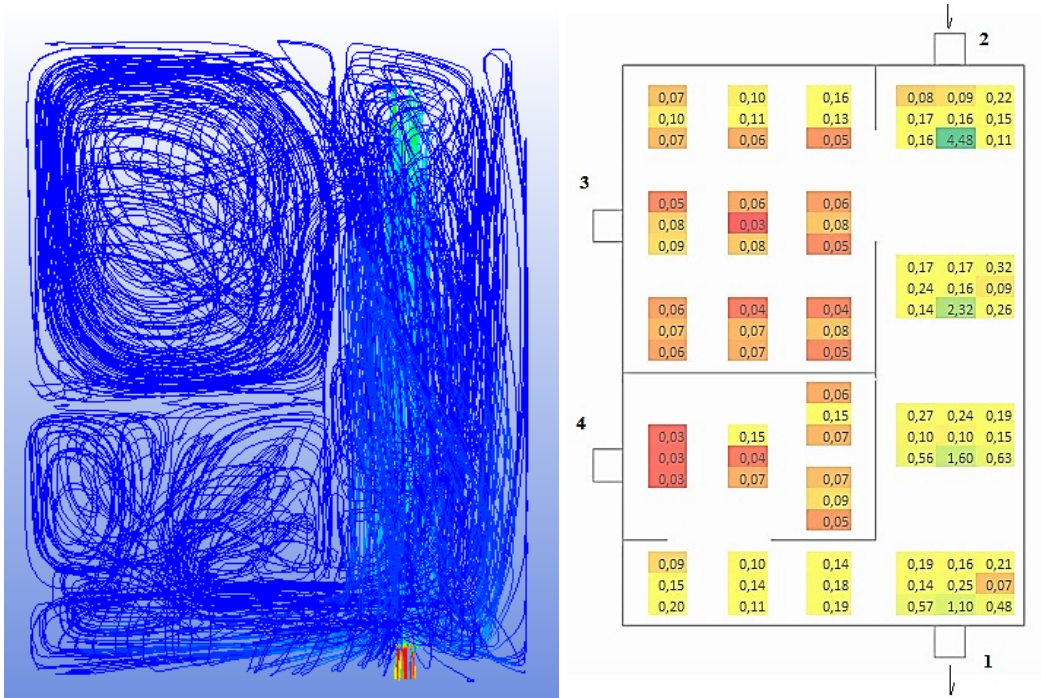
Suluissa kerrotaan tulo- ja poistoilma-aukkojen (T ja P) paikat paikan numerolla sekä ilmaisulla ”ylä” tai ”ala” sen mukaan onko ilma-aukko seinän ylä- vai alaosassa.

Ilmavirran nopeuden asteikko on 0 – 5 m/s.

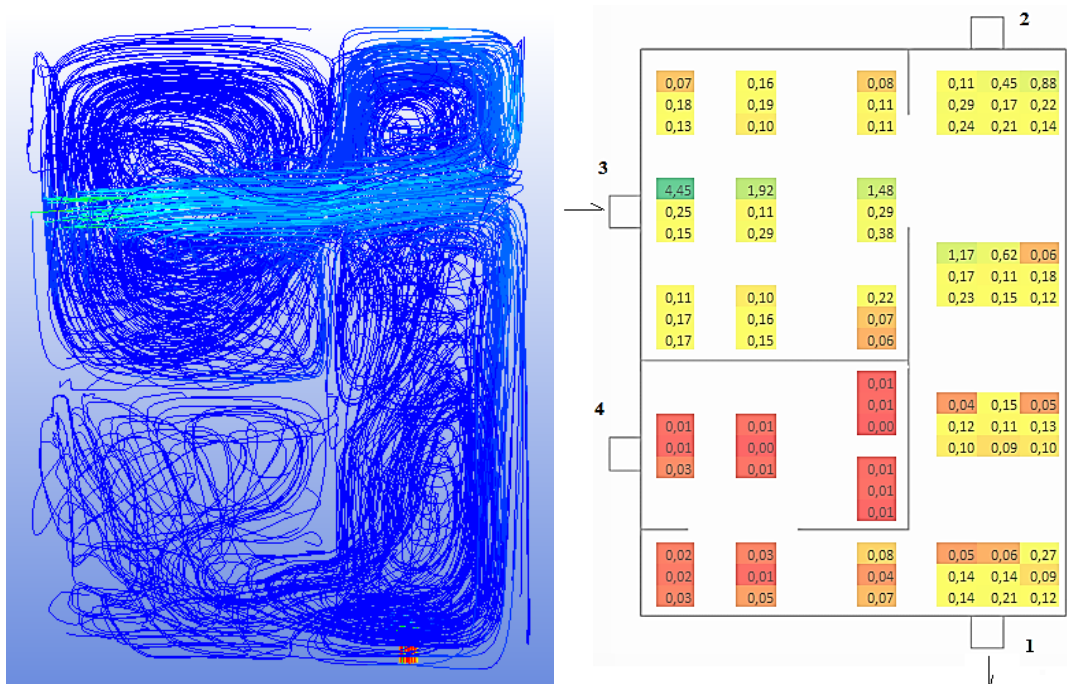


Kuvattu päältä.

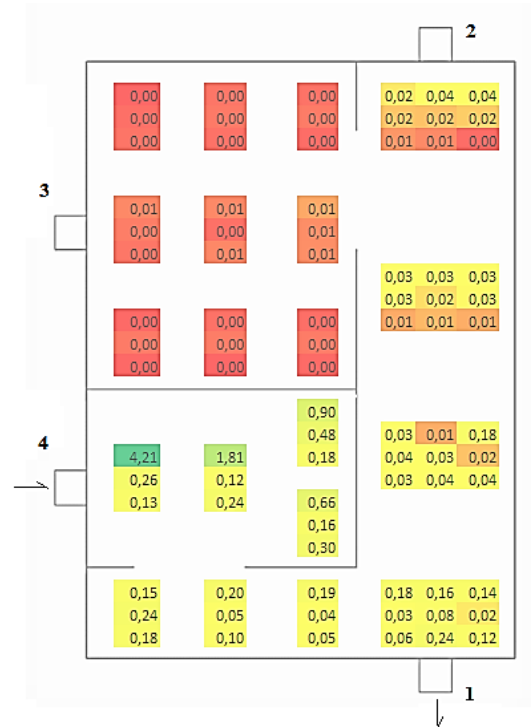
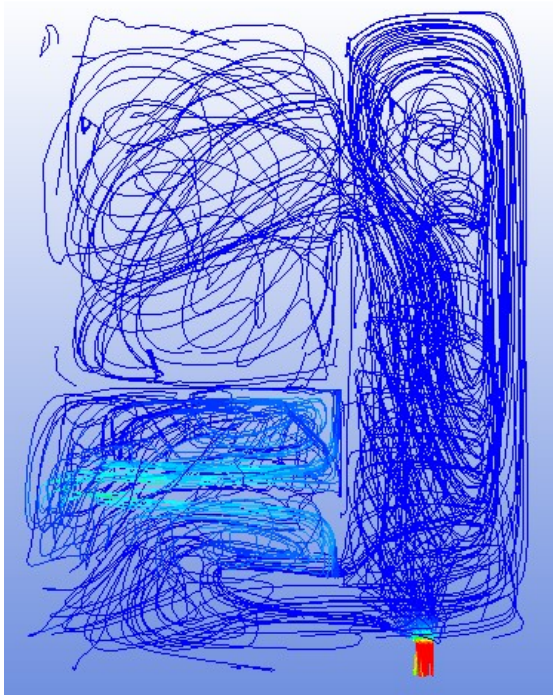
Tilanne 1 (T:2 ala, P:1 ala)



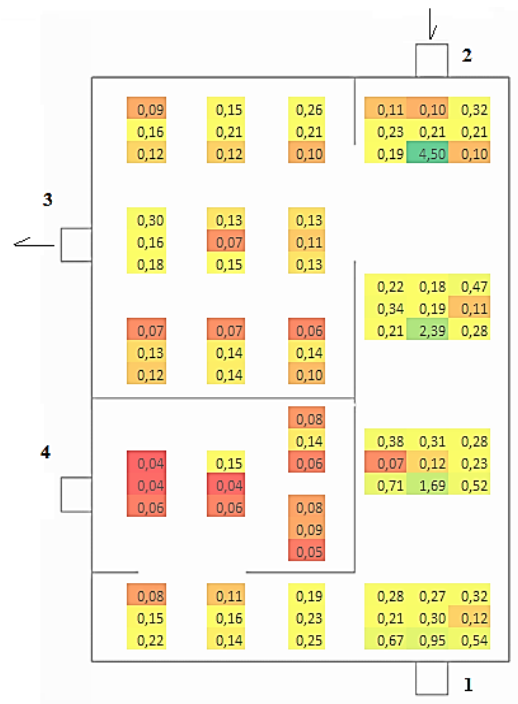
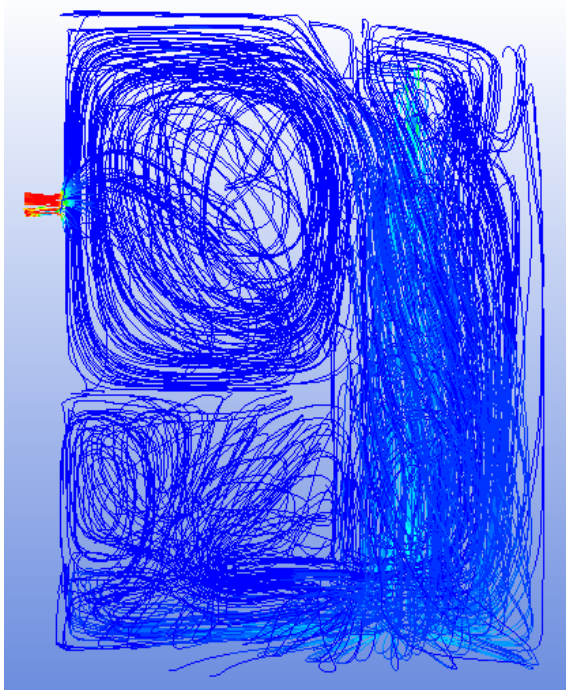
Tilanne 2 (T:3 ylä, P:1 ala)



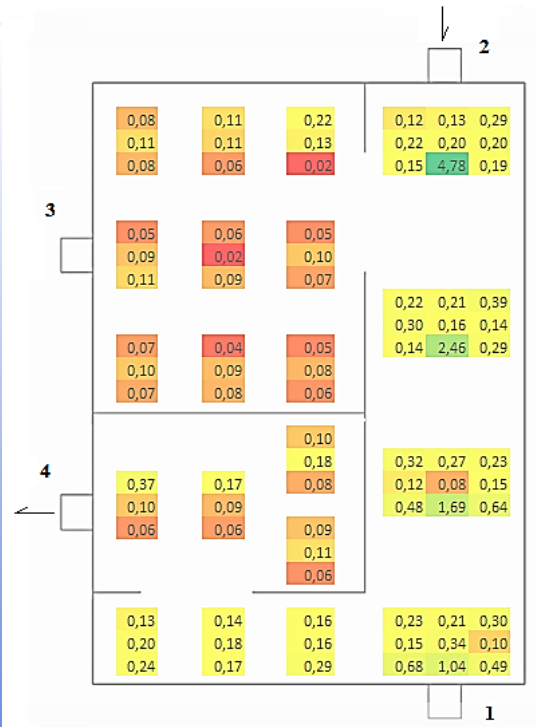
Tilanne 3 (T:4 ylä, P:1 ala)



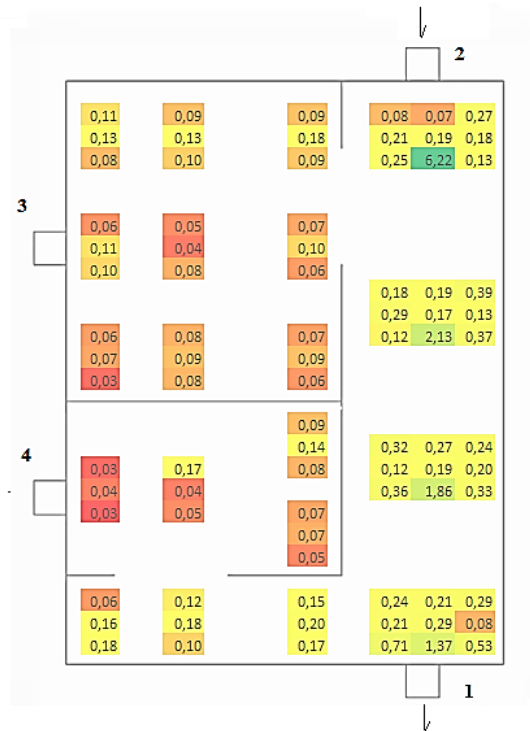
Tilanne 4 (T:2 ala, P:3 ylä)



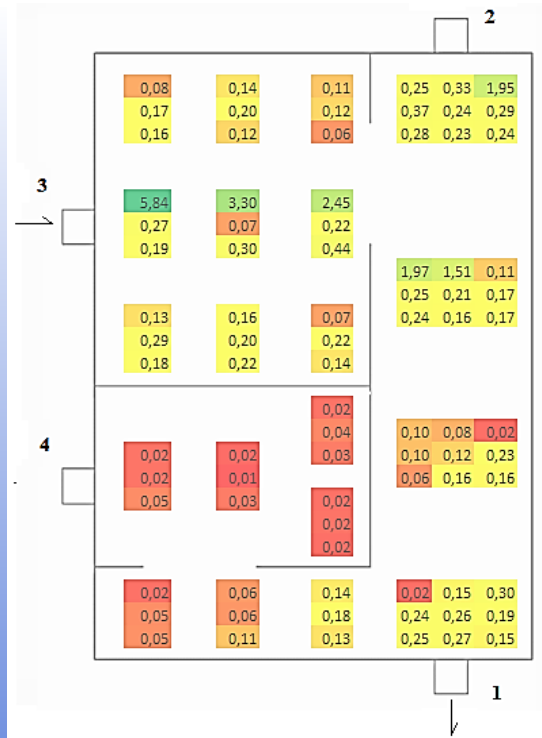
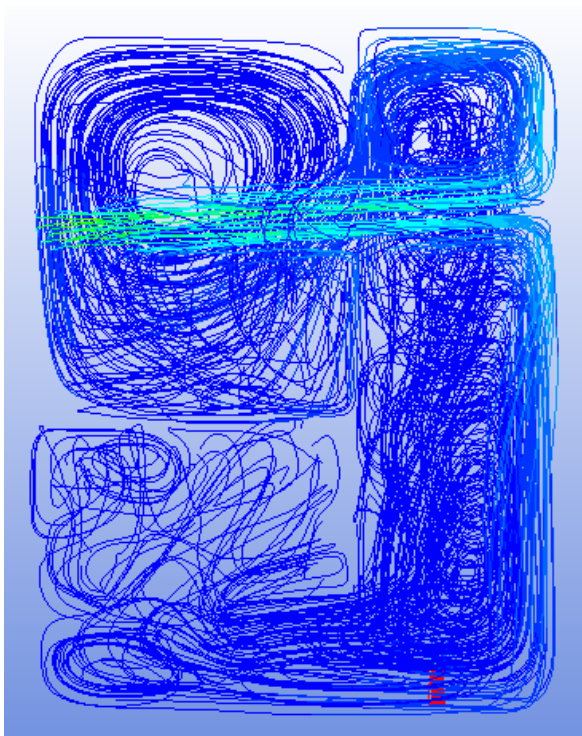
Tilanne 5 (T:2 ala, P:4 ylä)



Tilanne 6 (T:2 ala, P:1 ala)



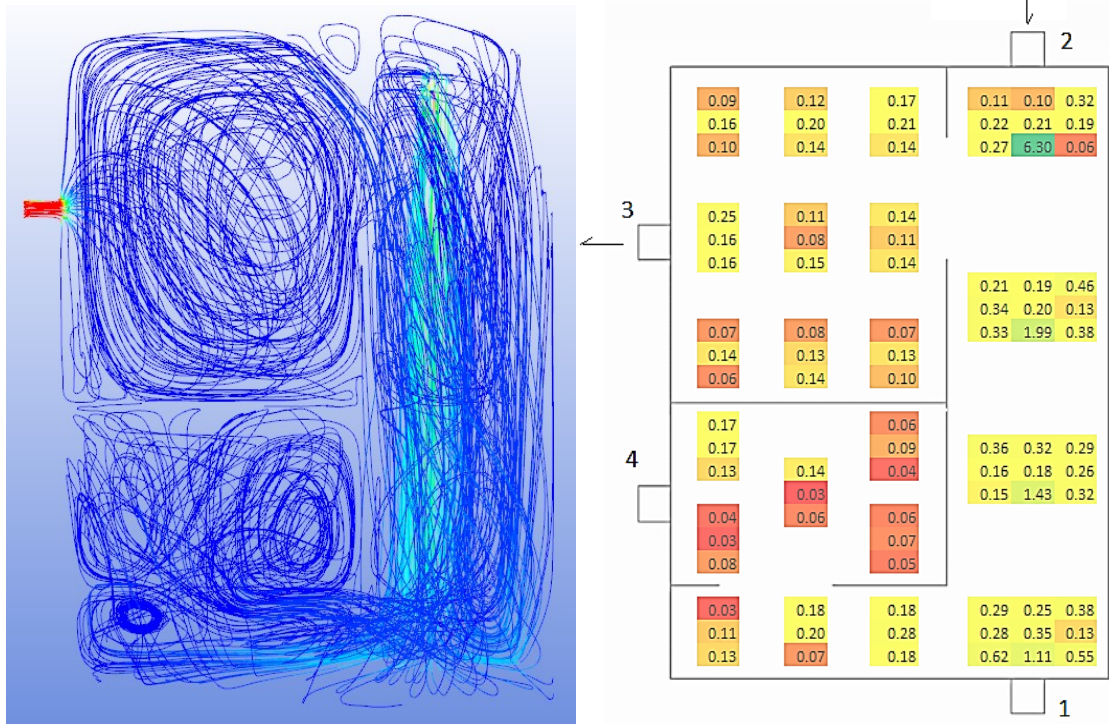
Tilanne 7 (T:3 ylä, P:1 ala)



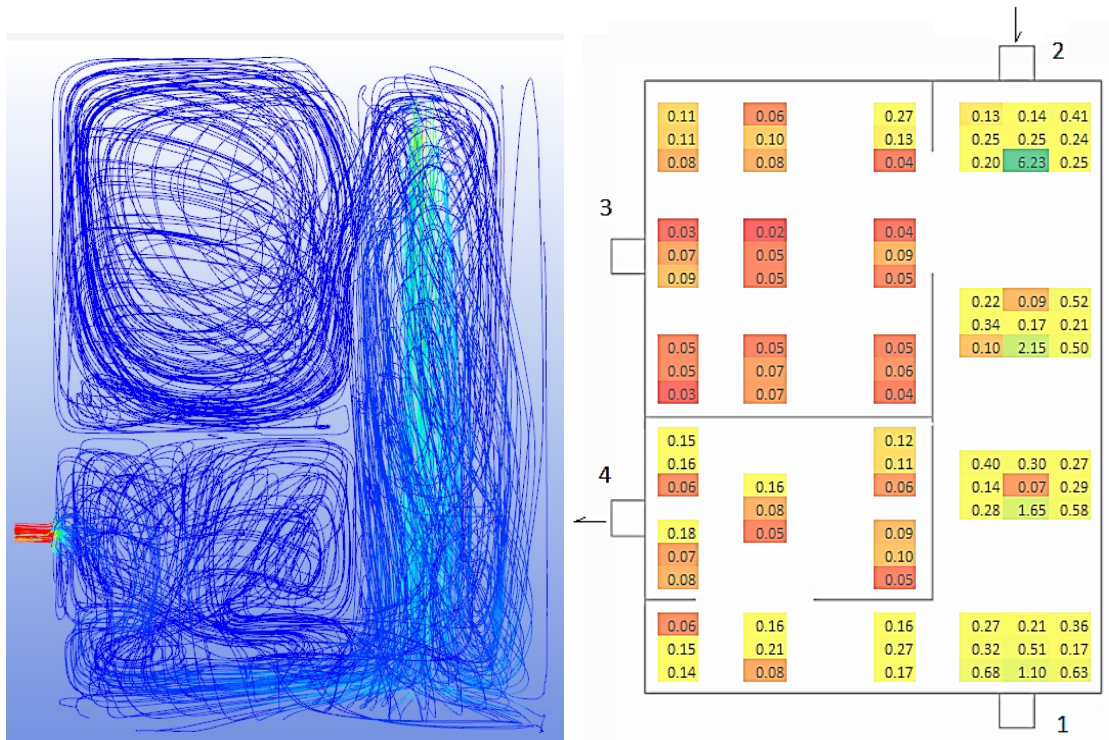
Tilanne 8 (T:4 ylä, P:1 ala)



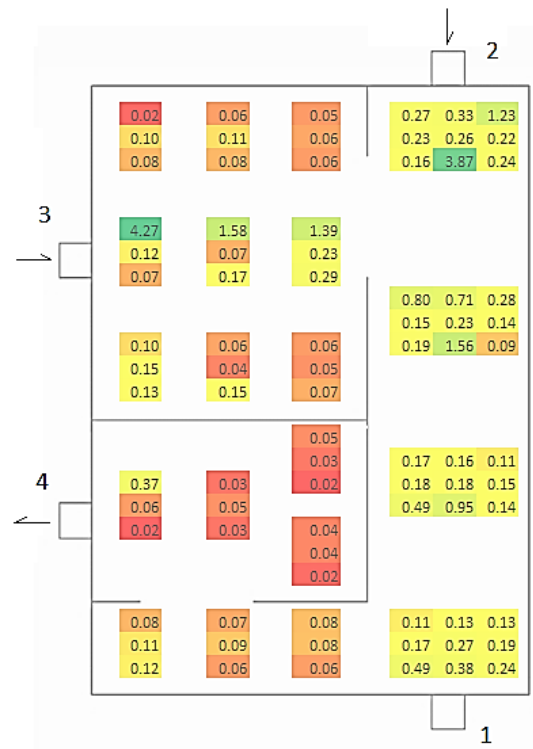
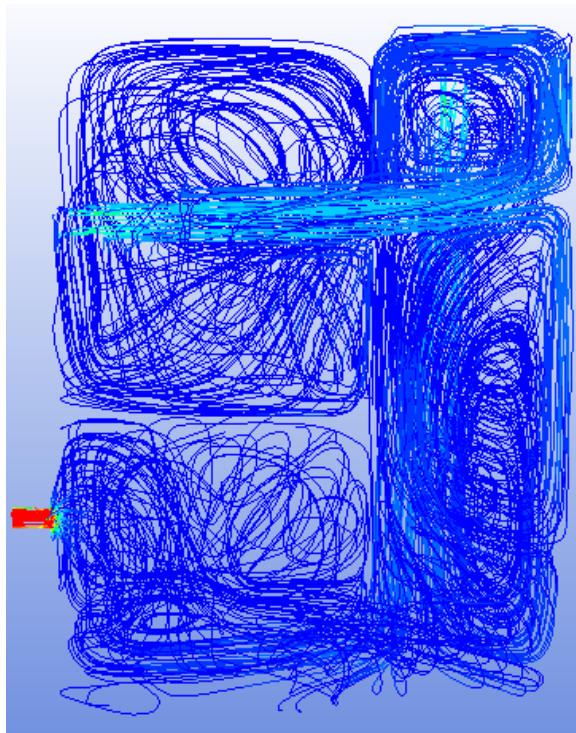
Tilanne 9 (T:2 ala, P:3 ylä)



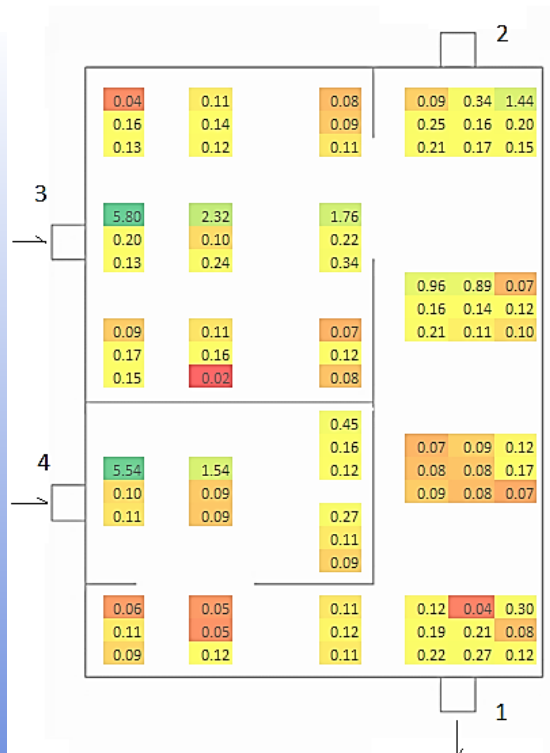
Tilanne 10 (T:2 ala, P:4 ylä)



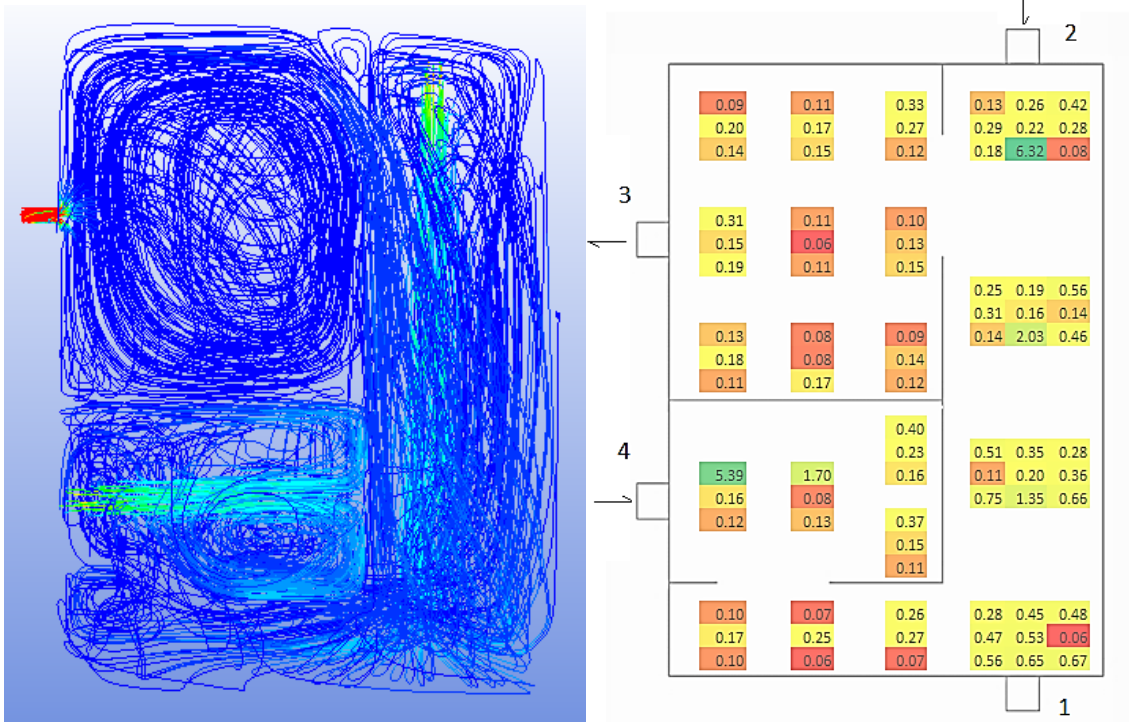
Tilanne 13 (T:3&2 ylä/ala, P:4 ylä)



Tilanne 14 (T:3&4 ylä, P:1 ala)



Tilanne 15 (T:4&2 ylä /ala, P:3 ylä)



Tilanne 16 (T:3&2 ylä/ala, P:4 ylä)

