

# Ilmanvaihto- ja jäähdytys- järjestelmien resilienssi lämpöaaltojen ja hengitystieinfektioiden suhteen

Uudis- ja korjausrakennusten teknisten ratkaisujen toiminta  
muuttuvissa olosuhteissa

Risto Kosonen, Jarek Kurnitski, Juha Jokisalo, Simo Kilpeläinen, Azin V Farahani,  
M Farhan Ejaz, Raimo Simson, Virpi Kollanus, Timo Lanki, Pekka Tiittanen,  
Tuula Vasankari, Miia Aro

VALTIONEUVOSTON SELVITYS- JA  
TUTKIMUSTOIMINNAN JULKAISUSARJA 2023:56

[tietokayttoon.fi](https://tietokayttoon.fi)

# Ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmien resilienssi lämpöaaltojen ja hengitystieinfektioiden suhteen

Uudis- ja korjausrakennusten  
teknisten ratkaisujen toiminta  
muuttuvissa olosuhteissa

Risto Kosonen, Jarek Kurnitski, Juha Jokisalo,  
Simo Kilpeläinen, Azin V Farahani, M Farhan Ejaz,  
Raimo Simson, Virpi Kollanus, Timo Lanki, Pekka Tiittanen  
Tuula Vasankari, Miia Aro

**Julkaisujen jakelu**

Distribution av publikationer

**Valtioneuvoston  
julkaisuarkisto Valto**

Publikations-  
arkivet Valto

[julkaisut.valtioneuvosto.fi](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi)

Valtioneuvoston kanslia

CC BY-ND 4.0

ISBN pdf: 978-952-383-007-3

ISSN pdf: 2342-6799

Taitto Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto

Helsinki 2023

## Ilmanvaihto. ja jäädytysjärjestelmien resilienssi lämpöaaltojen ja hengitystieinfektioiden suhteen

### Uudis- ja korjausrakennusten teknisten järjestelmien toiminta muuttuvissa olosuhteissa

Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:56

**Kustantaja** Valtioneuvoston kanslia

**Tekijä/t** Risto Kosonen, Jarek Kurnitski, Juha Jokisalo, Simo Kilpeläinen, Azin V Farahani, M Farhan Ejaz, Raimo Simson, Virpi Kollanus, Timo Lanki, Pekka Tiittanen, Tuula Vasankari, Miia Aro

**Kieli** suomi **Sivumäärä** 187

**Tiivistelmä** Tutkimuksessa tehtiin laskennallisia tarkasteluja helleaaltojen vaikutuksista sisälämpötilaan sekä kenttämittauksia ja virtaussimulointeja ilmanvaihdon mitoituksen merkityksestä hengitystieinfektioiden torjunnassa. Lisäksi arvioitiin korkeiden lämpötilojen terveyshaittoja sekä influenssaviruksen terveysvaikutuksien ja koronapandemian merkitystä Suomen ylikuolleisuuteen.

Passiivisilla auringonsuojarakaisilla ja ilmanvaihdon tehostuksella voidaan vähentää rakennusten ylläampemistä, mutta ne eivät yksistään riitä torjumaan sitä. Helleaalloista aiheutuu Suomessa vuosittain keskimäärin noin 110 ennenaikaista kuolemaa ja 170 sairaalahoitojaksoa, ja tulevaisuudessa haitat voivat moninkertaistua. Asuntojen ylläampemisen torjuntatoimien avulla on mahdollista ehkäistä merkittävä osuus vakavista terveyshaitoista.

Nykyiset ilmajärrit ovat opetustiloissa ja kuntosalissa riittäviä hengitystieinfektoriskin hallintaan. Avotoimistossa noin 20 %:a pienempi henkilömäärä voidaan nähdä järkevänä ratkaisuna epidemiatilanteessa. Hengitystieinfektiot ovat yleisin lyhyiden työstä poissaolojen syy Suomessa ja ne aiheuttavat sekä työnantajille että yhteiskunnalle kustannuksia sairauspoissaoloina, lisääntyneinä terveydenhuollon menoina ja suurentuneena kuolleisuutena.

**Klausuuli** Tämä julkaisu on toteutettu osana valtioneuvoston selvitys- ja tutkimussuunnitelman toimeenpanoa.(tietokayttoon.fi) Julkaisun sisällöstä vastaavat tiedon tuottajat, eikä tekstisisältö välttämättä edusta valtioneuvoston näkemystä.

**Asiasanat** tutkimus, tutkimustoiminta, ilmastonmuutokset, sisälämpötila, helleaalto, hengitystieinfektio, ilmanvaihto, terveysriskit

**ISBN PDF** 978-952-383-007-3

**ISSN PDF** 2342-6799

**Julkaisun osoite** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-007-3>

## Ventilations- och kylsystems resiliens i fråga om vämeböljor och luftväginfektioner

### Tekniska systemens funktion i förändeliga förhållanden i nya och renoverade byggnader

---

Publikationsserie för statsrådets utrednings- och forskningsverksamhet 2023:56

**Utgivare** Statsrådets kansli

---

**Författare** Risto Kosonen, Jarek Kurnitski, Juha Jokisalo, Simo Kilpeläinen, Azin V Farahani, M Farhan Ejaz, Raimo Simson, Virpi Kollanus, Timo Lanki, Pekka Tiittanen, Tuula Vasankari, Miia Aro

**Språk** finska **Sidantal** 187

---

**Referat** Forskningen genomförde beräkningsanalyser om vämeböljornas effekter på inomhustemperaturen samt fältmätningar och strömningsanalyser om betydelsen av ventilationsdimensionering för att förebygga luftväginfektioner. Dessutom analyserades hälsorisker av höga temperaturer samt hälsoeffekter av influensaviruset och coronapandemins effekt på överdödighet i Finland.

Det är möjligt att minska byggnadernas överhettning med passiva solskydd och effektivisering av ventilation, men det är omöjligt att bekämpa överhettningen bara med dessa metoder. I genomsnitt förorsakar vämeböljorna årligen 100 förtidiga dödsfall och 170 vårdperioder på sjukhuset i Finland, och skadorna kan bli mycket värre i framtiden. En betydlig del av allvarliga hälsoproblem kan förebyggas genom att förhindra lägenheternas överhettning.

De nuvarande luftflödena i undervisningslokalerna och gymnastiksalarna är tillräckligt stora att hantera risken för luftväginfektioner. I ett öppet kontor kan det vara förnuftigt att minska personalen med 20 % i en epidemisituation. Luftväginfektioner är den mest allmänna orsaken till korta frånvaro på arbetsplatserna i Finland, och de förorsakar stora kostnader för både arbetsgivare och samhället i form av sjukskrivningar, ökade sjukvårdskostnader samt ökad dödlighet.

**Klausul** Den här publikation är en del i genomförandet av statsrådets utrednings- och forskningsplan.(tietokayttoon.fi) De som producerar informationen ansvarar för innehållet i publikationen. Textinnehållet återspeglar inte nödvändigtvis statsrådets ståndpunkt.

**Nyckelord** forskning, forkningsverksamhet, klimatförändring, inomhustemperatur, vämeböljä, luftväginfektion, ventilation, hälsorisk

---

**ISBN PDF** 978-952-383-007-3

**ISSN PDF** 2342-6799

---

**URN-adress** <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-007-3>

---

## The resilience of ventilation and cooling systems on heat waves and respiratory infections

### The performance of technical systems in new and renovated buildings under changing conditions.

---

#### Publications of the Government's analysis, assessment and research activities 2023:56

<b>Publisher</b>	Prime Minister's Office		
<b>Author(s)</b>	Risto Kosonen, Jarek Kurnitski, Juha Jokisalo, Simo Kilpeläinen, Azin V Farahani, M Farhan Ejaz, Raimo Simson, Virpi Kollanus, Timo Lanki, Pekka Tiittanen, Tuula Vasankari, Miia Aro		
<b>Language</b>	Finnish	<b>Pages</b>	187
<b>Abstract</b>	<p>In this study, the impact of heat waves on indoor air temperature was assessed with numerical methods and the importance of ventilation dimensioning on preventing respiratory infections was investigated via flow simulations and field measurements. Additionally, health risks due to elevated temperatures were estimated, and the impact of influenza and the COVID-19 pandemic on excess mortality in Finland was analyzed.</p> <p>Passive solutions to block solar radiation and ventilation boosting are useful methods to decrease the overheating of buildings but they alone are not enough to completely prevent it. On average, roughly 110 premature deaths and 170 hospital care periods are caused by heat waves in Finland yearly, and these numbers could multiply in the future. By preventing overheating of apartments, it is possible to greatly reduce the amount of severe health hazards.</p> <p>Current airflows are sufficient to control respiratory infection risk in classrooms and gyms. In an open office layout, reducing the amount of people by roughly 20% can be seen as a sensible solution during an epidemic. Respiratory infections are the most common cause for absence from work in Finland and thus cause considerable expenses both to employers and to society in the form of sick leave, increased healthcare costs and larger mortality rates.</p>		
<b>Provision</b>	This publication is part of the implementation of the Government Plan for Analysis, Assessment and Research. (tietokayttoon.fi) The content is the responsibility of the producers of the information and does not necessarily represent the view of the Government.		
<b>Keywords</b>	research, research activities, climate change, indoor temperature, heat wave, respiratory infection, ventilation, health risk		
<b>ISBN PDF</b>	978-952-383-007-3	<b>ISSN PDF</b>	2342-6799
<b>URN-address</b>	<a href="https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-007-3">https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-007-3</a>		

---

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto.....</b>	<b>10</b>
1.1	Tausta ja tavoite .....	10
1.2	Tavoitteet.....	13
1.3	Rakennuksien ylikämpeneminen ja korkeiden lämpötilojen terveyshaitat .....	14
1.4	Ilmavälitteinen hengitystieinfektio ja ilmanvaihto .....	14
<b>2</b>	<b>Tutkimusmenetelmät.....</b>	<b>16</b>
2.1	Rakennusten lämpöolot ja energiankulutus.....	16
2.1.1	Hellejaksojen valinta.....	16
2.1.2	Huonelämpötilojen tavoitearvot .....	18
2.1.3	Lämpöolojen ja energiankulutuksen simulointi .....	19
2.2	Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat.....	19
2.2.1	Lämpötila-aineisto.....	20
2.2.2	Kuolleisuus-, sairaalahoito- ja väestöaineisto .....	21
2.2.3	Altiste-vastesuhteet .....	25
2.2.4	Vaikutusten laskenta.....	29
2.3	Sopeutumistoimien kustannus-hyötytarkastelu: lämpötila .....	30
2.3.1	Energia- ja investointikustannukset.....	30
2.3.2	Vaikuttavuus terveyshaittojen ehkäisyssä.....	31
2.4	Ilmanvaihto ja hengitystieinfektoriski .....	35
2.4.1	Tartuntapohjainen ilmanvaihdon mitoitus Wells-Riley:n mallilla.....	35
2.4.2	Merkkiainemittaukset kenttäkohteissa.....	38
2.4.3	CFD- simuloinnit .....	40
2.5	Virusmäärän merkitys yksilön tartunnan saamisen ja terveyden kannalta .....	41
2.6	Hengitystieinfektoriskin alentamiseksi tehtyjen toimien vaikutus kansanterveyden ja väestön sairastumisen kannalta .....	41
2.7	Hengitystieinfektion kansanterveydellinen merkitys .....	42
<b>3</b>	<b>Rakennusten ylikämpeneminen.....</b>	<b>43</b>

3.1	Simulointitapaukset .....	43
3.1.1	Vanhainkodit .....	44
3.1.2	Kerrostalot .....	47
3.1.3	Pientalot .....	51
3.2	Hellejaksojen vaikutus yllämpenemiseen .....	55
3.2.1	Huonelämpötilat ja niiden muutosnopeus .....	55
3.2.2	Päivä- ja yöaikainen yllämpeneminen .....	59
3.3	Nykyssäädösten mukaan suunnittelun rakennuksen lämpöolosuhteet nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa .....	63
3.3.1	Keskimääräinen vuosi ja hellevuosi nykyilmastossa .....	63
3.3.2	Hellevuosi nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa .....	65
3.4	Kerrostaloasunnon koon vaikutus yllämpenemiseen .....	67
3.5	Passiivisten keinojen merkitys ja jäähdytyksen tarve nykyilmastossa .....	69
3.5.1	Huonelämpötilat .....	69
3.5.2	Energian tarve ja energiakustannukset .....	80
<b>4</b>	<b>Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat .....</b>	<b>87</b>
4.1	Terveyshaitat nykyisin .....	87
4.2	Terveyshaitat tulevaisuudessa .....	92
<b>5</b>	<b>Sopeutustoimien kustannus-hyötystarkastelu: lämpötila .....</b>	<b>96</b>
5.1	Energia- ja investointikustannukset .....	96
5.2	Vaikuttavuus terveyshaittojen ehkäisyssä .....	102
<b>6</b>	<b>Rakennusten ilmanvaihto-järjestelmien resilienssi hengitystieinfektioita vastaan .....</b>	<b>108</b>
6.1	Nykyisen säädöksen mukaisen ilmanvaihdon riittävyys tartuntariskin hallinnassa .....	109
6.2	Huonekohtaisten ilmanpuhdistimien ja kasvomaskien vaikutus .....	115
6.3	Ilmanvaihdon tehokkuuden mittaukset .....	118
6.4	CFD- simuloinnit henkilöetäisyyden, tilan koon, ilmanvaihdon sekä henkilöiden aktiviteettitaso merkityksestä hengitystieinfektioriskiä .....	125
6.4.1	Opetustilat .....	125



6.4.2	Avotoimisto.....	130
6.4.3	Kuntosali .....	134
6.5	Kustannusvaikutukset ja johtopäätökset .....	140
<b>7</b>	<b>Infektoriskin vähentämisen vaikutus terveyteen .....</b>	<b>142</b>
7.1	Ilmavälitteisten virustautien merkitys terveyden kannalta .....	142
7.1.1	Viruksen leviäminen ja siihen vaikuttavat tekijät .....	142
7.1.2	Tartuntariskin laskenta .....	143
7.1.3	Influenssaviruksen leviäminen .....	143
7.1.4	Koronaviruksen leviäminen.....	144
7.2	Virusmäärän merkitys sairauden vaikeusasteeseen .....	146
7.2.1	Elimistöön päätyvän virusmäärän merkitys influenssan vaikeusasteeseen .....	146
7.2.2	Elimistöön päätyvän virusmäärän merkitys koronataudin vaikeusasteeseen .....	148
7.3	Ilmavälitteisten hengitystieinfektioiden merkitys kansanterveyden kannalta .....	149
7.3.1	Influenssa.....	150
7.3.2	Korona .....	153
<b>8</b>	<b>Päätelmät.....</b>	<b>155</b>
8.1	Rakennusten ylälämpeneminen .....	155
8.2	Korkeiden lämpötilojen vaikutus terveyteen .....	158
8.3	Ilmanvaihtojärjestelmien mitoituksen resilienssi hengitystieinfektiota vastaan .....	161
8.4	Infektoriskin vähentämisen merkitys terveydelle.....	162
8.5	Suosituksia.....	164
8.6	Jatkotutkimustarpeet.....	164
	<b>Liitteet .....</b>	<b>166</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>175</b>

## ESIPUHE

Ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmien resilienssi lämpöaaltojen ja hengitysinfektioiden suhteen (tutkimus- ja selvitystoiminnan teema 2.6), tutkijoiden keskuudessa ILMIRA-tutkimus, käynnistyi syksyllä 2022. Hanke on osa tutkimus- ja selvitystoiminnan painopistealuetta 2. Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi sekä asuntopolitiikka.

Hankkeen toteutuksesta vastasi Aalto- yliopiston vetämä konsortio, johon kuuluivat lisäksi Terveyden ja hyvinvoinnin laitos ja FILHA ry. Tutkimuksessa tehtiin laskennallisia tarkasteluja helleaaltojen vaikutuksista sisälämpötilaan sekä kenttämittauksia ja virtaussimulointeja ilmanvaihdon mitoituksen merkityksestä hengitystieinfektiota vastaan. Lisäksi arvioitiin korkeiden lämpötilojen sekä influenssa- ja COVID-19-virusten vaikutuksia sairastuvuuteen ja kuolleisuuteen.

Hankkeen ohjausryhmän puheenjohtajana toimi Pekka Kalliomäki ympäristöministeriöstä. Muut ohjausryhmän jäsenet olivat Jyrki Kauppinen ympäristöministeriöstä, Mikko Helasvuo opetus- ja kulttuuriministeriöstä, Katja Outinen valtioneuvoston kansliasta, Vesa Pekkola sosiaali- ja terveysministeriöstä, Mika Vuolle Equa Simulation Finland Oy ja Mervi Ahola Sisäilmayhdistys ry. Hankkeen koko työryhmä haluaa esittää kiitokset hankkeen ohjausryhmälle. Lisäksi kiitämme Kirsti Jylhää (Ilmatieteen laitos) ilmastomallidatasta ja kommentoinneista matkan varrella ja Sami Lestistä avusta CFD-mallien luonnoissa.

Risto Kosonen  
Aalto-Yliopisto, hankkeen vastuullinen johtaja

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta ja tavoite

Globaalin ilmastomuutoksen seurauksena ilmasto on lämmennyt Suomessakin noin kaksi astetta viimeisen sadan vuoden aikana. Keskilämpötilan nousun lisäksi ääri-ilmiöt ovat yleistyneet (Brown 2020) ja Ilmatieteen laitoksen ennusteen mukaan myös Suomessa esiintyy tulevaisuudessa yhä pidempiä lämpimiä sääjaksoja (Jylhä ym. 2020).

Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen (545/2015) mukaan rakennuksen käytön aikana huoneilman lämpötilan ei tulisi lämmityskauden ulkopuolella ylittää 32 °C normaaleissa asuinrakennuksissa. Palvelutaloissa, vanhainkodeissa ja vastavissa tiloissa korkein sallittu lämpötila on 30 °C (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Lisäksi uusien rakennuksien suunnittelua ohjaa Ympäristöministeriön asetus, jonka mukaan uusien rakennuksien suunnittelun yhteydessä tulee osoittaa, että kesäaikainen huoneilman lämpötila ei ylitä 27 °C yli 150 astetuntia. Laskennassa tulee käyttää lähteessä (Ympäristöministeriö 2017) kuvattuja lähtötietoja mm. sisäisille lämpökuormille sekä TRY2012 -testisäätä (Jylhä ym. 2011). On huomattava, että nykyisin energia- ja olosuhdesimuloinneissa käytetty energialaskennan testivuosien sääaineisto TRY 2012 on laadittu keskimääräisen kesän yllämpenemisen sekä jäähdystystehon ja jäähditysenergian laskentaan, eikä se siten sovellu suoraan hellekesien yllämpenemisen riskin arviointiin.

Tehdyissä simulointilaskelmissa on todettu, että jo keskimääräisenä kesänä on haasteellista saavuttaa viihtyvyyden ja terveyden kannalta asetetut huoneilman lämpötilan tavoitteet. Tehtyjen simulointien mukaan nykyilmastossa (TRY2021) uusien rakennuksien maksimilämpötilat voivat nousta yli asumisterveysasetuksen toimenpiderajan 32 °C. Poikkeuksellisen lämpimän hellekesän (vuosi 2018) aikana jäähdyttämättömien uudisasuinrakennusten maksimilämpötilat nousivat jopa 35–38 °C:een (Farahani ym. 2021a, Farahani ym. 2021b). Helsingissä tehdyt laajat (700 rakennusta ja 8 500 asuntoa) kenttämittaukset vahvistavat tehtyjen laskelmien tuloksia. Tutkimuksessa mitattiin noin 8 500 asuntoa kaikkiaan 690 eri kerrostalossa, joista vanhimmat on rakennettu ennen 1950-lukua ja uusimmat 2010 luvulla (Jokisalo ym. 2021). Tulokset osoittavat, että eri asuntojen väliset lämpötilaerot ovat varsin suuria, mutta kuumimpien hellejaksojen aikana merkittävä osa asunnoista yli lämpenee. Erityisen kuumen hellekesän 2018 aikana huonelämpötila ylitti 27 °C yli 150 astetuntia lähes 80 %:ssa analysoiduista asunnosta. Säädösohjauksen kehittämisen kannalta on tärkeää tietää, kuinka

ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmiä sekä passiivista auringonsuojausta voitaisiin kehittää uudis- ja korjausrakentamisessa, jotta rakennusten resilienssi lämpöaaltojen suhteen olisi parempi.

Kesäajan korkeat lämpötilat ja ennen kaikkea helleaallot, eli pitkittyneet kuumat jaksot, aiheuttavat myös Suomessa vakavia terveyshaittoja (Kollanus ym. 2021, Lahdensivu ym. 2023, Sohail ym. 2020). Koko maan laajuudesta joitakin viikkoja kestävästä helleaallostasta on arvioitu aiheutuvan useampia satoja ennenaikaisia kuolemia (Kollanus & Lanki 2014). Helleaaltojen tai korkeiden päivittäisten lämpötilojen keskimääräisiä vuosittaisia vaikutuksia kuolleisuuteen tai sairastuvuuteen koko Manner-Suomen alueella ei ole kuitenkaan arvioitu. Kuumuudelle altistuminen tapahtuu pääasiassa sisätiloissa, kun rakennukset yllämpenevät helteen pitkittyessä. Korkeiden sisälämpötilojen yhteys terveyteen tunnetaan kuitenkin huonosti, joten terveyshaittoja joudutaan arvioimaan pitkälti ulkolämpötiloihin perustuen. Kuumuudesta aiheutuva lämpöstressi sekä neste- ja suolavajaus voivat suoraan johtaa lieviin ja vakaviinkin terveyshaittoihin. Suurin osa vakavista haitoista johtuu kuitenkin siitä, että kuumuus pahentaa pitkäaikaisairauksien oireita (Kollanus & Lanki 2021). Terveyshaitat johtavat myös kustannuksiin esimerkiksi sairaalahoidon tarpeen lisääntymisen kautta.

Koronavirus (SARS-CoV-2) tarttuu pisaratartuntana ja ilmavälitteisesti hienojakoisen aerosolin välityksellä. Näitä molempia syntyy, kun sairastunut henkilö hengittää, puhuu, huutaa, yskii tai aivastaa. Pisaratartunta tapahtuu tartuttavan henkilön läheisyydessä, kun taas aerosolit jäävät leijumaan ilmaan ja kulkeutuvat tilassa ilman liikkeiden mukana pitkiäkin matkoja (Vuorinen ym. 2020). Rakennusten ilmanvaihdolla on suuri merkitys aerosolilevitteisten hengitystieinfektioiden hallinnassa. Lyhytaikaisten sairauspoissaolojen ja ulkoilmavirran välinen yhteys on tunnettu jo pitkään (Milton ym. 2000). Viime aikoina on tuotu esiin eri virusten aiheuttamien akuuttien ylähengitystieinfektioiden (ns. flunssatartunnat) ja selvästi vakavamman koronaviruksen leviäminen ilmateitse aerosolien välityksellä (Morawska ym. 2020). Uudet tulevaisuuden infektiouhat vaativat myös varautumista. WHO on laatinut ilmanvaihdon tiekartan (WHO 2021) siitä, kuinka rakennusten ilmanvaihtoa voidaan parantaa. Vastaavasti eurooppalaisten LVI-alan yhdistysten liitto REHVA on laatinut laajan ohjeistuksen (REHVA 2020), jossa esitetään käytännönläheisiä toimenpiteitä olemassa olevia rakennusten ilmanvaihdon parantamiseksi sekä ilmanvaihtojärjestelmien oikeaan käyttöön epidemian aikana. REHVA:n COVID-19 työryhmä on lisäksi kehittänyt COVID-19 ilmanvaihtolaskurin (REHVA 2021), jolla voidaan arvioida hengitystieinfektoriskiä eri tiloissa tyypillisillä ilmavirroilla ja arvioida taudin yleistä leviämiskykyä (R-luku) oleskelulle ko. tiloissa.

Nykyisin ilmanvaihdon säädösten mukaiset minimi-ilmavirrat perustuvat aistittuun ilman laatuun eli ihmisperäisten hajujen ja rakennusmateriaalien emissioiden poistamiseen. Säädöksen mukaisella minimi-ilmavirralla 6 l/s per,hlö (800 ppm lisäyksellä huoneilman CO<sub>2</sub> -pitoisuuteen) merkitsee sitä, että n. 23 % henkilöistä on keskimäärin tyytymättömiä ilman laatuun.

Viime aikoina on tuotu esiin myös tarve uusia ilmanvaihdon mitoituserusteet (Morawska ym. 2021). Tartuntapohjaisen ilmanvaihtokriteerin käyttöön on esitetty uusi menetelmä (Kurnitski ym. 2021), jolla voidaan laskea tilassa tarvittava ilmanvaihtomäärä oleskelun R-luvun perusteella, kun oletetaan huoneilman olevan täydellisesti sekoittunut. Huoneilma ei ole kuitenkaan yleensä täysin sekoittunut ja huonetilassa voi esiintyä varsin huomattavia vaihteluita paikallisissa aerosolipitoisuuksissa. Ilmanjaon valinnalla ja oikealla ilmavirran mitoituksella voidaan merkittävästi pienentää paikallista infektioriskiä (Su ym. 2021). Uusissa suunnittelumenetelmissä tulisi nykyistä paremmin ottaa huomioon epäpuhtauksien poistotehokkuus, josta ilmanvaihtostandardeissa käytetään myös nimitystä ilmanvaihdon tehokkuus, jotta ilmavaihtojärjestelmien resilienssi hengitystieinfektiota vastaan voidaan parantaa.

Tällä hetkellä Terveiden ja hyvinvoinnin laitos (THL) ja Aalto-yliopisto tutkivat helteen terveyshaittoja ja niiden torjumista Suomen Akatemian rahoittamassa HEATCLIM-hankkeessa (<https://sites.uef.fi/heatclim/>), jota prof. Timo Lanki koordinoi. Lisäksi Aalto-yliopisto ja THL ovat selvittäneet sisätilojen lämpötilan nousun vaikutuksia rakennusten käyttäjien terveyteen aikaisemmin julkaistussa Valtionneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan (VNK TEAS) rahoittamassa RAIL-hankkeessa (Lahdensivu ym. 2023). Lisäksi tutkimuksen rakennuksen ylälämpötarkasteluissa on hyödynnetty aikaisempaa RAMI-tutkimushanketta (Laukkarinen ym. 2022).

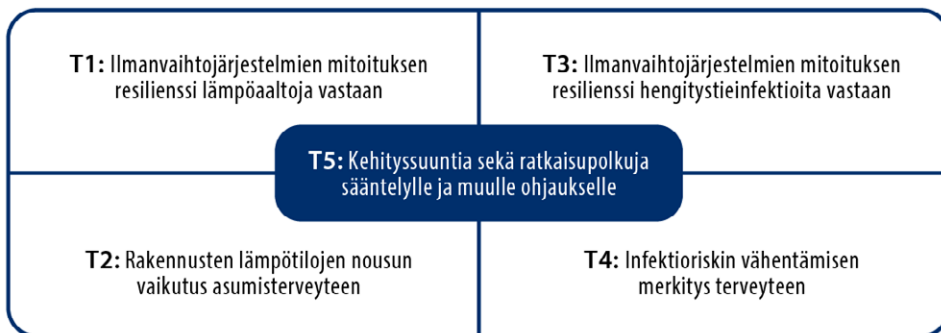
Edellä mainittujen hankkeiden tuottamia tietoja rakennusten ylälämpenemisestä ja helteen yhteydestä terveyteen on käytetty tämän hankkeen vaikutusarviointien pohjatielona, ja laskelmia erilaisten jäähdytysmenetelmien tehokkuudesta apuna haettaessa ratkaisupolkuja riskien vähentämiseen. Korkeiden lämpötilojen terveysvaikutuksia arvioitaessa on hyödynnetty RAIL-hankkeessa käyttöön otettuja menetelmiä (Lahdensivu ym. 2023), mutta vaikutusarviointi on laajennettu kattamaan koko Manner-Suomi.

Säädösohjauksen kehittämisen kannalta on tärkeä tietää, kuinka ilmanvaihto- ja jäähdytysjärjestelmiä (passiivinen ja aktiivinen) voitaisiin kehittää uudis- ja korjausrakentamisessa, jotta rakennusten resilienssi lämpöaallojen ja hengitystieinfektioiden suhteen olisi parempi. Lisäksi tulisi tuntea, mikä olisi teknisten ratkaisujen muutosten hyöty-painossuhde rakennuskannan tasolla, kun otetaan huomioon myös kansanterveysvaikutukset. Näihin kysymyksiin on tässä hankkeessa paneuduttu. Tehtyjen analyysien perusteella hankkeessa esitetään kehityssuuntia ja ratkaisupolkuja sääntelylle ja muulle ohjaukselle.

## 1.2 Tavoitteet

Tällä hankkeella oli viisi keskeistä tavoitetta: 1) selvittää rakennusten ilmanvaihtojärjestelmien mitoituksen resilienssi lämpöaalloja vastaan nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa, 2) selvittää lämpötilan nousun vaikutuksia rakennusten käyttäjien terveyteen, 3) selvittää rakennusten ilmanvaihtojärjestelmien mitoituksen resilienssi hengitystieinfektioita vastaan, 4) selvittää infektioriskin vähentämisen merkitys terveydelle ja 5) tarkastella kehityssuuntia ja ratkaisupolkuja sääntelylle ja muulle ohjaukselle uuden tutkimustiedon pohjalta terveys- ja viihtyvyysriskien pienentämiseen. Tutkimus on jaettu viiteen työpakettiin kuvan 1.1 mukaan.

**Kuva 1.1** Tutkimuksen osa-alueet työpaketeittain.



Yliämpötarkastelut tehdään kolmelle eri rakennustypille: asuinkerrostalo, vanhusten palvelutalo ja pientalo. Tarkasteltavat rakennukset on valittu helteisiin liittyvien riskien näkökulmasta ja myös siten, että ne mahdollisimman hyvin edustavat Suomen nykyistä rakennuskantaa. Yliämpötilatarkasteluja ja niiden torjuntakeinoja on tarkasteltu pahimmissa tapauksissa eri rakennustyypeillä käyttäen tilastollisesti valittuja hellekesäjaksoja.

Infektioriskitarkastelut on tehty kolmelle eri rakennustypille: koulurakennus, avotoimisto ja liikuntahalli. Tarkasteltavat tilat ja niiden ilmanjakoratkaisut valittiin ilmavälitteiden infektioriskin näkökulmasta ja siten, että ne mahdollisimman hyvin edustavat nykyisiä tila- ja ilmanvaihtoratkaisuja. Ilmaperäisen infektioita tartunnan leviämässä tarkasteltiin ilmavirran, ilmanvaihdon tehokkuuden, kasvomaskien ja ilmanpuhdistimen vaikutusta. Yleisellä tasolla on käyty läpi tyypilliset korkean riskin tilat palvelurakennuksissa: asuinrakennuksien tiloja ei sen sijaan tässä tutkimuksessa käsitellä

## 1.3 Rakennuksien yllämpeneminen ja korkeiden lämpötilojen tervehshaitat

Tämä tutkimus on jatkoa RAIL- ja RAMI-tutkimushankkeille (Lahdensivu ym. 2023, Laukkarinen ym. 2022) ja siten tutkimuksessa on hyödynnetty kyseisissä hankkeissa muodostettuja aineistoja sekä toteutettuja tarkasteluja.

Nykyisin tulisi paremmin tuntea, millaisia tervehshriskejä liittyy ilmaston lämpenemiseen ja sen myötä sisätilojen yllämpenemiseen nykyisin ja tulevaisuudessa, sekä millaisia kansantervehshdellisiä hyötyjä voitaisiin sisätilojen olosuhteita parantamalla saavuttaa.

Nykysäädöksien mukaan suunnitellun rakennuksen resilienssiä nykyisen ja tulevaisuuden ilmaston helleaaltojen kannalta ei kuitenkaan tunneta. Lisätietoa tarvitaan erilaisten hellejaksojen vaikutuksesta huoneilman lämpötilaan eri kokoisissa ja ikäisissä rakennuksissa. Lisäksi tarvitaan tietoa siitä, kuinka rakennuksen passiivisia jäähdytysratkaisuja ja ilmanvaihtoa tulisi parantaa, jotta voidaan saavuttaa tervehshden ja lämpöviihtyvyyden kannalta hyväksyttävät olosuhteet ja rakennuksen riittävä resilienssi hellesäälle nykyilmastossa sekä tulevaisuudessa eri ilmastoskenaarioissa vuosina 2050 ja 2080.

## 1.4 Ilmavälitteinen hengitystieinfektio ja ilmanvaihto

Ilmavälitteisten taudinaiheuttajien ja niiden leviämisen estäminen pienentää sairastumisriskiä. Tervehshden, tervehshdenhuollon kustannusten ja infektioiden aiheuttamien välillisten kustannusten kannalta olisi tärkeää tuntea tarkemmin, kuinka koronavirusinfektion (SARS-CoV-2) ja influenssan riskiä voitaisiin pienentää ilmanvaihtoa parantamalla. Lisätietoa tarvitaan myös siitä, kuinka viruspitoisuus ja viruspitoisuuksien pientyminen vähentävät tartunnan todennäköisyyttä ja onko tällä vaikutusta taudin vaikeusasteeseen. Tältä pohjalta voidaan arvioida, millaisia kansantervehshdellisiä hyötyjä voitaisiin infektoriskin pienentämisellä saavuttaa.

Tarkasteluissa on olennaista tietää, mikä on nykyäädöksien mukaan suunnitellun ilmanvaihdon riskitaso sekä sen ajallinen ja paikallinen resilienssi hengitystieinfektioita vastaan. Erityisesti lisätietoa tarvitaan siitä, kuinka paljon ilmanjakoa parantamalla, kasvomaskien ja henkilökohtaisten ilmanpuhdistimen avulla voidaan pienentää infek-

tioriskiä. Lisäksi tällä hetkellä ei tiedetä tarkkaan, kuinka suurissa tiloissa esim. avoimistossa, liikuntahallissa ja suuressa luentosalissa tuloilmalaitteen ja/tai ilmanpuhdistimen sekä epäpuhtauslähteen sijainti vaikuttaa paikalliseen infektioriskitasoon.



## 2 Tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa esitellään tutkimusmenetelmät, jotka liittyvät rakennusten lämpölojen sekä ilmanvaihdon ja hengitysinfektoriskin arviointiin sekä lämpölojen ja viruksien terveysriskin määrittämiseen.

### 2.1 Rakennusten lämpölo ja energiankulutus

#### 2.1.1 Hellejaksojen valinta

Rakennusten lämpöloihin ja energiankulutukseen liittyvässä tutkimusosiossa käytetään Suomen säävyöhykkeellä I (Ympäristöministeriö 2017) mitattua säähavaintoaineistoa, koska rakennusten yllämpenemisriskin arvioidaan olevan Etelä- ja Lounais-Suomessa sijaitsevalla säävyöhykkeellä I hieman muita Suomen säävyöhykkeitä (II–IV) korkeampi (Laukkarinen ym. 2022). Tutkimusosiossa käytetään Helsinki-Vantaan lentoasemalla sijaitsevan Ilmatieteen laitoksen sääaseman havaintoaineistoa, koska sen havaintoaseman sää tiedoilla voidaan kuvata säävyöhykkeen I sääoloja (Kalamies ym. 2012).

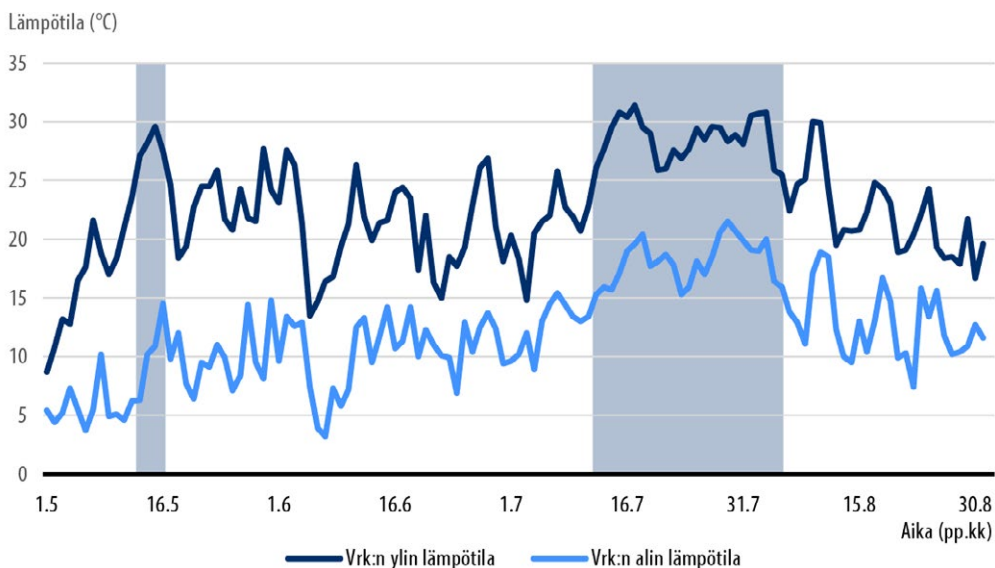
Ilmatieteen laitos on valmistellut RASMI-hankkeessa (Jylhä ym. 2020) 30 vuoden (1989–2018) tunnitaisen aineiston Helsinki-Vantaan sääasemalla mitatuista säähavainnoista ja tässä tutkimusosiossa aineistosta valitaan yksi säävuosi, joka sisältää rakennusten yllämpenemisen kannalta mahdollisimman vakavia hellejaksoja. Valintakriteereinä käytetään Russo ym. (2014) määrittämää helleaaltojen suuruusindeksiä (HWMId), hellejakson pituutta, 20 °C ja 25 °C ylittävien ulkolämpötilojen astetuntimääriä sekä auringon säteilysummaa vaakapinnalle kesäkuukausien (touko-, kesä- ja elokuu) aikana. Tässä tutkimusosiossa hellepäivän määritelmänä käytetään Ilmatieteen laitoksen käyttämää määritelmää, jonka mukaan hellepäivänä korkein ulkoilman lämpötila ylittää 25 °C (Ilmatieteen laitos 2023). Lisäksi tässä tutkimusosiossa hellejaksoksi määritellään peräkkäisistä hellepäivistä muodostuva ajanjakso.

Tarkastelussa käytetyn 30 vuoden sääjakson aikana helleaaltojen suuruusindeksi HWMId, jolla analysoidaan toteutuneita ulkolämpötiloja, saa korkeimmat arvot 12,7 ja 11,8 vuosien 2010 ja 2018 aikana, joten vuosien 2010 ja 2018 hellejaksot olivat ulkolämpötilojen näkökulmasta vakavimmat ja vuosi 2010 oli vakavin helleaaltojen suuruusindeksillä mitattuna. Toisaalta yhtenäisten hellejaksojen pituuksien analysointi osoittaa, että 30 vuoden sääjakson pisin hellejakso (25 vrk) toteutui kesällä 2018 ja toiseksi pisin kesällä 2010 (20 vrk) (Farahani ym. 2022). Lisäksi ulkolämpötilojen

20 °C ja 25 °C ylittävät astetunnit sekä auringon kokonaissäteilysumma kesäkuukausien aikana olivat kesällä 2018 30 vuoden sääjakson korkeimmat (3 698 °Ch, 719 °Ch ja 702 kWh/m<sup>2</sup>). Kesän 2010 aikana em. ulkolämpötilan astetunnit olivat 30 vuoden jakson toiseksi korkeimmat (3 624 °Ch ja 651 °Ch), mutta auringon säteilysumma kesäkuukausien aikana oli vasta 12. korkein (640 kWh/m<sup>2</sup>) ollen vain hieman korkeampi kuin 30 vuoden kesäkuukausien keskimääräinen säteilysumma (633 kWh/m<sup>2</sup>). Edellä mainittujen seikkojen vuoksi tutkimukseen valittiin vuosi 2018.

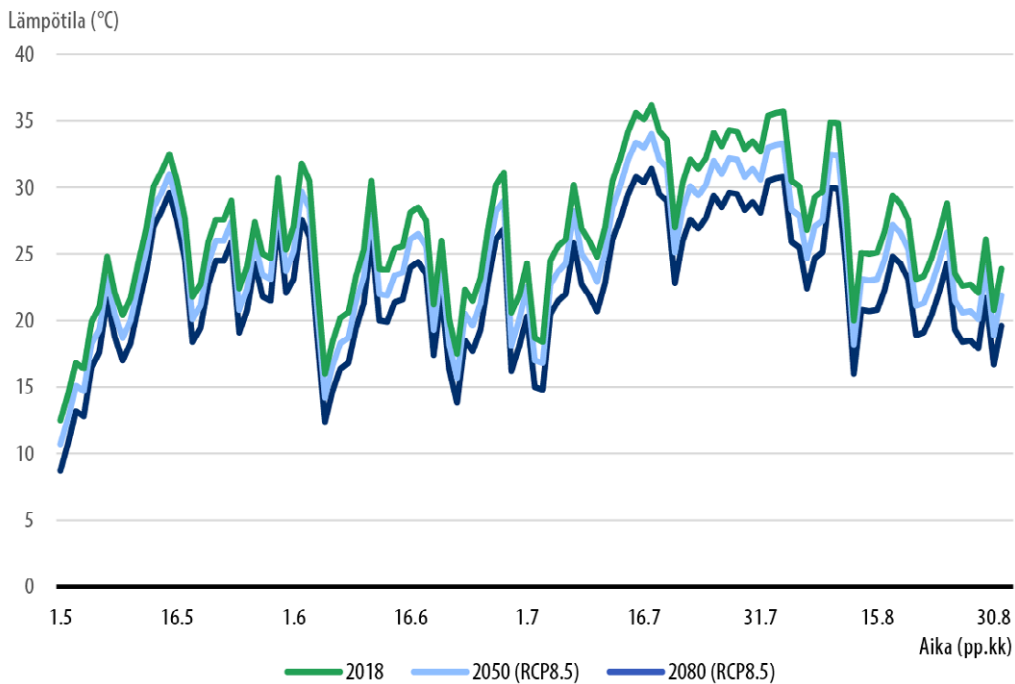
Kuvassa 2.1 on esillä Helsinki-Vantaan sääasemalla vuoden 2018 kesäkuukausien (1.5.-31.8.) aikana 10 min aikaresoluutiolla mitatut vuorokauden ylimmät ja alimmat ulkolämpötilat. Kuvassa on merkitty punaisella taustavärillä toukokuussa 13.16. päivä ollut 4:n vuorokauden mittainen hellejakso sekä heinäkuun 12. päivän ja elokuun 5. päivän välisenä aikana ollut 25:n vuorokauden mittainen pitkä hellejakso. Nämä hellejaksot valitaan tarkasteltaviksi hellejaksoiksi, koska ne poikkeavat pituutensa lisäksi merkittävästi myös vuorokauden alimpien lämpötilojen, eli yöaikaisten lämpötilojen osalta. Alkukesän lyhyt hellejakso, jolloin yöaikaisten lämpötilat ovat suhteellisen matalia, edustaa hellejaksoa, jolloin rakennukset eivät tyypillisesti ehdi yllämpenemään kovin merkittävästi. Sen sijaan heinä–elokuun äärimmäisen pitkä hellejakso, jolloin myös yöaikaisten ulkolämpötilat ovat korkeita, edustaa rakennusten yllämpenemisen kannalta vaikeinta tapausta. Vantaalla oli kesän 2018 aikana myös yksittäisiä hellepäiviä sekä 2–3 vuorokauden mittaisia hellejaksoja ja hellepäiviä oli kaikkiaan 39, joten kesä oli rakennusten yllämpenemisen kannalta erityisen vaikea.

**Kuva 2.1.** Helsinki-Vantaan lentoasemalla mitatut vuorokauden ylimmät ja alimmat lämpötilat vuoden 2018 kesäkuukausien aikana. Hellejaksot 13.–16.5. ja 12.7.–5.8. näkyvät punaisella taustavärillä.



Ilmaston lämpenemisen vaikutusta rakennusten yllämpenemiseen tutkitaan vuoteen 2018 pohjautuvalla sääaineistolla, jolle Ilmatieteen laitos teki RASMI-hankkeessa 2050- ja 2080-luvuille ulottuvan ilmastonmuutoskorjauksen käyttäen RCP8.5 päästöskenaariota (Jylhä ym. 2020). Kuvassa 2.2 on esillä vuoden 2018 sekä vuosien 2050 ja 2080 päästöskenaarion RCP8.5 mukaiset kesäkuukausien vuorokauden korkeimmat tunnitaiset ulkolämpötilat. Kun vuorokauden korkein lämpötila on kesällä 2018 noin 31 °C, niin vuonna 2050 se olisi 34 °C ja vuonna 2080 36 °C, mikäli päästöskenaario RCP8.5 toteutuu. Hellepäivien lukumäärä kasvaisi samalla merkittävästi ja vuonna 2050 niitä olisi 58 ja vuonna 2080 jopa 80.

**Kuva 2.2.** Vuorokauden korkein tunnitainen lämpötila Helsinki-Vantaalla kesäkuukausien aikana vuonna 2018 sekä vuosina 2050 ja 2080 RCP8.5 päästöskenaariolla.



## 2.1.2 Huonelämpötilojen tavoitearvot

Rakennusten lämpöoloja analysoidaan vertaamalla simuloituja huonelämpötiloja voimassa olevien ympäristöministeriön sekä sosiaali- ja terveysministeriön asetusten lämpötilarajoihin. Ympäristöministeriön asetuksessa (1010/2017) uusien rakennusten energiatehokkuuteen liittyen vanhainkotien jäähdytysrajana käytetään 25 °C ja asuinrakennusten osalta 27 °C (Ympäristöministeriö 2017). Asetuksen mukaan rakennusten suunnitteluvaiheessa uudisvanhainkodin simuloitu huonelämpötila ei saa ylittää jäähdytysrajana käytettyä lämpötilaa 25 °C yli 150 astetuntia touko–elokuun aikana,

kun rakennus simuloidaan keskimääräisiä sääoloja kuvaavalla Vantaan energianlaskennan testivuodella 2012 ja asetuksen mukaisella vakioidulla rakennuksen käytöllä. Vastaava vaatimus koskee myös uudiskerrostaloja, mutta asetunnit lasketaan kerrostalon jäähtytysrajaa 27 °C käyttäen. Sosiaali- ja terveysministeriön asumisterveysasetuksen (545/2015) toimenpideraja on 30 °C lämmityskauden ulkopuolella esimerkiksi vanhainkodeille ja kotihoidossa oleville vanhuksille ja 32 °C kaikille muille asunnoille (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Edellä mainituista lämpötilarajoista johtuen tässä tutkimusosiossa lasketaan ja analysoidaan 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät asetunnit vanhainkotien kuumimmassa asunnossa ja muiden asuinrakennusten kuumimmassa makuuhuoneessa koko simuloitavan vuoden aikana.

### 2.1.3 Lämpöolojen ja energiankulutuksen simulointi

Rakennusten lämpöoloja ja energiankulutusta tutkitaan dynaamisen IDA ICE -simulointiohjelman avulla. Ohjelmalla on mahdollista simuloida moniviyöhykkeisiä rakennuksia ja taloteknisiä järjestelmiä ottaen samanaikaisesti huomioon sääolosuhteet, auringon varjostukseen liittyvät tekijät rakennuksen ulkopuolella ja rakennuksessa, tilakohtaiset lämpökuormat auringon säteilystä sekä rakennuksen käytöstä johtuen ihmisistä, laitteista ja valaistuksesta. Simulointiohjelma ottaa huomioon muun muassa rakenteiden lämmönvarauskyvyn ja lämpöhäviöiden vaikutuksen huonelämpötiloihin ja rakennuksen energiankulutukseen. Lisäksi ohjelma ottaa tilojen väliset lämpötila- ja paine-erot huomioon, joten ohjelmalla on mahdollista tutkia kuinka yksittäiseen huoneeseen asennettu huonejäähdytyslaite vaikuttaa esimerkiksi muissa saman asunnon huoneissa.

## 2.2 Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat

Terveysvaikutusten arvioinnissa laskettiin helteestä vuosittain aiheutuvia ennenaikaisia kuolemantapauksia sekä sairaalahoitajaksoja Manner-Suomen maakunnissa nykyisin (vuosina 1999–2018) sekä tulevaisuudessa vuosina 2050 ja 2080. Lisäksi tarkasteltiin asuntojen ja palvelutalojen yllämpenemisen torjuntaan tähtäävien sopeutumistoimenpiteiden potentiaalisia vaikutuksia terveyshaittojen ehkäisyssä. Sopeutumistoimien vaikuttavuutta arvioitiin vuoden 2018 ennätyksellisen helteisen kesän terveyshaittojen näkökulmasta.

Tulevaisuuden vaikutuksia arvioitiin kolmessa ilmastonmuutoksen voimakkuutta kuvaavassa skenaariossa. Näistä SSP1-2.6 edustaa tilannetta, jossa ilmastonmuutoksen hillinnässä onnistutaan hyvin ja vastaavasti SSP5-8.5 tilannetta, jossa hillintätoimia ei tehdä lainkaan. Skenaario SSP2-4.5 sijoittuu ääripään skenaarioiden välimaas-

toon ja on tämän hetken kansainvälisen ilmastopoliitikan perusteella todennäköisin tulevaisuuden näkymä ilmastonmuutoksen etenemisestä. SSP1-2.6, SSP2-4.5 ja SSP5-8.5 skenaariot perustuvan uusimman ilmastomallisukupolven tuottamiin ennusteisiin, ja ne vastaavat karkeasti RCP-skenaarioita 2.6, 4.5 ja 8.5.

Terveysvaikutusten laskenta perustui maakuntakohtaiseen aineistoon nykypäivän havaituista ja tulevaisuuden mallinnetuista ulkoilman lämpötiloista, ulkoilman lämpöolosuhteiden ja terveysvaikutusten välistä tilastollista yhteyttä kuvaavaan altiste-vaste-suhteeseen ja maakuntakohtaisiin arvioihin ikääntyneen (yli 65-vuotiaiden) väestön määrästä sekä kuolleisuuden ja sairaalahoitajaksojen taustariskistä. Sopeutumistoi- mien vaikuttavuuden laskennassa huomioitiin ilmalämpöpumppujen yleisyys nykyisessä asuntokannassa sekä se, kuinka suuri osuus eri maakuntien ikääntyneestä väestöstä asuu erityyppisissä asunnoissa tai palvelutaloissa.

## 2.2.1 Lämpötila-aineisto

Nykypäivän ilmastoa kuvaamaan käytettiin Ilmatieteen laitoksen maakuntakohtaisia mittaushavaintoja vuorokauden keskilämpötiloista vuosina 1999–2018. Tulevaisuuden terveysvaikutusten arviointi eri ilmastoskenaarioissa (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) vuosina 2050 ja 2080 perustui Ilmatieteen laitoksen laatimiin skenaarioihin maakunta-kohtaisista päivittäisistä lämpötiloista ajanjaksoilla 2041–2060 ja 2071–2090 (lisätietoja: Ruosteenoja & Jylhä 2023). Arvio korkeiden lämpötilojen terveyshaitoista eri skenaariossa ja aikapisteissä saatiin laskemalla ensin haitat käyttäen 25 eri ilmastomallin lämpötilaennusteita koko 20 vuoden ajanjaksolle, jonka jälkeen saaduista tuloksista laskettiin keskiarvo. Lähestymistavan avulla niin lämpötilan vuosivaihtelu kuin lämpötilan ennustamisen epävarmuuskin tulevat huomioiduiksi.

Helleaalloiksi määriteltiin kuumat jaksot, jolloin ulkoilman keskilämpötila ylitti Helsinki-Vantaan lentoaseman havaintopisteessä touko-elokuussa 1999–2018 mitattujen vuorokausilämpötilojen jakauman 90. prosenttipisteen (20,8 °C) vähintään kolmen peräkkäisen vuorokauden ajan. Helleaaltopäiviin katsottiin lukeutuvan kaikki helleaaltajakson päivät, mukaan lukien kaksi ensimmäistä päivää.

## 2.2.2 Kuolleisuus-, sairaalahoito- ja väestöaineisto

Tilastokeskuksen StatFin-tilastotietokannasta poimittuja maakuntakohtaisia kuolleisuus- ja väestöaineistoja sekä THL:n Terveystieteiden tutkimuskeskuksen Terveydenhuollon hoitoilmoitusrekisteristä poimittuja sairaalahoitajakasotietoja käytettiin kuolleisuuden ja sairaalan vuodeosastohoitoon joutumisen taustariskin sekä altistuvan väestön määrän arvioimiseen (taulukot 2.1 ja 2.2). Kuolemista ja hoitajakasotista poistettiin ulkoisista syistä johtuvat tapahtumat (onnettomuudet ja väkivalta) vaikka lämpötila voi vaikuttaa myös näihin, sillä tässä arvioinnissa haluttiin keskittyä helteen suorempiin vaikutuksiin. Sairastuvuuden ja kuolleisuuden helteestä riippumattomia alueittaisia eroja pyrittiin huomioimaan määrittelemällä taustariskit maakunnittain.

Nykypäivän terveyshaittojen arviointi perustui yli 65-vuotiaiden todelliseen väestömäärään eri maakunnissa (Tilastokeskus 2023a). Vuosien 1999–2018 vaikutusten laskennassa käytettiin kaikkien vuosien osalta vuoden 2009 väestömäärää. Kesän 2018 vaikutuksia ja sopeutumistoimenpiteiden vaikuttavuutta tarkasteltaessa laskennassa käytettiin vuoden 2018 väestömäärää. Tulevaisuuden vaikutuksia arvioitaessa väestömäärät perustuivat puolestaan maakuntakohtaiseen väestöennusteeseen vuosille 2021–2040 ja koko maata koskevaan ennusteeseen vuosille 2021–2070 (Tilastokeskus 2023b). Maakuntakohtaista väestömäärää vuodelle 2040 käytettiin tarkasteluajanjaksolle 2041–2060. Vuosien 2071–2090 tarkastelua varten vuoden 2040 maakuntakohtainen väestömäärä skaalattiin vastaamaan koko maan ennustettua väestömäärää vuonna 2070 olettaen, että vuoden 2070 väestö jakautuu maakunnittain samalla tavalla kuin vuonna 2040.

**Taulukko 2.1.** Yli 65-vuotiaiden määrä eri aikapisteissä.

<b>Maakunta</b>	<b>2009</b>	<b>2018</b>	<b>2040</b>	<b>2070</b>
Etelä-Karjala	27 780	34 467	37 901	44 367
Etelä-Pohjanmaa	38 407	48 069	55 057	64 450
Etelä-Savo	33 340	40 848	42 950	50 278
Kainuu	16 196	20 078	21 119	24 722
Kanta-Häme	32 139	42 238	53 633	62 783
Keski-Pohjanmaa	11 838	15 616	17 874	20 923
Keski-Suomi	47 506	61 846	74 684	87 426
Kymenlaakso	35 888	45 495	49 167	57 555
Lappi	34 063	43 956	49 750	58 238
Pirkanmaa	83 760	110 844	143 255	167 696
Pohjanmaa	32 003	39 834	45 780	53 590
Pohjois-Karjala	33 374	42 736	46 800	54 784
Pohjois-Pohjanmaa	56 931	78 685	107 382	125 702
Pohjois-Savo	48 574	61 655	72 143	84 451
Päijät-Häme	39 862	53 976	64 202	75 155
Satakunta	46 443	58 079	61 862	72 416
Uusimaa	204 086	290 146	417 255	488 442
Varsinais-Suomi	83 318	109 649	137 715	161 210
<b>Manner-Suomi</b>	<b>905 508</b>	<b>1 198 217</b>	<b>1 498 529</b>	<b>1 754 188</b>

Nykypäivän tarkasteluissa myös arviot kuolleisuuden ja sairaalahoitoon joutumisen taustariskeistä perustuivat todellisiin kuolemantapausten (Tilastokeskus 2023c) ja vuodeosastohoitojaksojen määriin. Maakuntakohtaista tietoa tautikuolleisuudesta ei ollut saatavilla, joten tauteihin kuolleiden osuutta kokonaiskuolleisuudesta arvioitiin hyödyntäen koko maata koskevia ikäryhmäkohtaisia kuolemansyytietoja (Tilastokeskus 2023d). Yli 65-vuotiaiden tautikuolleisuuden arvioitiin koko maan tasolla olevan 96 % kokonaiskuolleisuudesta. Laskelmissa käytettyjen vuosien 2009 ja 2018 taustariski tautikuolleisuudelle saatiin täten kaavalla:

$(0,96 \times \text{kokonaiskuolleisuus}) / \text{keskiväkiluku kyseisenä vuotena.}$

Tulevaisuuden tarkasteluja varten tautikuolleisuuden taustariskiä arvioitiin hyödyntäen kunta-, sukupuoli- ja ikävuosikohtaisia ennusteita väestömäärästä vuosina 2039–2040 ja syntyneiden määrästä vuonna 2040 sekä arvioituja ikävuosikohtaisia kuolleisuuskertoimia vuodelle 2040. Tietojen avulla laskettiin ensin kuntakohtaiset kuolleiden määrät, jotka aggregoitiin maakuntatasolle. Tautikuolleisuuden oletettiin olevan tulevaisuudessakin 96 % kokonaiskuolleisuudesta, joten taustariski laskettiin samalla kaavalla kuin nykypäivän tarkasteluissa. Samaa vuoden 2040 taustariskiä on käytetty molempien tulevaisuuden ajanjaksojen tarkasteluissa, koska arviointi pitkälle tulevaisuuteen sisältää suuria epävarmuuksia ja tarvittavat lähtötiedot ovat hyvin karkeita.

Maakuntakohtainen yli 65-vuotiaiden sairaalan vuodeosastohoitoon joutumisen taustariski vuosille 2009 ja 2017 saatiin suoraan jakamalla vuodeosastohoitojaksojen määrä kyseisen vuoden keskiväkiluvulla. Vuoden 2009 taustariskiä käytettiin myös tulevaisuuden vaikutusten laskennassa.



**Taulukko 2.2.** Kuolleisuuden ja sairaalan vuodeosastohoitoon joutumisen päivittäinen taustariski (per 10 000 henkilöä) eri aikapisteissä.

Maakunta	Kuolleisuus 2009	Kuolleisuus 2018	Kuolleisuus 2040	Sairaalahoito 2009	Sairaalahoito 2017
Etelä-Karjala	1,17	1,11	1,14	6,51	5,42
Etelä-Pohjanmaa	1,18	1,07	1,11	8,70	8,28
Etelä-Savo	1,23	1,13	1,17	8,11	7,73
Kainuu	1,24	1,11	1,17	8,56	6,78
Kanta-Häme	1,17	1,03	1,06	6,92	5,97
Keski-Pohjanmaa	1,11	0,99	1,11	11,20	8,04
Keski-Suomi	1,14	1,06	1,09	9,42	7,47
Kymenlaakso	1,20	1,14	1,15	6,47	5,95
Lappi	1,13	1,07	1,12	9,03	8,94
Pirkanmaa	1,15	0,98	1,04	6,33	6,38
Pohjanmaa	1,13	1,02	1,06	7,59	5,71
Pohjois-Karjala	1,15	1,12	1,17	9,63	9,39
Pohjois-Pohjanmaa	1,08	0,98	1,01	9,05	8,34
Pohjois-Savo	1,17	1,07	1,11	9,61	7,89
Päijät-Häme	1,21	0,99	1,10	6,23	6,63
Satakunta	1,15	1,09	1,15	7,80	7,39
Uusimaa	1,07	0,92	0,98	5,59	5,32
Varsinais-Suomi	1,15	1,03	1,06	6,45	5,12

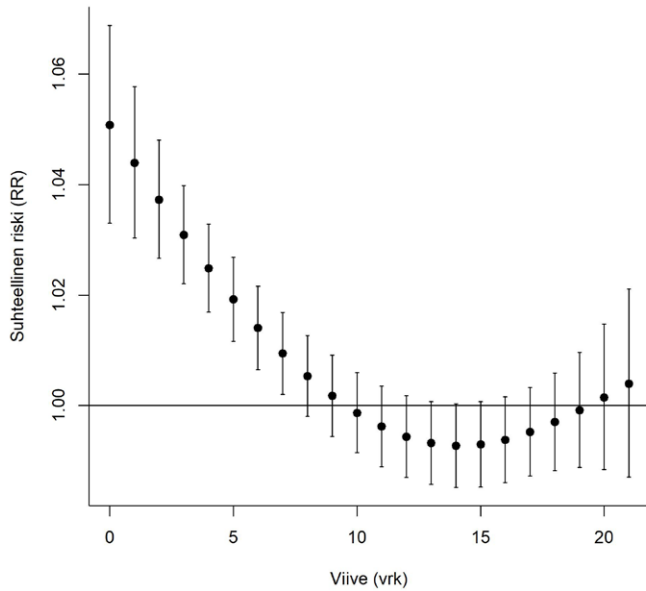
## 2.2.3 Altiste-vastesuhteet

Arvioinnissa sovellettiin RAIL-projektissa (Lahdensivu ym. 2023) määritettyjä altiste-vastesuhteita, jotka kuvaavat helleaaltopäivien tai päivittäisen lämpötilan ja terveysvaikutusten (kuolleisuus, sairaalahoitoon joutuminen) välistä tilastollista yhteyttä Suomessa. Altiste-vastesuhteet on määritetty hyödyntäen väestötason epidemiologisia tilastomenetelmiä, ja ne perustuvat päivittäisiin säähavaintoihin sekä rekisteriaineistoon sairauksista aiheutuneista (ICD-10 tautiluokituksen syykoodit A00-R99) kuolemantapauksista ja erikoissairaanhoidon ja perusterveydenhuollon sairaaloiden vuodeosastohoitoon ostoista (päivystyksen kautta tulleet potilaat, jatkossa lyhyesti ”sairalahoitajaksot”) pääkaupunkiseudulla (Helsinki, Espoo, Vantaa ja Kauniainen) kesä-elokuussa vuosina 2001–2018.

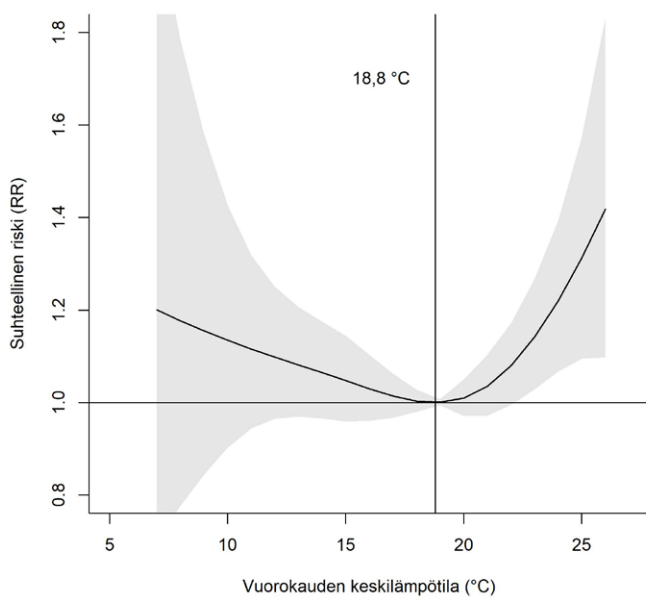
Helleaaltopäiviä koskevan altiste-vastesuhteen yhteydessä helleaalto määriteltiin tarkoittamaan kesä-elokuun kuumaa jaksoa, jolloin ulkoilman vuorokauden keskilämpötila ylitti Helsinki-Vantaan lentoaseman havaintoasemalla touko-elokuussa 2001–2018 mitattujen vuorokausilämpötilojen jakauman 90. prosenttipisteen (20,9 °C) yhtäjaksoisesti vähintään kolmen vuorokauden ajan. Helleaalto ei ole olemassa standardoitua määrittelytapaa, mutta vastaavaa määritelmää on käytetty aikaisemmissa Suomea koskevissa tutkimuksissa (Kollanus ym. 2021, Sohail ym. 2020). Helleaaltopäiviin katsottiin lukeutuvan kaikki helleaaltajakson päivät, mukaan lukien kaksi ensimmäistä päivää.

Terveysvaikutuksia arvioitaessa sovellettiin yli 65-vuotiaiden ikäryhmää koskevia altiste-vastesuhteita, sillä helteen vakavien terveyshaittojen on havaittu kohdistuvan Suomessa pääasiassa tähän ikäryhmään (Lahdensivu ym. 2023). Helleaaltopäivien ja päivittäisen lämpötilan vaikutus kuolleisuuteen on esitetty kuvaajissa 2.3 ja 2.4 ja vaikutus sairaalahoitajaksoihin kuvaajissa 2.5 ja 2.6.

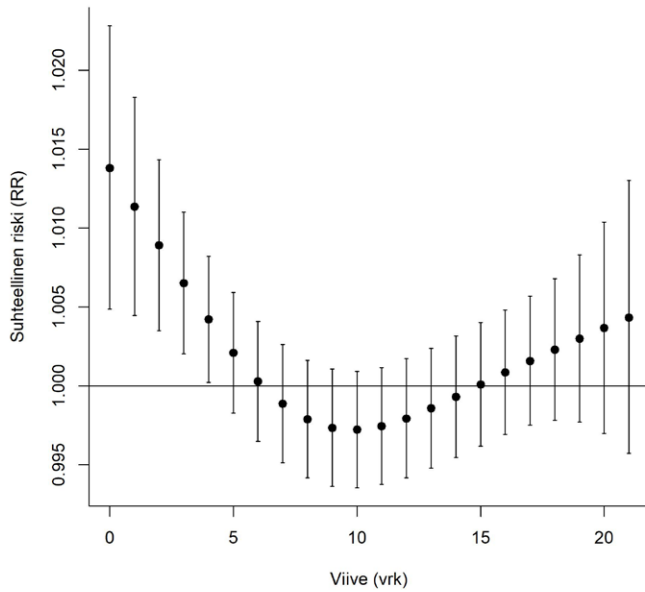
**Kuva 2.3.** Helleaaltopäivän vaikutus kuolleisuuteen kyseisenä päivänä sekä 21 vuorokauden viiveellä yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä.



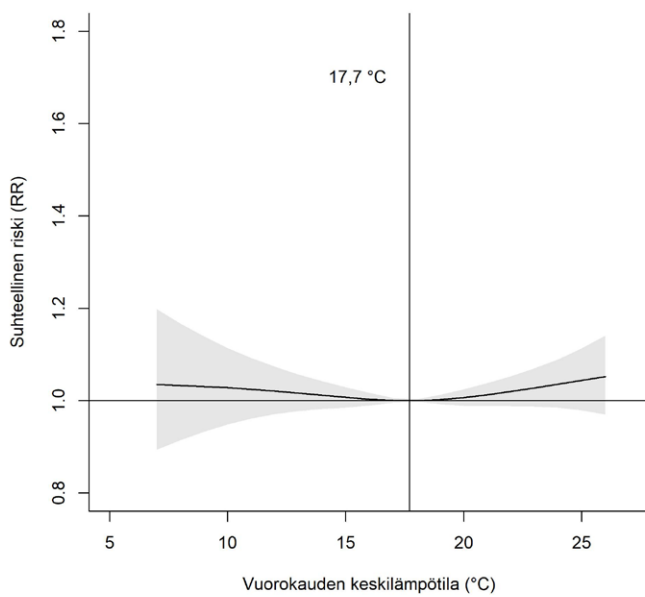
**Kuva 2.4.** Ulkoilman lämpötilän vaikutus päivittäiseen kuolleisuuteen yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä. Kuvaan on merkitty lämpötilä, jossa kuolleisuus on pienimmillään kesäaikana.



**Kuva 2.5.** Helleaaltopäivän vaikutus sairaalahoitoon ottoihin kyseisenä päivänä sekä 21 vuorokauden viiveellä yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä.



**Kuva 2.6.** Ulkoilman lämpötilän vaikutus päivittäisiin sairaalahoitoon ottoihin yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä. Kuvaan on merkitty lämpötila, jossa sairaalahoitoon otot ovat pienimmillään kesäaikana.



Vaikutusten laskennassa sovellettiin altiste-vastesuhteen keskiestimaatteja, joiden mukaan helleaaltopäivä lisää yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä kuolleisuutta 21,2 % ja sairaalahoitajaksoja 4,8 %. Päivittäinen korkea lämpötila puolestaan lisää kuolleisuutta keskimäärin 2,7 % per yhden celsiusasteen lisäys ja sairaalahoitajaksoja 0,4 % per yhden celsiusasteen lisäys, kun vertailukohtana on lämpötila, jossa kuolleisuus/sairaalahoitoon otot ovat pienimmillään kesäaikana (18,8 / 17,7 celsiusastetta). Nämä estimaatit kuvaavat helleaaltopäivän tai korkean päivittäisen lämpötilan kumulatiivista kokonaisvaikutusta samana päivänä ja seuraavan kolmen viikon aikana. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kuolemat tai sairaalahoitajaksot, jotka olisivat todennäköisesti tapahtuneet lämpötilasta riippumatta kolmen viikon sisällä, jätetään huomioimatta.

Terveysvaikutusten laskenta eri maakunnissa perustui sekä nykypäivän että tulevaisuuden vaikutusten osalta pääkaupunkiseudulle määritettyihin altiste-vastesuhteisiin, helleaaltopäivän kriteereihin sekä päivittäisen lämpötilan vaikutuksia arvioitaessa minimivaikutusten lämpötilaan. Arvioinnin tuloksiin, ja erityisesti maakuntakohtaisiin estimaatteihin, liittyy tältä osin epävarmuutta, sillä alueiden väliset erot esimerkiksi väestön ikärakenteessa, terveydentilassa, asuin- ja ympäristöolosuhteissa tai sosioekonomisissa ominaispiirteissä voivat vaikuttaa helteestä aiheutuvien terveyshaittojen suuruuteen sekä siihen, missä lämpötilassa vaikutukset alkavat lisääntyä. Kattavaa aluekohtaista tietoa helteen ja terveyshaittojen välisestä altiste-vastesuhteesta ei ole kuitenkaan saatavilla. Aikaisemman tutkimuksen perusteella helteen kuolleisuusvaikutuksissa ei ole kuitenkaan Suomessa merkittäviä maantieteellisiä eroja (Ruuhela ym. 2018).

Tulevaisuuden vaikutusten osalta merkittävä epävarmuustekijä on myös se, missä määrin väestö ja yhteiskunta sopeutuvat lämpenevään ilmastoon. Vaikutusarvioinnissa helleaaltopäivän tai korkean päivittäisen lämpötilan terveyshaittojen oletettiin alkavan tulevaisuudessa samassa lämpötilassa kuin nykyisin, eli mahdollista sopeutumista muuttuviin ilmasto-olosuhteisiin ei otettu huomioon. Vuosien 2050 ja 2080 tulokset ovat tältä osin siis ns. "worst case" arviota. Toisaalta helleaaltopäivien nykyvaikutusta kuvaavan altiste-vastesuhteen soveltaminen tulevaisuuden vaikutusten arvioimiseen saattaa johtaa osittain terveyshaittojen aliarviointiin, sillä helleaaltojen voimistuessa ja väestön haavoittuvuuden kasvaessa ikääntymisen myötä helleaaltopäiviin liittyvä suhteellinen terveysriski voi suurentua nykyisestä. Tulevaisuuden altiste-vastesuhdetta on kuitenkin mahdoton ennustaa luotettavasti.

Projektin aikana tarkasteltiin epidemiologisiin menetelmiin perustuen myös sitä, kuinka korkeat päivittäiset lämpötilat ja helleaaltopäivät vaikuttavat sairauspoissaoloihin työstä pääkaupunkiseudun työikäisessä väestössä. Helteen ei kuitenkaan todettu olevan yhteydessä sairauspoissaolojen lisääntymiseen, eikä niitä siten sisällytetty vaikutusarviointiin.

## 2.2.4 Vaikutusten laskenta

Altiste-vastesuhteiden avulla saadaan vaikutusarvioinnissa laskettua korkeiden päivittäisten lämpötilojen ja helleaaltopäivien aiheuttamat terveysvaikutukset hyödyntäen WHO:n käyttämää väestösyysuus (population attributable fraction) -laskentatapaa. Alla on esitetty kaavat, joiden avulla jokaiselle päivälle ja jokaiseen maakuntaan laskettiin korkeista lämpötiloista aiheutuvat terveyshaitat. Lopuksi päivittäiset tapausmäärät summattiin yli tarkasteluajanjakson.

$$RR' = \exp(\ln(RR) * C_i) \quad (2.1)$$

*RR' = lämpötilan aiheuttama suhteellinen riski*

*RR = kuolleisuuden / sairaalahoitoon oton suhteellinen riski yhtä celsiusastetta kohden (altiste-vastesuhde)*

*C<sub>i</sub> = maakunnassa i ulkoilman lämpöasteet, jotka ylittävät ulkoilman lämpötilan, jossa kuolleisuus / sairaalahoitoon ottojen määrä on matalimmillaan kesäaikana*

$$PAF = (RR' - 1) / RR' \quad (2.2)$$

*PAF = väestösyysuus, eli osuus kaikista kuolemista / sairaalahoitoon ostoista, joka johtuu korkeille lämpötiloille altistumisesta*

$$D = p_i * MR_i * PAF \quad (2.3)$$

*D = korkeiden lämpötilojen aiheuttamien kuolemantapausten / sairaalahoitoon ottojen määrä*

*p<sub>i</sub> = väestön määrä maakunnassa i*

*MR<sub>i</sub> = kuolleisuuden/sairaalahoitoon oton taustariski maakunnassa i*

Helleaaltojen haittavaikutuksia laskettaessa altisteena on ulkolämpötilan sijasta helleaaltopäivä (kyllä/ei), ja **RR'** on kuoleman / sairaalahoitoon oton riski helleaaltopäivinä suhteessa vertailupäiviin.

## 2.3 Sopeutumistoimien kustannus- hyötytarkastelu: lämpötila

### 2.3.1 Energia- ja investointikustannukset

Luvussa 3 analysoitavien rakennusten ylälämpenemisen torjuntakeinojen energiakustannukset määritettiin käyttäen tutkimuksen tekohetkellä saatavilla olevia viimeisimpiä energian hintoja. Ylälämpenemistä tutkittiin kuuden eri esimerkkirakennuksen avulla (kts. luku 3.1), joten energiakustannusten laskennassa käytettiin rakennustyyppikohtaisia sähkön ja kaukolämmön keskihintoja Suomessa vuoden 2022 aikana (sähkö) ja tammikuussa 2023 (kaukolämpö). Sähkön hintoina käytettiin Tilastokeskuksen julkaisemia sähkön kuluttajatyypikohtaisia keskihintoja (Tilastokeskus 2023g), joihin sisältyy energia- ja siirtomaksut veroineen (sähkövero ja ALV). Kaukolämmön hintoina käytettiin Energiateollisuus ry:n julkaisemia kaukolämmön rakennustyyppikohtaisia keskihintoja (Energiateollisuus ry 2023), joihin sisältyy energia- ja tehomaksut veroineen (polttoaineiden valmistevero ja ALV). Taulukossa 2.3 on esillä energiakustannusten laskennassa käytetyt hinnat. Esimerkkirakennuksina toimivien vanhainkotien energian hinnoissa ei käytetä arvonlisäveroa, koska niiden oletetaan olevan julkisten sosiaali- ja terveystalveluiden piirissä, jolloin ne eivät ole arvonlisäverovelvollisia.

**Taulukko 2.3.** Esimerkkirakennusten sähkön ja kaukolämmön kokonaishinnat. Muissa paitsi vanhainkotien hinnoissa on mukana arvonlisävero 24 %.

Rakennus	Sähkö (€/kWh)	Kaukolämpö (€/kWh)
80-luvun vanhainkoti	0,116 (ALV0%)	0,075 (ALV 0%)
uudisvanhainkoti	0,116 (ALV 0%)	0,075 (ALV 0%)
70-luvun kerrostalo	0,228	0,093
uudiskerrostalo	0,228	0,093
60-luvunpientalo	0,164	-
uudispientalo	0,188	-

Yliämpenemisen torjuntakeinojen investointikustannukset määritettiin useista eri lähteistä hankittujen hintatietojen mukaan, joilla pyritään kuvaamaan tutkimuksen tekoajan, eli vuoden 2023 hintatasoa. Hintatietoja hankittiin esimerkiksi tarjouspyyntöjen sekä suunnittelutoimistojen avulla sekä käyttäen rakennuskustannusindeksillä (Tilastokeskus 2023g) korjattua talonrakennuksen kustannustietoa (Haahtela & Kiiras 2015). Investointikustannusten laskennassa käytettiin lisäksi julkisesti saatavilla olevia tuotteiden myyntihintoja. Ilmalämpöpumppujen hintoja tutkittiin erikseen pelkästään jäädyttävien sekä jäädyttävien ja lämmittävien ilmalämpöpumppujen osalta. Kerrostaloissa käytettävien jäädyttävien ilmalämpöpumppujen hintoja tutkittiin toukokuussa 2023 myynnissä olevien 40 eri lämpöpumppumallin hintojen avulla. Hinnat sisältävät laitteen sekä asennuksen hinnan. Vastaavasti tutkittiin pientalossa käytettävien lämmittävien ja jäädyttävien ilmalämpöpumppujen hintoja 22 lämpöpumppumallin osalta. Kaikissa yliämpenemisen torjuntakeinojen investointikustannuksissa (kts. luku 5) on mukana laitekustannusten lisäksi myös asennuksen hinta ja arvonlisävero sillä poikkeuksella, ettei vanhainkotien investointikustannuksissa ole mukana arvonlisäveroa.

Yliämpenemisen torjuntakeinojen investointikustannuksia tarkasteltaessa on syytä korostaa sitä, että tässä tutkimuksessa esitettävät investointikustannukset ovat vain suuntaa antavia. Investointikustannukset käytännön kohteissa ovat aina tapauskohtaisia ja ne voivat poiketa merkittävästikin tässä tutkimuksessa esitetyistä kustannuksista.

### 2.3.2 Vaikuttavuus terveyshaittojen ehkäisyssä

Pientaloissa (omakoti- ja paritalo), rivitaloissa ja kerrostaloissa asuvien yli 65-vuotiaiden määrä vuonna 2018 arvioitiin Tilastokeskuksesta saatujen tietojen perusteella (taulukko 2.4). Ensin laskettiin maakunnan, talotyypin ja asutokunnan koon mukaan eritellyt lukumäärät asutokunnista, joissa vanhimman puolison ikä oli yli 65 vuotta (Tilastokeskus 2023e). Yli 65-vuotiaiden asutokunta-kohtaisen määrän arviointia varten johdettiin asutokunnan koko -kohtaiset kertoimet, jotka pohjautuivat perhetyypittäiseen tietoon siitä, kuinka monella yli 65-vuotiaalla iäkkäämmällä puolisoilla oli yli 65-vuotias nuorempi puoliso (Tilastokeskus 2023f). Tämän perusteella kahden hengen asutokunnista tällaisia pareja oli 82 % ja yli kahden hengen asutokunnista 61 %. Täten maakunta- ja talotyyppikohtainen arvio yli 65-vuotiaiden määrästä saatiin kaavalla:

$(1 \text{ hengen asutokuntien määrä}) \times 1 + (2 \text{ hengen asutokuntien määrä}) \times 1,8 + (3 \text{ hengen asutokuntien määrä}) \times 1,6 + (\text{yli } 3 \text{ hengen asutokuntien määrä}) \times 1,6$



Jakamalla yli 65-vuotiaiden määrä asuntokuntien määrällä saatiin asuntokunnan keskikoko, jota käytettiin arvioitaessa yli 65-vuotiaiden määrää asunnoissa, joissa oli ilmalämpöpumppu (70,3 % pientaloista, 30 % rivitaloasunnoista ja 4,4 % kerrostaloasunnoista, Lahdensivu ym. 2023) ja joissa ei.

**Taulukko 2.4.** Erityyppisissä asunnoissa (PT=pientalo, RT=rivitalo, KT=kerrostalo) asuvien yli 65-vuotiaiden määrä vuonna 2018 eriteltynä sen mukaan, onko asunnossa ilmalämpöpumppu vai ei.

Maakunta	Ilmalämpöpumppu			Ei ilmalämpöpumppua		
	PT	RT	KT	PT	RT	KT
Etelä-Karjala	12 382	1 234	524	5 231	2 879	11 384
Etelä-Pohjanmaa	22 740	2 454	255	9 607	5 726	5 541
Etelä-Savo	15 080	1 942	515	6 371	4 531	11 185
Kainuu	8 066	905	218	3 408	2 110	4 732
Kanta-Häme	14 623	1 721	637	6 177	4 016	13 839
Keski-Pohjanmaa	7 371	509	124	3 114	1 189	2 703
Keski-Suomi	22 143	2 814	840	9 355	6 566	18 260
Kymenlaakso	15 195	1 780	704	6 419	4 152	15 296
Lappi	19 538	1 535	425	8 255	3 582	9 243
Pirkanmaa	32 087	4 523	1 989	13 556	10 552	43 213
Pohjanmaa	16 579	1 109	473	7 005	2 589	10 276
Pohjois-Karjala	17 304	2 308	410	7 311	5 386	8 901
Pohjois-Pohjanmaa	31 788	3 740	832	13 429	8 727	18 077
Pohjois-Savo	21 329	2 818	895	9 011	6 575	19 451
Päijät-Häme	15 222	1 924	1 082	6 431	4 490	23 505
Satakunta	23 546	2 147	666	9 947	5 010	14 474
Uusimaa	62 583	9 577	7 228	26 440	22 346	157 050
Varsinais-Suomi	33 531	4 434	1 872	14 166	10 345	40 668
<b>Manner-Suomi</b>	<b>391 107</b>	<b>47 474</b>	<b>19 689</b>	<b>165 233</b>	<b>110 771</b>	<b>427 798</b>

Palvelutaloissa asuvien yli 65-vuotiaiden määrä maakunnittain vuonna 2018 saatiin Tilasto- ja indikaattoripankki Sotkanetistä (THL 2023a). Tiedot sisältävät tavallisen ja tehostetun palveluasumisen, terveyskeskusten pitkäaikaisasiakkaat sekä vanhainkodit (taulukko 2.5).

**Taulukko 2.5.** Palvelutaloissa asuvien yli 65-vuotiaiden määrä vuonna 2018.

<b>Maakunta</b>	<b>2018</b>
Etelä-Karjala	1 435
Etelä-Pohjanmaa	2 362
Etelä-Savo	1 996
Kainuu	1 071
Kanta-Häme	1 964
Keski-Pohjanmaa	662
Keski-Suomi	2 995
Kymenlaakso	2 296
Lappi	2 213
Pirkanmaa	4 765
Pohjanmaa	1 894
Pohjois-Karjala	2 132
Pohjois-Pohjanmaa	3 607
Pohjois-Savo	2 855
Päijät-Häme	2 204
Satakunta	2 971
Uusimaa	11 697
Varsinais-Suomi	5 226
<b>Manner-Suomi</b>	<b>54 345</b>

Tarkasteltaessa ilmalämpöpumpun asentamisen vaikutusta terveyshaittoihin helleaaltopäivistä vuonna 2018 aiheutuneiden kuolemien ja sairaalahoitojaksojen kokonaismäärä allokoitiin asuntoihin, joissa ei ole ilmalämpöpumppua. Allokointi tehtiin suhteuttaen kokonaismäärä erityyppisissä asunnoissa (pientalot, rivi- ja kerrostaloasunnot) asuvien yli 65-vuotiaiden väestömäärään. Kuolleisuuden osalta laskelmista poistettiin ensin sairaalan vuodeosastoilla tapahtuneet kuolemat, joita arvioitiin olevan 42 % kaikista kuolemista. Arvio perustuu epidemiologiseen tutkimukseen, jossa tarkasteltiin helleaaltoihin liittyvää kuolleisuusriskiä suomalaisissa kodeissa sekä sosiaali- ja terveydenhuollon hoiva- ja hoitolaitoksissa (Kollanus ym. 2021, Kollanus & Lanki 2021). Vuosina 2000–2014 hellekuolemista 30 % tapahtui sairaalan vuodeosastolla pitkäaikaishoidossa (yli 30 vuorokautta) olleiden ja 24 % tätä lyhyemmän ajan hoidossa olleiden potilaiden keskuudessa. Pitkäaikaishoidon kohdalla kaikkien hellekuolemien katsottiin johtuvan sairaaloiden vuodeosastojen olosuhteista. Lyhyempi-ajakaisten potilaiden kohdalla oletettiin, että puolet kuolemista johtui potilaan terveydentilan heikentymisestä kotona tai palvelutalossa tapahtuneen lämpöaltistumisen seurauksena.

Helteen vakavien terveyshaittojen taloudellisten kustannusten arvioinnissa huomioitiin sairaalahoitojaksoista aiheutuneet suorat kustannukset terveydenhuollolle. Suoriin kustannuksiin sisältyvät hoitojaksoon liittyvistä tutkimuksista, toimenpiteistä, lääkkeistä ja sairaalahoidosta aiheutuvat työvoiman, materiaalien ja tarvikkeiden sekä koneiden ja laitteiden välittömät kustannukset ja yleiskustannukset. Kustannusten laskenta perustui helteestä aiheutuneiden sairaalahoitojaksojen lukumäärään sekä somaattisen erikoissairaanhoidon ja perusterveydenhuollon vuodeosastohoidon yksikkökustannuksiin vuonna 2017 (Mäklin & Kokko 2020). Vuodelle 2017 määritetyt yksikkökustannukset muutettiin vuoden 2022 arvoon Tilastokeskuksen rahanarvonmuuntimen avulla. Yhden somaattisen erikoissairaanhoidon hoitojakson kustannukseksi arvioitiin 3 572 €, joka on keskimääräinen yksikkökustannus erikoissairaanhoidon sairaaloille (hoitojakson kesto keskimäärin noin 4 vuorokautta). Perusterveydenhuollon hoitojakson keskimääräiseksi kustannukseksi arvioitiin 4 917 €, joka perustui perusterveydenhuollon vuodeosastohoidon lyhytaikaisen, akuutin hoidon (alle 90 vrk) yksikkökustannukseen (403 € / hoitopäivä) ja perusterveydenhuollon vuodeosastohoidon keskimääräiseen hoitoaikaan vuonna 2018 (12,2 vuorokautta, THL 2023b). Yli 65-vuotiaiden vuodeosastohoitojaksoista 65 % arvioitiin olevan erikoissairaanhoidon ja 35 % perusterveydenhuollon hoitojaksoja. Arvio perustui Sotkanetin tietoihin somaattisen erikoissairaanhoidon ja perusterveydenhuollon hoitojaksojen määrästä yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä sekä Tilastokeskuksen tietoihin yli 65-vuotiaiden väestömäärästä vuonna 2018.

## 2.4 Ilmanvaihto ja hengitystieinfektioriski

### 2.4.1 Tartuntapohjainen ilmanvaihdon mitoitus Wells-Riley:n mallilla

Wells-Riley:n malli on yleisesti käytetty annos-vastemalli ilmaitse tapahtuvien virus-tartuntojen arviointia varten. Mallia voidaan käyttää erilaisille tartuntataudeille ottamalla huomioon kyseisen viruksen virusmäärän vaikutus tartuttavuuteen. Malli kuvaa eksponentiaalista annosvastetta käyttäen annoksen yksikkönä suhteellista ns. quanta arvoa. Yksi sisään hengitetty quanta-annos vastaa virusmäärää, jonka aiheuttama tartunnan todennäköisyys on 63 %. Laskennan edellytyksenä on tuntee tartuttajan uloshengittämä viruseritys eli virusmäärän tuotto aikayksikössä (quanta/h). Quanta arvot löytyvät kirjallisuudesta mm. flunssan, influenssan ja SARS-CoV-2 virusmuunnosten osalta. Malli on johdettu jatkuvuustilassa muotoon, jonka avulla voidaan laskea tiettyä tartuntatodennäköisyyttä vastaava ilmanvaihtomäärä, ottamalla huomioon myös muiden viruksen poistomekanismien, kuten suodatuksen ja UV-desinfioinnin, vaikutus (Kurnitski ym. 2021):

$$Q = \frac{(1-\eta_i)IqQ_b(1-\eta_s)D}{\ln\left(\frac{1}{1-p}\right)} - (\lambda_{dep} + k + k_f + k_{UV})V \quad (2.4)$$

$Q$	ulkoilmavirta ( $m^3/h$ )
$p$	altistuvan henkilön virustartunnan todennäköisyys (-)
$q$	tartuttajan viruseritys (quanta/(h hlö))
$Q_b$	hengityksen ilmavirta ( $m^3/h$ )
$I$	tartuttajien lukumäärä (-), yleensä $I = 1$
$\eta_s$	kasvomaskin erotusaste, altistuva henkilö, oletusarvo 0.3 (-)
$\eta_i$	kasvomaskin erotusaste, tautia levittävä henkilö, oletusarvo 0.5 (-)
$D$	oleskelun aika (h)
$\lambda_{dep}$	viruksen laskeutuminen pinnoille (1/h)
$k$	viruksen deaktivointi (1/h)
$k_f$	ilmanpuhdistimen suodatus (1/h)
$k_{UV}$	desinfiointi huoneen yläosan UVGI säteilyllä (1/h)
$V$	huoneen tilavuus ( $m^3$ )

Yhtälössä (2.4) oleva tartunnan todennäköisyyden hyväksyttävä taso voidaan arvioida oleskelun tartuttavuusluvun  $R$ -luvun perusteella, joka määritetään uusien tautitapausten ja tartuttajien suhteena  $R = N_c/I$ . Ottamalla huomioon, että uusien tapausten määrä on  $N_c = p N_s$ , hyväksyttävä henkilökohtainen tartunnan todennäköisyys voidaan laskea:

$$p = \frac{RI}{N_s} = \frac{RI}{(N-I)(1-f_v\eta_v)} \quad (2.5)$$

$R$	oleskelun tartuttavuusluku (-)
$N_c$	uusien tartuntatapausten määrä (-)
$N_s$	altistuvien henkilöiden määrä tilassa, $N_s = N - I$ mikäli rokotusta/immunitteettia ei oteta huomioon
$f_v$	rokotettujen osuus, $f_v = 0$ ilman rokotusta (-)
$\eta_v$	rokotteen tehokkuus, $\eta_v = 1$ täydelliselle suojaukselle (-)

Yksittäisen tilaisuuden oleskelun hyväksyttävä R-luku voidaan määrittää otaksumalla että tartunnan levittämiskyky muille (uusien tartuntojen määrä aikayksikössä) pysyy vakiona koko oireettoman taudin kautena (noin 2.5 vrk). Tällöin tartuttaja ei aiheuta enemmän, kun yhden uuden tartunnan oireettoman taudin kautena:

$$\frac{R}{R_0} \cong \frac{D}{D_{inf}} \implies R \leq \frac{D}{D_{inf}} \quad \text{mikäli } R_0 \leq 1 \quad (2.6)$$

$D$	oleskelun kesto, eli aika jolloin tartuttaja ja altistuvat henkilöt ovat samassa tilassa (h)
$D_{inf}$	koko aika jolloin tartuttaja on altistuvien henkilöiden läheisyydessä oireettoman taudin kautena (h)
$R_0$	perustartuttavuusluku joka kuvaa epidemian leviämistä väestössä (-)

Yhtälöillä (2.4–2.6) voidaan laskea tarkasteltavassa tilassa tarvittava ilmanvaihto, jolla oleskelun tartuttavuusluku  $R=1$ . Lähteessä (REHVA 2023) yhtälö (2.4) on linearisoitu (toimii hyvällä tarkkuudella alhaisilla tartunnan todennäköisyyksillä) ja sijoitettu eri tiloille tyypilliset lähtöarvot (mm. 4, 6 ja 10 quanta/h opetustiloissa, toimistoissa ja neuvotteluhuoneissa), jolloin saadaan taulukossa 2.6 esitetyt käyttökelpoiset ilmavirtayhtälöt. Nämä yhtälöt pätevät sekoittavan ilmanjaon sekä ilman kasvomaskeja ja ilmanpuhdistimia tilanteessa. Edellytyksenä on lähikontaktin välttäminen eli on pidettävä 1,5 m fyysistä etäisyyttä. Mikäli käytetään ilmanpuhdistimia, yhtälöt saavat taulukossa 2.7 esitetyn muodon.

**Taulukko 2.6.** Tartuntapohjainen ilmanvaihtomäärä (l/s) eri tiloissa (REHVA 2023) laskettuna henkilömäärästä  $N$  (-) ja huoneen tilavuudesta  $V$  (m<sup>3</sup>).

Tila	Ulkoilmavirta, L/s
Opetustila	$Q = 10(N-1) - 0.24V$
Toimisto	$Q = 23(N-1) - 0.24V$
Tuotantotila	$Q = 30(N-1) - 0.24V$
Neuvotteluhuone	$Q = 40(N-1) - 0.24V$
Ravintola	$Q = 40(N-1) - 0.24V$
Liikuntatila	$Q = 70(N-1) - 0.24V$

**Taulukko 2.7** Tartuntapohjainen ilmanvaihtomäärä ilmanpuhdistimilla (l/s) eri tiloissa (REHVA 2023) laskettuna henkilömäärästä  $N$  (-), ilmanpuhdistimen poistotehokkuudesta  $k_f$  (1/h) ja huoneen tilavuudesta  $V$  (m<sup>3</sup>).

Tila	Ulkoilmavirta, L/s
Opetustila	$Q = 10(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$
Toimisto	$Q = 23(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$
Tuotantotila	$Q = 30(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$
Neuvotteluhuone	$Q = 40(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$
Ravintola	$Q = 40(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$
Liikuntatila	$Q = 70(N-1) - (0.87+k_f)V/3.6$

Ilmanpuhdistimen poistotehokkuus  $k_f$  (1/h) lasketaan ilmapuhdistimen suodattimen läpi kulkevan ilmavirran  $Q_f$  (m<sup>3</sup>/h), suodattimen ePM1 erotusasteen  $\eta_f$  (-) ja huoneen tilavuuden  $V$  (m<sup>3</sup>) avulla:

$$k_f = \frac{Q_f \eta_f}{V} \quad (2.7)$$

HEPA suodattimella varustetun ilmanpuhdistimen tapauksessa, poistotehokkuus voidaan laskea ns. puhtaan ilman määrästä (clean air delivery rate, CADR, m<sup>3</sup>/h) seuraavasti:  $k_f = CADR/V$ .

Taulukossa 2.6 ja 2.7 esitetyt yhtälöt toimivat täydellisesti sekoittavan ilmanjaon tapauksessa, jolloin kaikkialla huoneessa ja myös poistoilmakanavassa on sama epäpuhtauspitoisuus. Todellisen ilmanjaon vaikutus otetaan huomioon epäpuhtauksien poistotehokkuudella, joka on määritetty pistemäisellä epäpuhtauslähteellä:

$$Q_s = \frac{Q}{\varepsilon_b} \quad (2.8)$$

$Q_s$  ilmavirta todellisella ilmanjaolla (L/s)

$\varepsilon_b$  pistemäisen lähteen epäpuhtauksien poistotehokkuus hengitysvyöhykkeellä (-)

Epäpuhtauksien poistotehokkuuden mittaus pistemäisellä lähteellä on opastettu lähteessä (REHVA 2023).

## 2.4.2 Merkkiainemittaukset kenttäkohteissa

Tutkimukseen valituissa tiloissa, jotka ovat erikokoiset opetustilat, avotoimisto, neuvotteluhuone, liikuntasali ja kuntosali, toteutettiin epäpuhtauksien poistotehokkuuden mittaukset merkkiainemenetelmällä. Pistemäisen lähteen epäpuhtauksien poistotehokkuuden  $\varepsilon_b$  kuvaa ilmanvaihdon tehokkuutta virustartunnan leviämistä vastaavassa tilanteessa, jossa tilassa on yksi (tai muutama) tartuttaja. Se poikkeaa tavanomaisesta epäpuhtauksien poistotehokkuudesta  $\varepsilon_v$ , joka määritetään tasaisesti jakautuneella lähteellä poistoilman ja hengitysvyöhykkeen pitoisuuden suhteena. Suurissa tiloissa, jossa epäpuhtauslähteinä toimivat kaikki henkilöt, saavutetaan yleisesti käytetyllä sekoittavalla ilmanjaolla likimain  $\varepsilon_v=1$ . Pistemäisen lähteen tapauksessa tilanne on erilainen, koska korkean pitoisuuden vyöhyke muodostuu yleensä lähteen läheisyyden ja kauempana pitoisuus laskee. Sen takia suurissa tiloissa yleensä  $\varepsilon_b < 1$ , ja mittaus toteutettiin REHVA:n ohjeistuksen mukaisesti vähintään kahdella epäpuhtauslähteen sijainnilla (REHVA 2023).

Merkkiaineena käytettiin CO<sub>2</sub> kaasua, joka syötettiin kaasupullosta virtausmittarin läpi letkulla henkilöä kuvaavaan ilmanvaihtokanavasta valmistettuun lämmitettyyn nukkeen (kuvio 2.7). Tällä syöttötavalla ei yritetä kuvata uloshengitystä, mutta tähdätään siihen, että nukessa sekoittunut merkkiaine tulee huoneilmaan istuvan henkilön hengityskorkeudelta, jolloin lähivyöhykkeen (n. 1 m) jälkeen merkkiainepitoisuus ilmassa kuvaa todenmukaisesti uloshengitettyjä aerosoleja.

**Kuva 2.7** Merkkiaineen syöttö henkilöä kuvaavaan lämmitettyyn nukkeen. Merkkiaineletku oli suunnattu nukessa alaspäin, jotta saavutettaisiin tehokas sekoittuminen.



Merkkiainetta syötettiin vakiotilavuusvirralla määrä, jolla saatiin aikaan mittaustarkkuuden kannalta riittävät jatkuvuustilan hiilidioksidipitoisuudet 1 000–1 500 ppm, joista vähennettiin ulkoilman pitoisuus. Mittauksen kesto määräytyi jatkuvuustilan saavuttamiseksi tarvittavan noin kolmen aikavakion (esim. luokkahuoneissa 5 1/h ilmanvaihtokertoimen tapauksessa  $3 \times 1/5 = 0,6$  h) ja sen jälkeisen n. 10 min tasaantuneiden pitoisuuksien mittausjakson perusteella.

Mittauksissa oli käytössä 18 oleskelua kuvaava lämpönukkea. 30 CO<sub>2</sub> mittauspistettä (pienemissä tiloissa vähemmän) oli sijoitettu 1,1 m korkeudelle henkilöiden sijaintia kuvaaviin paikkoihin, jonka lisäksi pitoisuudet mitattiin myös poistoilmakanavasta.

Mittausten aikana kohteiden tarpeenmukaiset ilmanvaihtojärjestelmät asetettiin toimimaan mitoitusilmavirtatilaan, jossa ilmamäärät vastaavat suunniteltuja ilmavirtoja täyden henkilökuormituksen tilanteessa. Tuloilman lämpötila oli kaikissa mittauksissa n. kaksi astetta alle huonelämpötilan, jolloin käytettyjen ilmanjakoratkaisujen pitäisi toimia sekoittavalla ilmanjaolla tasaisesti jakaantuneiden epäpuhtauslähteiden (kaikista



henkilöistä) tapauksessa. Merkkiainemittaus kuvaa siitä poikkeava tilannetta yksittäisen tartuttajan tapauksessa, jossa pistemäisen lähteen sijainnilla on suuri merkitys tuloksiin. Kaikkien tilojen mittaukset suoritettiin tämän vuoksi kahdella epäpuhtauslähteen sijainnilla, jonka valinnassa vältettiin epäpuhtauslähteen sijoittamista suoraan poistopisteen alapuolelle. Kuntosaliin tapauksessa yksi mittaus suoritettiin tarkoituksellisesti sijoittamalla epäpuhtauslähte poistopisteen alapuolella, jotta tämän merkitys voitaisiin havainnollistaa.

### 2.4.3 CFD- simuloinnit

Tutkimuksessa käsitellyjä tiloja mallinnettiin käyttäen CFD-virtauslaskentaa. Laskentaohjelmistona toimi ANSYS CFX ja tulokset jälkikäsiteltiin ANSYS CFD-Post -ohjelmalla. Mallinnukset tehtiin ajasta riippumattomalla RANS-menetelmällä (Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulation), jossa virtauskenttä aikakeskiarvoistetaan.

Laskennan reunaehdot saatiin yhdistettyyn opetustilaan sekä kuntosaliin kenttämittauksista, kun taas pienen opetustilan ja avotoimiston kohdalla ne arvioitiin tiloille tyyppillisiksi. Ilmanjako oli kaikissa tutkituissa tiloissa toteutettu pyörrevirtahajottajilla, joita mallinnettiin tätä tarkoitusta varten vasten luodulla Halton Oy:n tuotetietoihin perustavalla laskentamallilla.

Ihmismalleina toimivat sylinterinmuotoiset lämmitetyt lieriöt. Ihmisten uloshengitys toteutettiin lieriöön tehdyllä halkaisijaltaan 3 cm olevalla suuaukolla, ja koska käytössä oli ajasta riippumaton laskenta, hengitys oli jatkuvaa. Todellisuudessa suun/sierainten keskimääräinen halkaisija hengitettäessä on n. 1 cm, mutta mallinnetut tilat olivat kooltaan niin suuria, että pieni virtausaukko aiheutti ongelmia laskennassa. Uloshengityksen tilavuusvirta oli 6 l/s ja sen nopeus saatiin vastaamaan todellisuutta kiihdyttämällä virtaus oikeaan suuruusluokkaan (~1 m/s) sen tultua suusta ulos.

Sairas henkilö mallinnettiin siten, että tämän uloshengitykseen lisättiin dimensioton taudinaiheuttajapitoisuus. Tämä pitoisuus normalisoitiin kussakin laskentatapauksessa olemaan uloshengityksessä tasan yksi, jolloin pitoisuudet muualla tilassa antavat suoraan suhteellisen osuuden verrattuna taudinaiheuttajalähteeseen.

## 2.5 Virusmäärän merkitys yksilön tartunnan saamisen ja terveyden kannalta

Virusmäärän merkitystä tartunnan saamiseen ja sairauden vaikeusasteeseen arvioitiin kirjallisuuskatsauksen avulla. Virusten erittäin suuren lukumäärän ja erilaisten ominaisuuksien vuoksi valittiin esimerkkiviruksiksi influenssavirus, joka on aiheuttanut vuosittaisia epidemioita jo pitkään sekä uusi SARS-CoV-2 –virus, joka aiheutti vuodesta 2020 alkaen koronapandemian. Kirjallisuushaku tehtiin PubMed-tietokannasta, joka sisältää kattavasti lääketieteelliset julkaisut. Koronaviruksen tapauksessa suljettiin pois aivan pandemian alussa (v. 2020) tehdyt julkaisut, joissa tutkimusten potilasmäärä jäi vähäiseksi eivätkä tulokset ole luotettavia. Koronatautiin liittyvien julkaisujen suuren kokonaismäärän vuoksi keskityttiin systemaattisiin katsausartikkeleihin. Influenssaviruksen määrän merkityksen selvittämiseen ei käytetty vuosirajoja. Myös influenssasta on julkaistu suuri määrä artikkeleita, joten katsaukseen otettiin pääosin systemaattisia katsausartikkeleita tai kokooma-artikkeleita, mutta yksittäisiä hyvälaatuisia, suuren potilasmäärän omaavia tutkimuksia ei suljettu pois.

## 2.6 Hengitystieinfektoriskin alentamiseksi tehtyjen toimien vaikutus kansanterveyden ja väestön sairastumisen kannalta

Influenssaan ja muihin hengitystieinfektioihin liittyvien terveydenhuollon kontaktien määrittämiseen käytettiin Terveyden ja hyvinvoinnin laitoksen avoimen datan tietokuitoita. Käyntimäärien haussa käytettiin ICD-10 -koodeja J09-J11 vuosilta 2018–2022. [https://sampo.thl.fi/pivot/prod/fi/epirapo/respincare/fact\\_epirapo\\_respincare](https://sampo.thl.fi/pivot/prod/fi/epirapo/respincare/fact_epirapo_respincare). Influenssa A- tapaukset haettiin ikäryhmittäin, sekä erikseen maakunnittain vuosilta 1995–2022 tartuntatautirekisterin avoimen datan kuutioista (<https://thl.fi/fi/tilastot-ja-data/ohjeet-tietojen-toimittamiseen/perusterveydenhuollon-avohoidon-hoitoilmoitus-avohilmo/raportit>) mutta tähän raporttiin käytettiin vain lähivuosien tilastoja selkeyden vuoksi.

Hoitokustannusten laskentaan käytettiin Terveyden- ja sosiaalihuollon yksikkökustannukset Suomessa vuonna 2017 -julkaisua (Mäklin & Kokko 2020).

Kuolleisuusarviossa käytettiin Tilastokeskuksen Kuolleet-tilastoa ja StatFin-tietokantaa. Lisäksi ylikuolleisuuden arvioinnissa hyödynnettiin EuroMOMO (European mortality monitoring activity) tilastoja ja kuvaajia.

## 2.7 Hengitystieinfektion kansanterveydellinen merkitys

Hengitystieinfektioiden aiheuttamien kustannusten, sairastavuuden ja kuolleisuuden tarkastelussa keskityttiin influenssaviruksen ja COVID-19 -viruksen vaikutuksiin. Menetelminä käytettiin kirjallisuushakua (PubMed), THL:n edellä mainittuja tilastotietoja ja tietokuutioita sekä ja EuroMOMO:n kuolleisuustietoja (euromomo.eu).

## 3 Rakennusten yllämpeneminen

### 3.1 Simulointitapaukset

Lämpöolojen ja energiankulutuksen simulointitutkimuksessa käytettiin kolmea eri rakennustyyppiä: vanhainkoti, asuinkerrostalo ja pientalo. Kustakin rakennustyyppistä simuloitiin sekä olemassa olevaa rakennuskantaa sekä uudiskohdetta kuvaava esimerkkirakennus. Simuloidut rakennukset sijaitsevat Vantaan lähiöalueella, jossa kunkin rakennuksen ympärillä oletettiin olevan samanlaisia rakennuksia tyyppillisten varjostusolosuhteiden huomioon ottamiseksi. Kunkin rakennuksen suuntaus valittiin siten, että ikkuna-alaltaan suurin julkisivu suuntautuu etelään.

Olemassa olevaa rakennuskantaa kuvaavien esimerkkirakennusten osalta oletettiin, ettei niihin ole tehty energiakorjauksia ja rakennusten ominaisuudet sekä talotekniset järjestelmät ja niiden ominaisuudet vastaavat kunkin kohteen suunnitteluajan käytäntöjä tai rakentamismääräysten vaatimuksia. Uudiskohteet täyttävät nykyiset rakentamismääräykset ja uudisvanhainkoti sekä uudiskerrostalo täyttävät niitä koskevan kestäväikäisen huonelämpötilan 150 astetunnin vaatimuksen 25 °C ja 27 °C ylittävien huonelämpötilojen osalta (Ympäristöministeriö, 2017). Sekä vanhojen rakennusten että uusien esimerkkirakennuksen ilmanvaihdon ilmamäärät mitoitettiin huonekohtaisesti ja uudisrakennusten ilmamäärät täyttävät FINVAC ry:n julkaisemat ilmanvaihdon suositukset (FINVAC 2019, FINVAC 2020). Esimerkkirakennukset simuloitiin käyttäen tässä tutkimusosiossa huonekohtaisesti määriteltyjä tunnittaisia valaistuksen ja huonelaitteiden käyttöprofiileja, jotka kuvaavat kunkin rakennustyyppin normaalia käyttöä. Vuotuiset rakennusten sisävalaistuksen ja huonelaitteiden lämpökuormat vastaavat nykyisten rakentamismääräysten ohjeistoja (Ympäristöministeriö, 2017).

Aktiivisella jäähdytyksellä varustettujen esimerkkirakennusten huonelaitteiden jäähdytystehon mitoitus valittiin suhteellisen korkeaksi (45 W/m<sup>2</sup>), koska jäähdytystehon hallittiin varmasti riittävän huonelämpötilojen hallintaan myös tulevaisuuden ilmastoa tutkivissa simulointitapauksissa. Koska simulointitapauksilla tutkittiin ilmastonmuutoksen vaikutusta jäähdytystarpeeseen, tulee lämpöolojen olla vertailukelpoisia kaikissa aktiivisella jäähdytyksellä varustetuissa tapauksissa riippumatta ilmasto-oloista.

### 3.1.1 Vanhainkodit

Olemassa olevaa rakennuskantaa kuvaavaa 80-luvun vanhainkotia ja uudisvanhainkotia kuvataan pohjaratkaisultaan ja muodoltaan samanlaisella 5-kerroksisella rakennuksella, jonka lämmitetty nettoala on 4 068 m<sup>2</sup> (kuva 5.1). Molemmissa rakennuksissa vanhuksat asuvat yhdelle hengelle tarkoitetuissa noin 25 m<sup>2</sup>:n asunnoissa ja lisäksi rakennuksissa on yhteiskäyttöön tarkoitettuja tiloja. Molemmat rakennukset ovat betonirakenteisia, mutta niiden vaipan ominaisuudet kuten lämmöneristystaso, ilmanpitävyys, ikkuna-alat ja taloteknisten järjestelmien ominaisuudet poikkeavat toisistaan. Molemmat rakennukset lämpiävät kaukolämmöllä ja lämmönjako on toteutettu vesiradiaattoreilla. Tilojen lämmityksen asetusarvo on 23 °C eikä huonelämpötiloja päästetä laskemaan sen alapuolelle myöskään kesällä.

**Kuva 3.1.** Vanhainkodin IDA ICE simulointimalli.



#### 80-luvun vanhainkoti

80-luvun vanhainkoti on varustettu perustapauksessa kirkkailla 3-lasisilla ikkunoilla, joiden U-arvo on 2,1 W/m<sup>2</sup>,K ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,68. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 27 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,29 W/m<sup>2</sup>,K ja vaipan ilmavuotoluku q<sub>50</sub> on 6 m<sup>3</sup>/h,m<sup>2</sup>. Rakennus on varustettu perustapauksessa vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmällä ja yhden hengen asuntojen tulo- ja poistoilmavirrat ovat 18 dm<sup>3</sup>/s,asunto (0,76 dm<sup>3</sup>/s,m<sup>2</sup>). Poiketen muista rakennustyypeistä, 80-luvun vanhainkodin tilojen mitoitussilmämäärien oletetaan olevan yhtä suuria kuin uudisvanhainkodin mitoitussilmämäärät. Perustapauksessa rakennuksessa ei ole aktiivista ilmanvaihdon tai tilojen jäähdystystä ja ilmanvaihdon tuloilman sisänpuhalluslämpötila on 19 °C tai korkeampi ulkoilman lämpötilasta riippuen.

Taulukossa 3.1 kuvataan 80-luvun vanhainkodin simulointitapaukset. Perustapauksessa sekä tapauksissa, joissa kaihtimet on käytössä, ne on asennettu uloimpaan lasiväliin ja kaihtimet on käytössä, kun auringon säteily ikkunalasin sisäpinnalla ylittää  $50 \text{ W/m}^2$ . Auringonsuojakalvoilla varustetussa tapauksessa 2, ei käytetä kaihtimia. Siinä tapauksessa väritön auringonsuojakalvo on asennettu alkuperäisten ikkunoiden uloimman lasin ulkopinnalle ja kalvon vaikutuksesta ikkunoiden auringon kokonaisläpäisykerroin (g-arvo) vähenee arvosta 0,68 arvoon 0,37, eli noin 46 %. Tapauksessa 3 rakennuksen etelän ja lännenpuoleisille julkisivuille asennetaan uudet auringonsuojalaseilla varustetut MSE-ikkunat ( $g = 0,19$ ) ja muille julkisivuille hieman vähäisemmällä auringonsuojauksella varustetut uudet MSE-ikkunat ( $g = 0,36$ ). MSE-ikkuna on 2-puitteinen 3-lasinen ikkuna, jonka sisemmässä puitteessa on 2-lasinen umpiolasielementti.

Tapauksissa, joissa käytetään ilmanvaihdon tehostusta, ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan kesäkuukausien aikana (1.5.–1.9.) tapauksesta riippuen joko 30 % tai 60 % perustapaukseen verrattuna. Tapauksissa 4 ja 5 ilmanvaihtoa tehostetaan kesällä jatkuvasti ja tapauksessa 6 kesällä vain yöaikaan klo 22–06 välisenä aikana. Tapauksessa 7 käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä ja kuhunkin oleskelutilaan ja asuntoon on asennettu jäähdyttävä huonelaite, jonka jäähdytyksen mitoitusteho on  $45 \text{ W/m}^2$ . Tilojen jäähdytyksen asetusarvo on  $25 \text{ °C}$ . Jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0, joten tapauksella voidaan kuvata tyypillistä ilmalauhdutteista jäähdytysjärjestelmää.

**Taulukko 3.1.** 80-luvun vanhainkodin simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Käytössä kaihtimet. Ei aktiivista jäähdytystä ilmanvaihdossa tai tiloissa eikä avattavia tuuletusikkunoita. Kon. tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä ja tuloilman min. lämpötila vakio $19 \text{ °C}$ .
2. Auringonsuojakalvo	Kuin perustapaus, mutta uloimpien ikkunalasien ulkopinnalle on asennettu auringonsuojakalvo.
3. Uudet auringonsuojaikkunat	Kuin perustapaus, mutta uudet auringonsuojalaseilla varustetut ikkunat etelä- ja länsijulkisivuilla sekä tavalliset uudet ikkunat muilla julkisivuilla.
4. IV-tehostus 30 %	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan 30% kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.

Tapaukset	Kuvaus
5. IV-tehostus 60 %	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan 60% kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
6. IV-yötehostus 30 %	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan 30% kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana yöaikaan klo 22–06.
7. IV-yötehostus 60 %	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan 60% kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana yöaikaan klo 22–06.
8. Tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä tilojen aktiivinen jäähdytys.

## Uudisvanhainkoti

Uudisvanhainkoti on varustettu MSE-tyyppisillä auringonsuojaikkunoilla, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,19 kaikissa simulointitapauksissa etelän- ja lännenpuoleisten julkisivujen osalta. Muiden julkisivujen ikkunoissa käytetään MSE-ikkunoita, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,36. Molempien ikkunatyyppeiden U-arvo on 1,0 W/m<sup>2</sup>,K. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 17 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,17 W/m<sup>2</sup>,K ja vaipan ilmavuotoluku q<sub>50</sub> on 2 m<sup>3</sup>/h,m<sup>2</sup>.

Rakennus on varustettu perustapauksessa vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmavaihtojärjestelmällä ja yhden hengen asuntojen tulo- ja poistoilmavirrat ovat 18 dm<sup>3</sup>/s, asunto (0,76 dm<sup>3</sup>/s,m<sup>2</sup>) samoin kuin 80-luvun vanhainkodissa. Koska rakennus on suunniteltu nykyisten rakentamismääräysten mukaisesti, kesäaikaisiin huonelämpötiloihin liittyvän määräyksen täyttäminen edellyttää aktiivisen jäähdytyksen käyttöä ilmanvaihdossa jokaisessa simuloitussa tapauksessa. Perustapauksen mukaisissa tapauksissa tuloilman sisänpuhalluslämpötila on 17 °C kesäolosuhteissa.

Taulukossa 3.2 kuvataan uudisvanhainkodin simulointitapaukset. Perustapauksessa passiivisina auringonsuojaratkaisuuina käytetään sekä uloimpaan lasiväliin asennettuja kaihtimia että auringonsuojalaseja ja aktiivista ilmanvaihdon jäähdytystä. Perustapaus täyttää rakentamismääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen, jonka mukaan huonetilojen simuloitu lämpötila ei saa ylittää 25 °C:tta yli 150 astetuntia, kun tapaus simuloidaan määräysten mukaisella vakioidulla käytöllä ja Etelä-Suomen keskimääräisiä sääolosuhteita kuvaavalla Vantaan energialaskennan testivuodella 2012 (Ympäristöministeriö 2017).

Simuloiduissa tapauksissa kaihtimia käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin 80-luvun vanhainkodissa. Tapauksissa, joissa käytetään ilmanvaihdon tehostusta, ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan jatkuvasti kesäkuukausien aikana (1.5.–1.9.) tapauksesta riippuen joko 30 % tai 60 % perustapaukseen verrattuna. Tapauksessa 6, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä, kuhunkin oleskelutilaan ja asuntoon on asennettu samanlainen jäähdyttävä huonelaite kuin 80-luvun vanhainkodissa ja tilojen jäähdytyksen asetusarvo on 25 °C. Jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0 sekä ilmanvaihdon että tilojen jäähdytyksen osalta.

**Taulukko 3.2.** Uudisvanhainkodin simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Ikkunoissa kaihtimet ja ilmanvaihdon tuloilman aktiivinen jäähdytys. Kon. tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä ja tuloilman lämpötila kesällä 17 °C. Auringonsuojalasit etelä- ja länsifasadeilla. Ei avattavia tuuletusikkunoita.
2. Aurinkolippa	Kuin perustapaus, mutta käytössä 1 m syvä vaakalippa etelän ja lännenpuoleisten ikkunoiden yläpuolella aurinkosuojana.
3. IV-tehostus 30%	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan 30 % kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
4. IV-tehostus 60%	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan 60 % kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
5. Tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä tilojen aktiivinen jäähdytys.

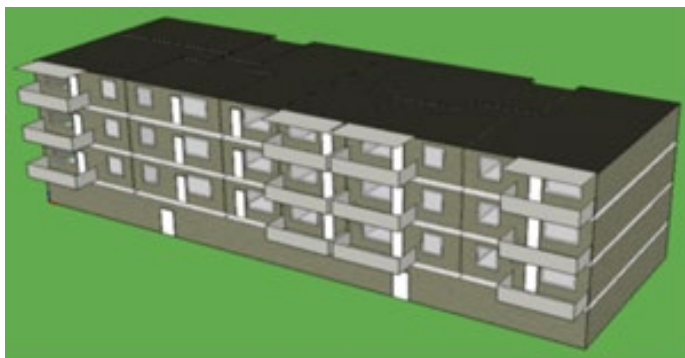
## 3.1.2 Kerrostalot

### 70-luvun kerrostalo

70-luvun asuinkerrostaloa kuvataan 4-kerroksisella betonirakenteisella kerrostalolla, jonka lämmitetty nettoala on 2 596 m<sup>2</sup> (kuva 3.2). Rakennuksen kussakin kolmessa asuinkerroksessa on 7 huoneistoa, joiden pinta-alat vaihtelevat 34,5 m<sup>2</sup> (yksiö) ja 117 m<sup>2</sup> (4h+k) välillä.



**Kuva 3.2.** 70-luvun kerrostalon IDA ICE simulointimalli.



70-luvun kerrostalo on varustettu kirkailla 3-lasisilla ikkunoilla, joiden U-arvo on  $1,9 \text{ W/m}^2, \text{K}$  ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,68. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 13 %. Ulkoseinien U-arvo on  $0,33 \text{ W/m}^2, \text{K}$  ja vaipan ilmavuotoluku  $q_{50}$  on  $6 \text{ m}^3/\text{h}, \text{m}^2$ . Rakennus on varustettu perustapauksessa va-  
kioilmavirtaisella koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä ja koko rakennuksen il-  
manvaihtuvuus on 0,51 1/h. Rakennus lämpiää kaukolämmöllä ja lämmönjako on to-  
teutettu vesiradiaattoreilla. Tilojen lämmityksen asetusarvo on  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  paitsi märkäti-  
loissa, joissa asetusarvo on  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Taulukossa 3.3 kuvataan 70-luvun kerrostalon simulointitapaukset. Perustapauksessa sekä tapauksissa, joissa kaihtimet on käytössä, ne on asennettu uloimpaan lasiväliin ja kaihtimia käytetään samalla periaatteella kuin vanhainkodeissa. Auringonsuojakalvoilla varustetussa tapauksessa 2 ei käytetä kaihtimia ja tapauksessa käytetään samanlaista ja samalla tavalla asennettua auringonsuojakalvoa kuin 80-luvun vanhain-  
kodissa. Auringonsuojakalvolla varustettujen ikkunoiden g-arvo on 0,37. Tapauk-  
sessa 3 alkuperäiset ikkunat korvataan uusilla MSE-ikkunoilla, joiden g-arvo on 0,36. Tapauksessa 4 etelän ja lännenpuoleisille julkisivuille asennetaan auringonsuojalasilla varustetut MSE-ikkunat ( $g = 0,19$ ) ja muille julkisivuille samalaiset MSE-ikkunat, kuin tapauksessa 3.

Tapauksessa 5, jossa käytetään ilmanvaihdon tehostusta, ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) kesäkuukausien aikana (1.5.–1.9.) 30% perusta-  
paukseen verrattuna. Tapauksessa 6, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä, kunkin asunnon olohuoneeseen on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu, jonka jäähdytyksen mitoitusteho on  $45 \text{ W/m}^2$ . Jäähdytyksen asetusarvo on  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  ja jäähdy-  
tyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0. Kaikissa taulukon 3.3 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki, joka vähentää tilojen vä-  
lisiä lämpötilaeroja. Väliovien ollessa auki, olohuoneessa sijaitseva ilmalämpöpumpun sisäyksikkö voi jäähdyttää myös makuuhuoneita tai muita tiloja.

**Taulukko 3.3.** 70-luvun kerrostalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Käytössä kaihtimet ja kon. poistoilmanvaihtojärjestelmä. Ei avattavia tuuletusikkunoita tai aktiivista jäähdytystä.
2. Auringonsuojakalvo	Kuin perustapaus, mutta uloimpien ikkunalasien ulkopinnalle on asennettu auringonsuojakalvo.
3. Uudet ikkunat	Kuin perustapaus, mutta alkuperäiset ikkunat on korvattu uusilla perustason ikkunoilla.
4. Uudet auringonsuojaikkunat	Kuin perustapaus, mutta uudet auringonsuojalaseilla varustetut ikkunat etelä- ja länsijulkisivuilla sekä uudet perustason ikkunat muilla julkisivuilla.
5. IV-yötehostus 30%	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) 30% kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
6. Tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä tilojen aktiivinen jäähdytys.

## Uudiskerrostalo

Uudisasuinkerrostaloa kuvataan 4-kerroksisella betonirakenteisella kerrostalolla, jonka lämmitetty nettoala on 1 944 m<sup>2</sup> (kuva 3.3). Rakennuksen kussakin kolmessa asuinkerroksessa on 5 huoneistoa, joiden pinta-alat vaihtelevat 35 m<sup>2</sup> (yksiö) ja 96 m<sup>2</sup> (4h+k) välillä.

**Kuva 3.3.** Uudiskerrostalon IDA ICE simulointimalli.

Uudiskerrostalo on varustettu MSE-tyyppisillä auringonsuojaikkunoilla, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,19 kaikissa simulointitapauksissa etelän- ja lännenpuoleisten julkisivujen osalta. Muiden julkisivujen ikkunoissa käytetään MSE-ikkunoita, joiden kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,36. Molempien ikkunatyyppien U-arvo on 1,0 W/m<sup>2</sup>,K. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 14 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,17 W/m<sup>2</sup>,K ja vaipan ilmavuotoluku q<sub>50</sub> on 2 m<sup>3</sup>/h,m<sup>2</sup>.

Rakennus on varustettu keskitetyllä koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä, jonka tuloilmakanavat on lämmöneristetty kanavistossa tapahtuvan tuloilman lämpenemisen estämiseksi. Koko rakennuksen ilmanvaihtuvuus on 0,55 1/h ja kaikkien makuuhuoneiden tuloilmavirta on 12 dm<sup>3</sup>/s ilmanvaihdon normaalilla käyttönopeudella. Ilmanvaihtoa tehostetaan 30 % kesällä (1.6.–31.8.) yöaikaan (klo 22–06). Lisäksi kesällä lasketaan ilmanvaihdon tuloilman minimisisäänpuhalluslämpötilaa normaalista asetusarvosta (17 °C) 14 °C:een. Rakennus lämpiää kaukolämmöllä ja lämmönjako on toteutettu vesiradiaattoreilla. Tilojen lämmityksen asetusarvo on 21 °C paitsi märkätiloissa, joissa asetusarvo on 23 °C.

Taulukossa 3.4 kuvataan uudiskerrostalon simulointitapaukset. Perustapauksessa passiivisina auringonsuojaratkaisuuksina käytetään sekä uloimpaan lasiväliin asennettuja kaihtimia sekä auringonsuojalaseja, mutta tapauksessa ei käytetä aktiivista jäähdytystä. Perustapaus täyttää rakentamismääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen, jonka mukaan huonetilojen simuloitu lämpötila ei saa ylittää 27 °C:tta yli 150 astetuntia, kun tapaus simuloidaan määräysten mukaisella vakioidulla käytöllä ja Etelä-Suomen keskimääräisiä sääolosuhteita kuvaavalla Vantaan energialaskennan testivuodella 2012 (Ympäristöministeriö, 2017).

Simuloiduissa tapauksissa kaihtimia käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin 70-luvun kerrostalossa. Tapauksessa 3. ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) kesäkuukausien aikana (1.5.–1.9.) 60% perustapauksessa käytetyn 30%:n tehostuksen sijaan. Tapauksessa 4, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä, kunkin asunnon olohuoneeseen on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu, jonka jäähdytyksen mitoitusteho on 45 W/m<sup>2</sup> ja jäähdytyksen asetusarvo 23 °C. Jäähdytyksen vuotuinen kylmäkerroin on 3,0 sekä ilmanvaihdon että tilojen jäähdytyksen osalta. Kaikissa taulukon 3.4 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki.

**Taulukko 3.4.** Uudiskerrostalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Kaihtimet ikkunoissa ja auringonsuojalasit etelä- ja länsifasadeilla. Ei aktiivista jäähdytystä eikä avattavia tuuletusikkunoita. Kon. tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä ja kesällä tuloilman min. lämpötila 15 °C ja käytössä yöaikainen 30 % ilmanvaihdon tehostus.
2. Aurinkolippa	Kuin perustapaus, mutta käytössä 1m syvä vaakalippa etelän, lännen, ja idänpuoleisten ikkunoiden yläpuolella aurinkosuoja.
3. IV-yötehostus 60%	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) 60 % kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
4. Tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä tilojen aktiivinen jäähdytys.

### 3.1.3 Pientalot

#### 60-luvun pientalo

60-luvun pientaloa kuvataan 1-kerroksisella puurunkoisella maavaraisella betonirakenteisella alapohjalla varustetulla pientalolla, jonka lämmitetty nettoala on 135 m<sup>2</sup> (kuva 3.4). Pientalo on varustettu kirkkailla 2-lasisilla ikkunoilla, joiden U-arvo on 2,9 W/m<sup>2</sup>,K ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) on 0,76. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 12 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,50 W/m<sup>2</sup>,K ja vaipan ilmavuotoluku q<sub>50</sub> on 6 m<sup>3</sup>/h,m<sup>2</sup>. Rakennus on varustettu perustapauksessa vakioilmavirtaisella koneellisella poistoilmanvaihtojärjestelmällä ja koko rakennuksen ilmanvaihtuvuus on 0,50 1/h. Rakennuksessa on suora sähkölämmitys radiaattoreilla toteutettuna ja tilojen lämmityksen asetusarvo on 21 °C paitsi märkätiloissa, joissa asetusarvo on 23 °C.

**Kuva 3.4.** 60-luvun pientalon IDA ICE simulointimalli.



Taulukossa 3.5 kuvataan 60-luvun pientalon simulointitapaukset. Perustapauksessa sekä tapauksissa, joissa käytetään kaihtimia, ne on asennettu ikkunalasien väliin. Simuloiduissa tapauksissa kaihtimia käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin muissakin esimerkkirakennuksissa.

Auringonsuojakalvoilla varustetussa tapauksessa 2, ei käytetä kaihtimia ja tapauksessa käytetään samanlaista ja samalla tavalla asennettua auringonsuojakalvoa kuin 80-luvun vanhainkodissa. Auringonsuojakalvolla varustettujen ikkunoiden g-arvo on 0,41. Tapauksessa 3, alkuperäiset ikkunat korvataan uusilla MSE-ikkunoilla, joiden g-arvo on 0,36. Tapauksessa 4, etelän ja lännenpuoleisille julkisivuille asennetaan auringonsuojalasilla varustetut MSE-ikkunat ( $g = 0,19$ ) ja muille julkisivuille samalaiset MSE-ikkunat, kuin tapauksessa 3.

Tapauksessa 5, jossa käytetään ilmanvaihdon tehostusta, ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) kesäkuukausien aikana (1.5.–1.9.) 30% perustapaukseen verrattuna. Tapauksessa 6, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä, talon olohuoneeseen on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu, jonka jäähdytyksen mitoitusteho on  $45 \text{ W/m}^2$ . Jäähdytyksen asetusarvo on  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  ja jäähdytyksen vuotuisen kylmäkerroin on 3,0. Kaikissa taulukon 3.5 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki.

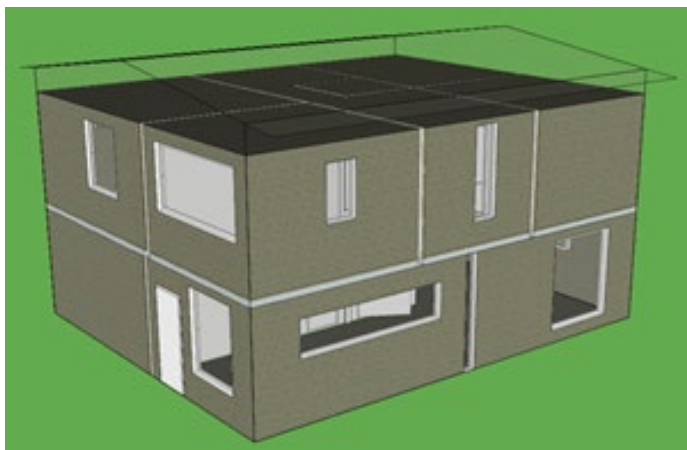
**Taulukko 3.5.** 60-luvun pientalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Käytössä kaihtimet ja kon. poistoilmanvaihtojärjestelmä. Ei aktiivista jäähdytystä eikä avattavia tuuletusikkunoita.
2. Auringonsuojakalvo	Kuin perustapaus, mutta uloimpien ikkulasien ulkopinnalle on asennettu auringonsuojakalvo.
3. Uudet ikkunat	Kuin perustapaus, mutta alkuperäiset ikkunat on korvattu uusilla perustason ikkunoilla.
4. Uudet auringonsuojaikkunat	Kuin perustapaus, mutta uudet auringonsuojalaseilla varustetut ikkunat etelä- ja länsijulkisivuilla sekä uudet perustason ikkunat muilla julkisivuilla.
5. IV-yötehostus 30 %	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) 30 % kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
6. Tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä tilojen aktiivinen jäähdytys.

## Uudispientalo

Uudispientaloa kuvataan 2-kerroksisella puurunkoisella maavaraisella betonirakenteisella alapohjalla varustetulla pientalolla, jonka lämmitetty nettoala on 180 m<sup>2</sup> (kuva 3.5). Pientalo on varustettu MSE-ikkunoilla, joiden U-arvo on 1,0 W/m<sup>2</sup>,K ja auringon kokonaisläpäisykerroin (g) 0,36. Ikkunoiden kokonaispinta-alan osuus ulkoseinien pinta-alasta on 14 %. Ulkoseinien U-arvo on 0,17 W/m<sup>2</sup>,K ja vaipan ilmavuotoluku q<sub>50</sub> on 4 m<sup>3</sup>/h,m<sup>2</sup>. Rakennus on varustettu perustapauksessa vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmällä. Koko rakennuksen ilmanvaihtuvuus on 0,51 1/h ja kaikkien makuuhuoneiden tuloilmavirta on 12 dm<sup>3</sup>/s ilmanvaihdon käyttönopeudella. Kesäkuukausien aikana (1.6.–31.8.) ilmanvaihdon tuloilman minimisisäänpuhalluslämpötilaa lasketaan normaalista asetusarvosta (18 °C) 16 °C:een. Rakennus lämpiää maalämpöpumpulla ja tilojen lämmityksen asetusarvo on 21 °C paitsi märkätiloissa, joissa asetusarvo on 23 °C.

**Kuva 3.5.** Uudispientalon IDA ICE simulointimalli.



Taulukossa 3.6 kuvataan uudispientalon simulointitapaukset. Rakentamismääräysten kesäaikaiset huonelämpötilavaatimukset (Ympäristöministeriö 2017) eivät koske uudispientaloja, joten niitä ei ole otettu huomioon simuloituissa tapauksissa. Perustapauksessa sekä tapauksissa, joissa kaihtimet on käytössä, ne on asennettu uloimpien ikkunalasien väliin ja niitä käytetään samojen periaatteiden mukaisesti kuin muissakin esimerkkirakennuksissa. Perustapauksessa ei käytetä aktiivista jäähdytystä.

Tapauksessa 2 etelän ja lännenpuoleisille julkisivuille asennetaan auringonsuojalasilla varustetut MSE-ikkunat ( $g = 0,19$ ) ja muilla julkisivuilla on samalaiset MSE-ikkunat kuin perustapauksessa. Tapauksissa 3 ja 4, joissa käytetään ilmanvaihdon tehostusta, ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) kesällä (1.6.–31.8.) tapauksesta riippuen joko 30 % tai 60 %. Tapauksessa 5, jossa käytetään aktiivista tilojen jäähdytystä, talon yläkerran aulatilaan, joka on makuuhuoneiden vieressä, on asennettu jäähdyttävä ilmalämpöpumppu. Jäähdytyksen asetusarvo on 23 °C, mitoitus-teho 45 W/m<sup>2</sup> ja vuotuinen kylmäkerroin on 3,0. Kaikissa taulukon 3.6 simulointitapauksissa oletetaan, että makuuhuoneiden väliovet ovat jatkuvasti auki.

**Taulukko 3.6.** Uudispientalon simulointitapaukset.

Tapaukset	Kuvaus
1. Perustapaus	Käytössä kaihtimet ja kon. tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä. Ei aktiivista jäähdytystä eikä avattavia tuuletusikkunoita. Kesällä tuloilman min. lämpötila 16 °C.
2. Uudet auringonsuojaikkunat	Kuin perustapaus, mutta uudet auringonsuojalaseilla varustetut ikkunat etelä- ja länsijulkisivuilla.
3. IV-yötehostus 30 %	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) 30 % kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
4. IV-yötehostus 60 %	Kuin perustapaus, mutta ilmanvaihdon ilmavirtoja kasvatetaan yöaikaan (klo 22–06) 60 % kesällä (1.5.–1.9.) välisenä aikana.
5. Tilojen jäähdytys	Kuin perustapaus, mutta käytössä tilojen aktiivinen jäähdytys.

## 3.2 Hellejaksojen vaikutus yllälämpenemiseen

### 3.2.1 Huonelämpötilat ja niiden muutosnopeus

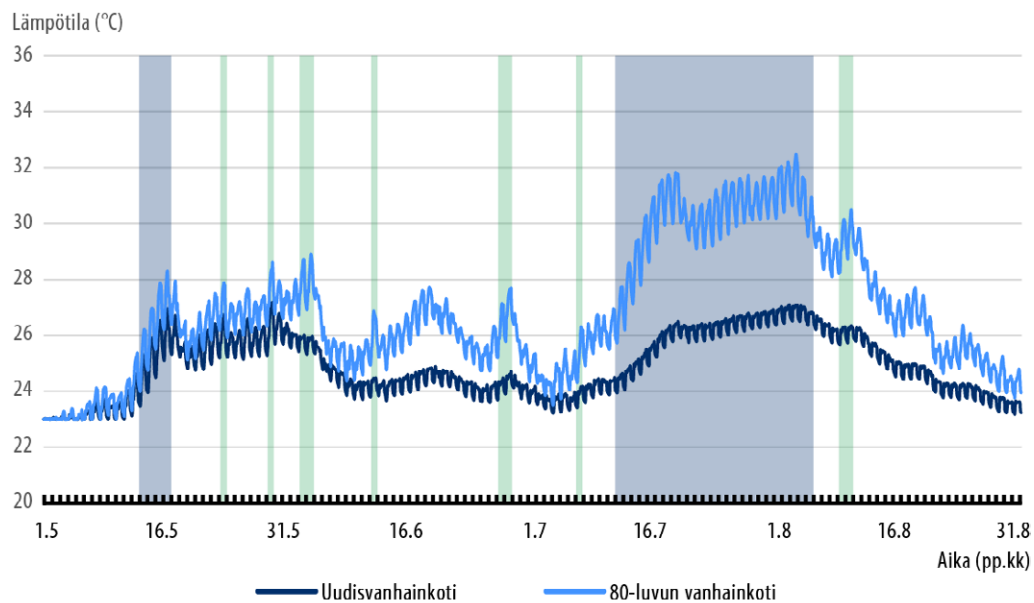
Tässä luvussa tarkastellaan kuinka hellejaksot vaikuttavat esimerkkirakennusten kuumimpien asuintilojen huonelämpötiloihin vuoden 2018 kesäkuukausien aikana. Tarkasteluissa on mukana toukokuussa Vantaalla ollut 4 vrk:n mittainen lyhyt hellejakso sekä heinä-elokuussa ollut pitkä 25 vrk:n hellejakso (kts. luku 2.1.1). Lisäksi tarkastellaan kuinka nopeasti esimerkkirakennusten kuumimmat asuintilat lämpenevät hellejakson alussa ja jäähtyvät hellejakson päätyttyä. Vaikka tarkastelu keskittyy kuumimpiin asuintiloihin, antavat tulokset hyvin suuntaa myös muiden asuintilojen lämpöoloista hellekesän aikana. Tarkastelussa käytetään luvussa 3.1 esitettyjen esimerkkirakennusten kaihtimilla varustettuja perustapauksia.

Kuvassa 3.6 on esillä 80-luvun vanhainkodin sekä uudisvanhainkodin kuumimman asunnon tunnitaiset lämpötilat. Kuvassa on merkitty punaisella taustavärillä tarkasteluun valitut hellejaksot ja keltaisella taustavärillä muut hellepäivät. Kuva osoittaa, että



80-luvun vanhainkodin huonelämpötila nousee erityisesti pitkän hellejakson aikana huomattavasti korkeammalle ja selvästi nopeammin kuin aktiivisella ilmanvaihdon jäädytyksellä varustetussa uudisvanhainkodissa. Toukokuun neljän vuorokauden hellejakson aikana 80-luvu vanhainkodin ja uudisvanhainkodin huonelämpötilat ovat selvästi lähempänä toisiaan. Tämä johtuu siitä, että 80-luvun vanhainkodin rakenteet eivät ole ehtineet vielä lämpenemään ennen toukokuun hellejaksoa ja yöaikaiset ulkolämpötilat ovat toukokuun hellejaksolla selvästi matalampia kuin heinä-elokuun pitkän hellejakson aikana, joka hillitsee 80-luvun vanhainkodin huonelämpötilan nousua (kts. kuva 2.1). Kuva myös osoittaa, että 80-luvun vanhainkodin lämpötila nousee hie-man myös yksittäisten hellepäivien aikana, joita on kesän aikana neljä ja hiukan enemmän kahden peräkkäisen hellepäivän aikana, joita on kaikkiaan kesän aikana kolme.

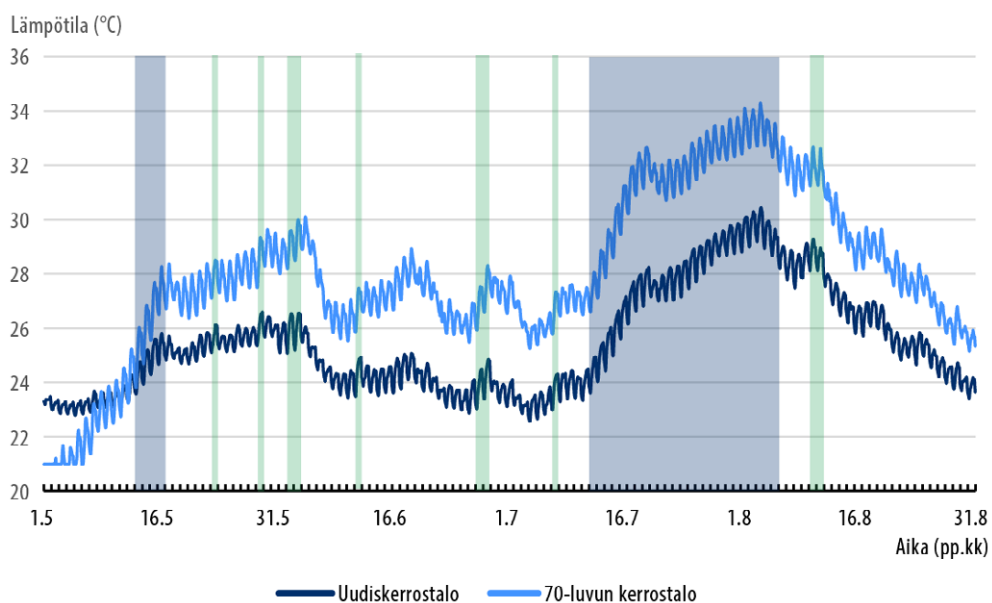
**Kuva 3.6.** Vanhainkotien kuumimman asunnon lämpötilat vuoden 2018 kesäkuukausien aikana. Hellejaksot 13.-16.5. ja 12.7.-5.8. näkyvät harmaalla taustavärillä ja muut hellepäivät vihreällä taustavärillä.



Kuvassa 3.7 on esillä vastaavasti 70-luvun kerrostalon sekä uudiskerrostalo kuumimman makuuhuoneen tunnitaiset lämpötilat kesän 2018 aikana. Kuva osoittaa, että hyvällä auringon suojauksella varustetun uudiskerrostalon huonelämpötila nousee toukokuun lyhyen hellejakson aikana selvästi hitaammin kuin 70-luvun kerrostalo. Lisäksi kerrostalojen lämpötilat nousevat pitkän hellejakson aikana selvästi korkeammalle kuin vanhainkodeissa. Kuva 3.7 myös osoittaa, että kerrostalon lämpötilat laskevat hellejaksojen ja yksittäisten hellepäivien jälkeen hitaammin kuin vanhainkodeissa

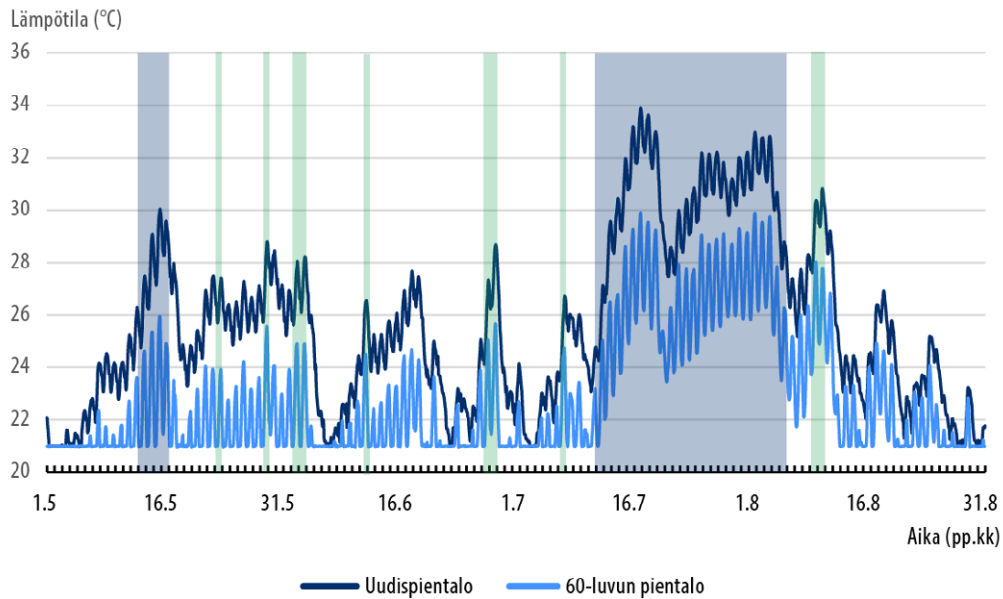
(kuva 3.6). Tämä johtuu erityisesti siitä, että ilmanvaihdon ilmavirrat ovat selvästi suuremmat vanhainkodeissa ja uudisvanhainkodin ilmanvaihto on varustettu aktiivisella jäähdytyksellä toisin kuin kerrostalot.

**Kuva 3.7.** Kerrostalojen kuumimman makuuhuoneen lämpötilat vuoden 2018 kesäkuukausien aikana. Hellejaksot 13.–16.5. ja 12.7.–5.8. näkyvät harmaalla taustavärillä ja muut hellepäivät vihreällä taustavärillä.



Kuvassa 3.8 on esillä 60-luvun pientalon sekä uudispientalo kuumimman makuuhuoneen tunnitaiset lämpötilat kesän 2018 aikana. Kuva osoittaa, että puurungolla ja betonisella alapohjalla varustetut pientalot lämpenevät hellejaksojen ja -päivien aikana ja jäähtyvät niiden jälkeen kantavilla betonirakenteilla varustettuja vanhainkoteja ja kerrostaloja selvästi nopeammin, koska niiden terminen massa on pienempi. Kuva osoittaa, että muista rakennustyypeistä poiketen uudispientalo lämpenee 60-luvun pientaloa nopeammin, vaikka siinä on huomattavasti paremmalla auringonsuojauksella varustetut ikkunat kuin 60-luvun pientalossa. Tämä johtuu siitä, että pientalojen tarkastelussa käytetään kuumimpien makuuhuoneiden lämpötiloja ja uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa on suuri ikkuna eteläpuoleisella julkisivulla. Sitä vastoin 60-luvun pientalon makuuhuoneissa on ikkunoita vain pohjoisjulkisivulla, joten makuuhuoneet eivät lämpene niin voimakkaasti ja nopeasti kuin uudispientalossa. Lisäksi kuva 3.8 osoittaa, että heikosti lämmöneristetyin 60-luvun pientalon vuorokautinen huonelämpötilan vaihtelu on selvästi suurempaa sekä hellejaksojen aikana että niiden ulkopuolella kuin nykysäädösten mukaisesti suunnitellussa uudiskerrostalossa.

**Kuva 3.8.** Pientalojen kuumimman makuuhuoneen lämpötilat vuoden 2018 kesäkuukausien aikana. Hellejaksot 13.–16.5. ja 12.7.–5.8. näkyvät punaisella taustavärillä ja muut hellepäivät keltaisella taustavärillä.



Kaikkiaan kuvat 3.6–3.8 osoittavat, että esimerkkirakennukset ylikuumenevat merkittävästi myös hellejaksojen ulkopuolella ja huonelämpötilat voivat laskea erityisesti rakennuksen termisestä massasta ja ilmanvaihdon tasosta riippuen erittäin hitaasti, joten rakennusten kesäaikaista ylikuumenemistä on syytä tarkastella myös hellejaksojen ulkopuolella koko kesän aikana. Lisäksi rakennukset voivat ylikuumeneta myös kevättalvella tai keväällä auringon lämpökuormien vuoksi, joten esimerkkirakennusten ylikuumenemistä tutkitaan luvuissa 3.3 ja 3.5 koko vuoden aikana.

Taulukossa 3.7 on esillä esimerkkirakennusten kuumimman asuintilan vuorokauden keskimääräisen huonelämpötilan nousu sekä keskimääräinen nousunopeus vuorokaudessa heinäkuussa alkaneen pitkän hellejakson neljän ensimmäisen vuorokauden (12.–15.7.) aikana. Lisäksi taulukossa on esillä edellä mainittujen tunnuslukujen keskiarvot kaikille esimerkkirakennuksille sekä ulkoilman lämpötilalle. Tulokset osoittavat, että aktiivisella ilmanvaihdon jäähdytyksellä varustettu uudisvanhainkoti lämpenee selvästi hitaammin kuin muut esimerkkirakennukset, joita ei ole varustettu aktiivisella jäähdytyksellä. Lisäksi tulokset osoittavat, että kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen (Ympäristöministeriö 2017) täyttävä uudisvanhainkoti sekä uudiskerrostalo lämpenevät hitaammin kuin muut kohteet. Puurungolla ja betonisella alapohjalla varustetut pientalot lämpenevät kantavilla betonirakenteilla varustettuja vanhainkoteja ja kerrostaloja nopeammin. Kaikkiaan esimerkkirakennukset lämpenevät keskimäärin

0,6 °C vuorokaudessa tarkasteluun valitun hellejakson alussa, kun vuorokauden keskimääräinen ulkoilman lämpötila nousee 1,1 °C.

Tässä yhteydessä on syytä korostaa, että rakennusten lämpenemiseen hellejaksojen aikana vaikuttaa ulkolämpötilan sekä rakennus- että LVI-tekniisten ominaisuuksien lisäksi myös auringon säteily, joten rakennusten lämpenemisnopeus hellejaksojen alussa riippuu monesta tekijästä.

**Taulukko 3.7.** Esimerkkirakennusten kuumimman asuintilan huonelämpötilan nousu neljän vuorokauden aikana pitkän hellejakson alussa (12.–15.7.).

	$\Delta T$ (°C)	$\Delta T/aika$ (°C/vrk)
80-luvun vanhainkoti	2,4	0,6
Uudisvanhainkoti	0,8	0,2
70-luvun kerrostalo	2,3	0,6
Uudiskerrostalo	1,6	0,4
60-luvun pientalo	3,3	0,8
Uudispientalo	5,1	1,3
<b>Keskimäärin</b>	<b>2,6</b>	<b>0,6</b>
Ulkoilma	4,3	1,1

### 3.2.2 Päivä- ja yöaikainen yllilämpeneminen

Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkirakennusten päivä- ja yöaikaista yllilämpenemistä vuoden 2018 aikana. Tarkastelussa käytetään luvussa 3.1 esitettyjen esimerkkirakennusten kaihtimilla varustettuja perustapauksia. Tarkastelussa käytetään kokonaista vuotta, koska luvussa 3.2.1 esitetyt tulokset osoittavat, että rakennukset yllilämpenevät merkittävästi kesällä myös hellejaksojen ulkopuolella. Kokonaisen vuoden käyttö tarkastelussa pelkkien kesäkuukausien sijaan varmistaa sen, ettei mahdollista yllilämpenemistä esim. keväällä poissuljeta tarkastelusta.

Taulukoissa 3.8–3.10 on esillä esimerkkirakennusten kuumimpien asuntojen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit koko vuoden aikana sekä päivisin klo 8 ja 21 välisenä aikana sekä yöaikaan klo 21 ja 8 välisenä aikana. Taulukoissa on myös esillä päivä-

ja yöaikaisten astetuntien osuudet koko vuoden astetunneista. Koska tarkastelussa päiväaikaisten tuntien (13 h) osuus koko vuorokauden tunneista (24 h) on 54% ja yöaikaisten tuntien (11 h) vastaavasti 46 %, olisi päivä- ja yöaikainen yllämpeneminen yhtä merkittävää, mikäli päiväaikaisten astetuntien osuus on 54 % ja yöaikaisten 46 %.

**Taulukko 3.8.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana vanhainkotien kuumimmassa asunnossa päivä- ja yöaikaan ja astetuntien osuudet.

#### 80-luvun vanhainkoti

Ylittävä lämpötila	Astetunnit vuoden aikana (°Ch)			Osuus vuoden aikana (%)	
	Koko vrk (24 h)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)
25 °C	<b>10 682</b>	6 204	4 478	58,1	41,9
27 °C	<b>4 820</b>	2 985	1 835	61,9	38,1
30 °C	<b>1 008</b>	707	301	70,1	29,9
32 °C	<b>143</b>	134	9	93,7	6,3

#### Uudisvanhainkoti

Ylittävä lämpötila	Astetunnit vuoden aikana (°Ch)			Osuus vuoden aikana (%)	
	Koko vrk (24 h)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)
25 °C	<b>1 918</b>	1 191	727	62,1	37,9
27 °C	<b>15</b>	14	1	93,3	6,7
30 °C	<b>0</b>	0	0	-	-
32 °C	<b>0</b>	0	0	-	-

Taulukko 3.8 osoittaa, että sekä päivä- että yöaikainen yllämpeneminen on selvästi suurempaa 80-luvun vanhainkodissa kuin uudisvanhainkodissa. Tulokset osoittavat, että molemmissa vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmavaihdolla varustetussa vanhainkodissa päiväaikainen yllämpeneminen on suurempaa kuin yöaikainen yllämpeneminen. Molemmissa kohteissa yllämpeneminen ajoittuu sitä enemmän päiväaikaan, mitä korkeampia lämpötilatasoja tarkastellaan. Tämä johtuu siitä, että korkeimmat huone-lämpötilat ajoittuvat päiväaikaan erityisesti auringon lämpökuormien sekä yöaikaista ulkolämpötiloja korkeampien päivälämpötilojen seurauksena.

**Taulukko 3.9.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana kerrostalojen kuumimmassa makuuhuoneessa päivä- ja yöaikaan ja astetuntien osuudet.

#### 70-luvun kerrostalo

Ylittävä lämpötila	Astetunnit vuoden aikana (°Ch)			Osuus vuoden aikana (%)	
	Koko vrk (24 h)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)
25 °C	<b>12 695</b>	6 904	5 791	54,4	45,6
27 °C	<b>6 737</b>	3 811	2 926	56,6	43,4
30 °C	<b>2 054</b>	1 189	865	57,9	42,1
32 °C	<b>672</b>	450	222	67,0	33,0

#### Uudiskerrostalo

Ylittävä lämpötila	Astetunnit vuoden aikana (°Ch)			Osuus vuoden aikana (%)	
	Koko vrk (24 h)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)
25 °C	<b>5 260</b>	2 968	2 292	56,4	43,6
27 °C	<b>1 822</b>	1 056	766	58,0	42,0
30 °C	<b>101</b>	80	21	79,2	20,8
32 °C	<b>0</b>	0	0	-	-

Taulukko 3.9 osoittaa, että vakioilmavirtaisella koneellisella poistoilmanvaihdoilla varustetussa 70-luvun kerrostalossa päivä- ja yöaikainen yllämpeneminen on lähes yhtä merkittävää 25 °C ylittävien astetuntien osalta. Sekä päivä- että yöaikainen yllämpeneminen on selvästi vähäisempää uudiskerrostalossa kuin 70-luvun kerrostalossa ja yllämpeneminen ajoittuu hieman enemmän päiväaikaan, koska uudiskerrostalossa on käytössä kesällä yöaikainen ilmanvaihdon 30 % tehostus. Kuten vanhainkodeissa, myös molemmissa kerrostaloissa yllämpeneminen ajoittuu sitä enemmän päiväaikaan, mitä korkeampia lämpötilatasoja tarkastellaan.

**Taulukko 3.10.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana pientalojen kuumimmassa makuuhuoneessa päivä- ja yöaikaan ja astetuntien osuudet.

#### 60-luvun pientalo

Ylittävä lämpötila	Astetunnit vuoden aikana (°Ch)			Osuus vuoden aikana (%)	
	Koko vrk (24 h)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)
25 °C	1 378	784	593	56,9	43,1
27 °C	441	273	168	61,9	38,1
30 °C	7	4	3	61,8	38,2
32 °C	0	0	0	-	-

#### Uudispientalo

Ylittävä lämpötila	Astetunnit vuoden aikana (°Ch)			Osuus vuoden aikana (%)	
	Koko vrk (24 h)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)	Päivä (8–21)	Yö (21–8)
25 °C	4 074	2 115	1 959	51,9	48,1
27 °C	2 027	1 068	958	52,7	47,3
30 °C	415	233	182	56,2	43,8
32 °C	33	20	13	61,3	38,7

Taulukko 3.10 osoittaa, että sekä päivä- että yöaikainen yllämpeneminen on selvästi suurempaa uudispientalossa kuin 60-luvun pientalossa. Tämä johtuu siitä, että tarkastelussa käytetty uudispientalon kuumin makuuhuone on varustettu suurella etelänpuoleisella ikkunalla, mutta 60-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa on ikkuna vain pohjoispuoleisella julkisivulla. Vakioilmavirtaisella koneellisella poistoilmanvaihdoilla varustettu 60-luvun pientalo yllämpenee päivällä hieman enemmän kuin yöaikaan, mutta vakioilmavirtaisella koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdoilla varustettu uudispientalo yllämpenee 25 ja 27 °C ylittävien astetuntien osalta hieman enemmän yöaikaan. Taulukko osoittaa, että siirryttäessä tarkastelemaan 25 °C korkeampia lämpötilatasoja ylittäviä astetunteja, pientalojen yllämpeneminen ei ajoitu päiväaikaan yhtä merkittävästi kuin muissa rakennustyypeissä.

## 3.3 Nykysäädösten mukaan suunnittelun rakennuksen lämpöolosuhteet nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa

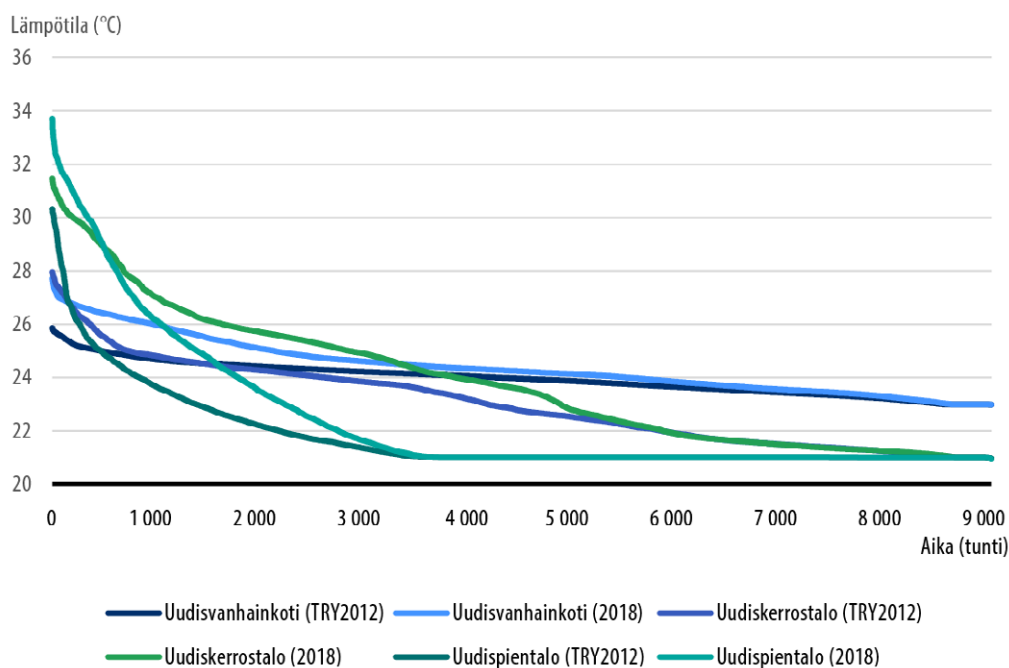
### 3.3.1 Keskimääräinen vuosi ja hellevuosi nykyilmastossa

Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkirakennuksina käytettyjen kaihtimilla varustettujen uudisrakennusten kuumimpien asuintilojen ylälämpenemistä Etelä-Suomen keskimääräisiä sääoloja kuvaavan energialaskennan Vantaan testivuoden 2012 sekä Vantaan hellevuoden 2018 aikana. Simuloidut esimerkkirakennukset kuvaavat luvussa 3.1 esitettyjä uudisrakennusten perustapauksia ja vanhainkodin ja kerrostalon tapaukset täyttävät rakentamismääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen, jonka mukaan huonetilojen simuloitu lämpötila ei saa ylittää 25 °C:tta vanhainkodissa ja 27 °C:tta yli 150 astetuntia, kun tapaus simuloidaan määräysten mukaisella vakioidulla käytöllä ja Vantaan energialaskennan testivuodella 2012 (Ympäristöministeriö 2017). Rakentamismääräysten huonelämpötilavaatimus ei koska pientaloja ja esimerkkinä käytetty pientalo kuvaa tyypillistä suomalaista uudispientaloja, joka täyttää kaikki pientaloa koskevat rakentamismääräykset. Tässä luvussa tarkastellaan tapauksia, joissa kaikissa käytetään tilakohtaisesti määriteltyjä sisäisiä lämpökuormia. Rakennusten sisäiset lämpökuormat vastaavat vuositasolla rakentamismääräysten vakioidun käytön mukaisia sisäisiä lämpökuormia.

Kuvassa 3.9 on esillä rakennusten kuumimpien asuintilojen lämpötilat Vantaan energialaskennan testivuoden sekä hellevuoden 2018 aikana. Kuva osoittaa, että huonelämpötilat nousevat hellevuoden aikana selvästi korkeammiksi noin 3 000 ja 5 000 kuumimman tunnin aikana aktiivista jäähdytystä vailla olevassa pien- ja kerrostalossa. Hellevuoden vaikutus aktiivisella ilmanvaihdon jäähdytyksellä varustetun vanhainkodin huonelämpötiloihin on vähäisempi. Korkeimmat huonelämpötilat nousevat kuitenkin vanhainkodissa hellekesän aikana noin 2 °C ja pien- ja kerrostalossa hieman yli 3 °C verrattuna keskimääräisiä sääoloja kuvaavaan energialaskennan testivuoden kesään. Kuva myös osoittaa, että vanhainkodissa matalimmat huonelämpötilat ovat 2 °C korkeammat, kuin muissa rakennuksissa, koska vanhainkodin tilojen lämmityksen asetusarvona käytetään 23 °C, kun muissa rakennuksissa asetusarvo on 21 °C.



**Kuva 3.9.** Uudisrakennusten kuumimman asuintilan lämpötilan pysyvyys Vantaan energialaskennan testivuoden (TRY2012) ja hellevuoden 2018 aikana.



Taulukossa 3.11 on esillä esimerkkirakennusten 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit energialaskennan testivuoden ja hellevuoden 2018 aikana. Tulokset osoittavat, että vanhainkodin sekä kerrostalon kuumimpien asuintilojen 25 ja 27 °C ylittävät astetunnit ovat selvästi alle rakentamismääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen (150 °Ch) energialaskennan testivuoden aikana, joten simuloinneissa käytetyt tilakohtaisesti määritellyt sisäiset lämpökuormat eivät lisää merkittävästi yllämpenemistä. Sen sijaan hellevuoden 2018 sääolojen vaikutus yllämpenemiseen on erittäin merkittävä ja astetunnit ovat huomattavasti korkeampia verrattuna keskimääräisiä sääoloja kuvaavaan energialaskennan testivuoteen.

**Taulukko 3.11.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit Vantaan energialaskennan testivuoden 2012 (TRY2012) ja hellevuoden 2018 aikana uudisrakennusten kuumimmassa oleskelutilassa.

Astetunnit (°Ch)	Uudisvanhainkoti		Uudiskerrostalo		Uudispientalo	
	TRY2012	2018	TRY2012	2018	TRY2012	2018
Ylittävä lämpötila						
25 °C	118	1 918	772	5 260	877	4 074
27 °C	0	15	49	1822	269	2 027
30 °C	0	0	0	101	11	415
32 °C	0	0	0	0	0	33

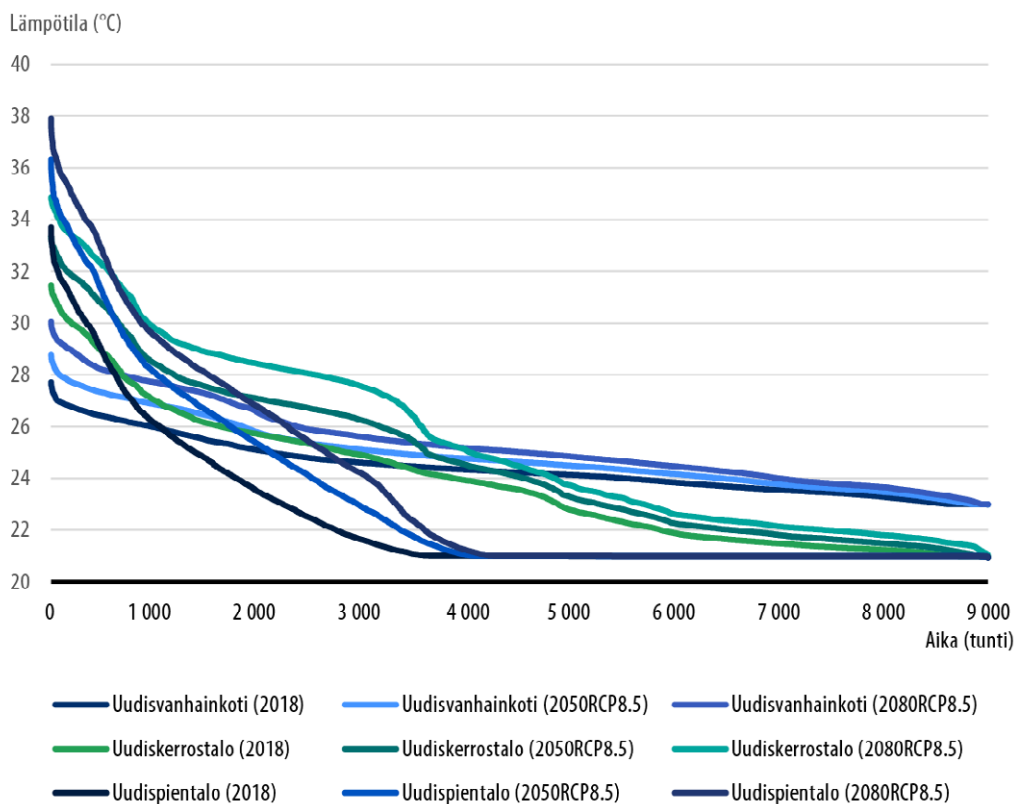
### 3.3.2 Hellevuosi nykyisessä ja tulevaisuuden ilmastossa

Tässä luvussa tarkastellaan esimerkkirakennuksina käytettyjen kaihtimilla varustettujen uudisrakennusten kuumimpien asuintilojen ylälämpenemistä nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoa kuvaavien hellevuosien 2018, 2050 ja 2080 aikana. Tulevaisuuden ilmastoa tarkastellaan RCP8.5 päästöskenaariota käyttäen. Simuloidut esimerkkirakennukset kuvaavat luvussa 3.1 esitettyjä uudisrakennusten perustapauksia, joista vain uudisvanhainkoti on varustettu aktiivisella jäähdytyksellä ilmanvaihdon osalta ja muut esimerkkirakennukset ovat vailla aktiivista jäähdytystä.

Kuvassa 3.10 on esillä esimerkkikohteiden kuumimpien asuintilojen lämpötilat valittujen hellevuosien aikana. Kuva 3.10 osoittaa, että huonelämpötilat nousevat ilmastonmuutoksen seurauksena esimerkkikohteissa merkittävimmin noin 4000 tunnin aikana vuodesta. Ilmastonmuutos nostaa huonelämpötiloja selvästi enemmän kerros- ja pientaloissa, kuin aktiivisella jäähdytyksellä varustetussa vanhainkodissa. Vanhainkodissa huonelämpötilat eivät ylitä asumisterveysasetuksen toimenpiderajaa 30 °C (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015) vuoteen 2080 mennessä vaikka korkein päästöskenaario RCP8.5 toteutuisi. Kerrostalossa asumisterveysasetuksen toimenpiderajaa 32 °C ei ylity vielä nykyilmaston hellevuoden 2018 aikana, mutta se ylittyy vuoteen 2050 mennessä, jos RCP8.5 päästöskenaario toteutuu. Simulointikohteena käytetyssä pientalossa 32 °C toimenpideraja ylittyy jo hellevuoden 2018 aikana ja kuumimman makuuhuoneen korkein lämpötila nousee vuoteen 2080 mennessä jopa noin 38 celsiusasteeseen.

Kuvassa 3.10 1 000 kuumimman tunnin aikana huonelämpötilat nousevat keskimäärin vanhainkodissa noin 1 °C vuoteen 2050 ja 2 °C vuoteen 2080 mennessä. Vastaavasti kerros- ja pientaloissa 1000 kuumimman tunnin keskilämpötilat nousevat noin 2 °C vuoteen 2050 mennessä ja 3–4 °C vuoteen 2080 mennessä RCP8.5 päästöskenaarion toteutuessa.

**Kuva 3.10.** Uudisrakennusten kuumimman asuintilan lämpötilan pysyvyys nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoa kuvaavien hellevuosien 2018, 2050 ja 2080 aikana.



Taulukossa 3.12 on esillä esimerkkikohteiden kuumimpien asuintilojen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit valittujen hellevuosien aikana. Tulokset osoittavat, että 25 °C ylittävät astetunnit kasvavat vuoteen 2050 mennessä kaikissa esimerkkirakennuksissa noin 2 kertaisiksi ja vuoteen 2080 mennessä noin 3 kertaisiksi mikäli RCP8.5 päästöskenario toteutuu. Ilmastonmuutos lisää merkittävästi korkeampien huonelämpötilojen ylittäviä astetunteja, esimerkiksi uudisvanhainkodissa on 27 °C ylittävät astetunteja vuoden 2018 aikana vain 15 °Ch, mutta ne nousevat vuoteen 2050 mennessä 26 kertaisiksi ja jopa yli 100 kertaisiksi vuoteen 2080 mennessä. Vastaavasti uudiskerrostalossa 30 °C ylittävät astetunnit nousevat vuoteen 2080 mennessä noin 20 kertaisiksi ja pientalossa 32 °C ylittävät astetunnit noin 40 kertaisiksi.

**Taulukko 3.12.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit nykyistä ja tulevaisuuden ilmastoa kuvaavien hellevuosien 2018, 2050 ja 2080 aikana.

	Uudisvanhainkoti			Uudiskerrostalo			Uudispientalo		
	2018	2050 RCP8.5	2080 RCP8.5	2018	2050 RCP8.5	2080 RCP8.5	2018	2050 RCP8.5	2080 RCP8.5
25°C	1 918	4 065	6 759	5 260	10 083	14 960	4 074	7 662	11 070
27°C	15	395	1 606	1 822	4 111	7 965	2 027	4 289	6 649
30°C	0	0	0	101	905	2 083	415	1 577	2 726
32°C	0	0	0	0	77	626	33	570	1 345

### 3.4 Kerrostaloasunnon koon vaikutus yllämpenemiseen

Tässä luvussa tarkastellaan asunnon koon vaikutusta yllämpenemiseen 70-luvun kerrostalossa sekä uudiskerrostalossa hellevuoden 2018 aikana. Simuloidut esimerkkirakennukset kuvaavat luvussa 3.1 esitettyjä kaihtimilla varustettuja uudiskerrostalojen perustapauksia, joissa ei käytetä aktiivista jäähdytystä eikä ikkunatuuletusta. 70-luvun kerrostalo on varustettu vakioilmavirtaisella koneellisella poistoilmanvaihdolla ja uudiskerrostalo koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla, jota tehostetaan 30 % kesällä (1.6.–31.8.) yöaikaan (klo 22–06).

Taulukossa 3.13 on esillä 70-luvun kerrostalon neljän erikokoisen asunnon oleskelutilojen keskilämpötilan 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit. Tarkasteltavien asuntojen koot vaihtelevat 35 ja 124 m<sup>2</sup> välillä ja asuntokohtaiset ilmanvaihtokertoimet noin 0,5 ja 0,6 1/h välillä. Tulokset osoittavat, että keskikokoiset asunnot 2h+k ja 3h+k yllämpenevät tarkasteltavasta lämpötilatasosta riippuen hieman muita asuntoja enemmän. Astetunnit ovat kaksiossa (2h+k) 25 ja 27 °C ylittävien lämpötilojen osalta muita asuntoja korkeammat ja kolmiossa (3h+k) 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit ovat hieman muita asuntoja korkeammat. Tutkitussa tapauksessa suurin asunto (4h+k) yllämpenee pienempiä asuntoja vähemmän. Tuloksia tarkasteltaessa on syytä korostaa, että simuloituissa asunnoissa ei käytetä ikkunatuuletusta, jonka käyttö voisi vähentää erityisesti isompien asuntojen yllämpenemistä, joissa on tuuletusikkunoita vähintään kahdella eri julkisivulla.

**Taulukko 3.13.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana 70-luvun kerrostalon erikokoisissa asunnoissa. Asetunnit on laskettu asunnon oleskelutilojen keskilämpötilan perusteella.

Asetunnit (°Ch)	1h+k	2h+k	3h+k	4h+k
<b>Pinta-ala (m<sup>2</sup>)</b>	35	64	79	124
<b>IV-kerroin (1/h)</b>	0,64	0,52	0,51	0,51
25 °C	11 572	13 274	12 342	10 276
27 °C	5 711	7 021	6 428	4 945
30 °C	1 591	1 932	1 937	1 404
32 °C	378	545	596	242

Taulukossa 3.14 on esillä uudiskerrostalon neljän erikokoisen asunnon oleskelutilojen keskilämpötilan 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit. Tarkasteltavien asuntojen koot vaihtelevat 35 ja 106 m<sup>2</sup> välillä ja asuntokohtaiset ilmanvaihtokertoimet ilmanvaihdon normaalinopeudella 0,5 ja 0,7 1/h välillä ja kesällä yöaikaisen tehostetun ilmanvaihdon aikana 0,65 ja 0,9 1/h välillä. Tulokset osoittavat, että uudiskerrostalossa pienin asunto (1h+k) yllämpenee suurempia asuntoja vähemmän ja suurin asunto (4h+k) yllämpenee eniten.

**Taulukko 3.14.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana uudiskerrostalon erikokoisissa asunnoissa. Asetunnit on laskettu asunnon oleskelutilojen keskilämpötilan perusteella.

Asetunnit (°Ch)	1h+k	2h+k	3h+k	4h+k
<b>Pinta-ala (m<sup>2</sup>)</b>	35	58	81	106
<b>Min. IV-kerroin (1/h)</b>	0,71	0,50	0,55	0,52
<b>Max. IV-kerroin (1/h)</b>	0,92	0,65	0,72	0,68
25 °C	3 807	3 888	4 088	4 888
27 °C	1 286	1 257	1 506	1 725
30 °C	40	21	61	86
32 °C	0	0	0	0

Taulukoissa 3.13 ja 3.14 esitettyjen tulosten pohjalta voidaan todeta, että kerrostalo-asunnon koko ei suoraan vaikuta yllämpenemisen määrään, kun ikkunatuuletusta ei käytetä, vaan yllämpenemiseen vaikuttaa muut tekijät kuten ikkunoiden määrä ja suuntaus sekä lämpökuormien määrä ja ilmanvaihdon mitoitus.

## 3.5 Passiivisten keinojen merkitys ja jäähdytyksen tarve nykyilmastossa

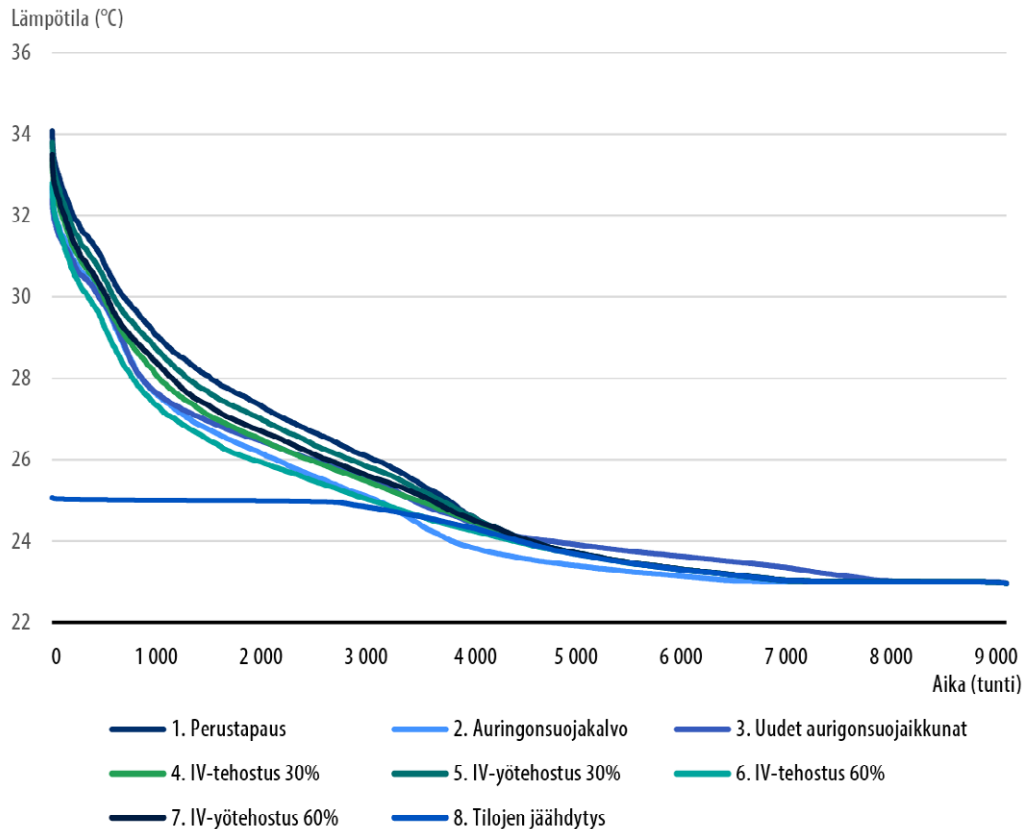
### 3.5.1 Huonelämpötilat

Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka yllämpenemisen torjuntakeinot vaikuttavat esimerkkirakennusten kuumimpien asuintilojen huonelämpötiloihin sekä 25, 27, 30 ja 32 °C ylittäviin huonelämpötilojen astetunteihin hellevuoden 2018 aikana. Vaikka tarkastelu keskittyy kuumimpiin asuintiloihin, antavat tulokset hyvin suuntaa muiden asuintilojen lämpöoloista, koska lämpötilaerot eri asuintilojen välillä ovat suhteellisen pieniä esimerkkirakennuksissa.

#### Vanhainkodit

Kuvassa 3.11 on esillä 80-luvun vanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon huonelämpötilan pysyvyyskäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 3.1) vuoden 2018 aikana. Kuva 3.11 osoittaa että, kaihtimilla varustetussa perustapauksessa huonelämpötila on korkeimmillaan jopa noin 34 °C ja kaikissa aktiivista jäähdytystä vailla olevissa yllämpenemisen torjuntatapauksissa (2–7) asumisterveysasetuksen toimenpideraja 30 °C ylittyy reippaasti (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Tutkituista tapauksista ainoastaan aktiivisella tilojen jäähdytyksellä ja kaihtimien käytöllä korkeimmat huonelämpötilat saadaan pidettyä noin 25 celsiusasteessa.

**Kuva 3.11.** 80-luvun vanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon lämpötilan pysyvyys hellevuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukossa 3.15 on esillä 80-luvun vanhainkodin kuumimman asunnon 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko osoittaa, että kaikki aktiivista jäähdytystä vailla olevat ratkaisuvaihtoehdot yllämpenevät merkittävästi. Tulokset osoittavat, että aktiivista jäähdytystä lukuunottamatta ilmanvaihdon jatkuva 60 %:n tehostus kesäkuukausien aikana on tehokkain yksittäinen yllämpenemisen torjuntakeino 25, 27 ja 30 °C ylittävien astetuntien avulla tarkasteltuna. Ilmanvaihdon jatkuva tehostus kesäkuukausien aikana on tehokkaampi yllämpenemisen torjuntakeino 80-luvun vanhainkodissa, kuin ilmanvaihdon yöaikainen tehostus kesäkuukausien aikana. Tämä johtuu siitä, että tarkastelussa käytetyn kuumimman asunnon huonelämpötila on kesäkuukausien aikana lähes jatkuvasti korkeampi kuin ilmanvaihdon sisäänpuhalluslämpötila, joten ilmanvaihdon käyttö myös kuumimpien hellejaksojen aikana jäähdyttää asuntoa. Tässä yhteydessä on syytä korostaa, että ilmanvaihdon tehostamien ulkoilman lämpötilan ollessa korkeampi kuin huonelämpötila, lisää tilojen yllämpenemistä. Lisäksi taulukko 3.15 osoittaa, että auringonsuojakalvon asentaminen esimerkkikohteen vanhoihin ikkunoihin vähentää kuu-

mimman asuintilan ylälämpenemistä lähes yhtä paljon kuin uusien auringonsuojaikkunoiden asentaminen etelä- ja länsijulkisivuille (kts. taulukko 3.1) 27, 30 ja 32 °C ylittävien astetuntien avulla tarkasteltuna. Tässä yhteydessä on syytä huomata, että alkuperäisten ikkunoiden heikompi lämmöneristystaso osaltaan hieman vähentää ylälämpenemistä esimerkkikohteessa, jossa huonelämpötila on lähes jatkuvasti korkeampi kesäkuukausien aikana kuin ulkolämpötila.

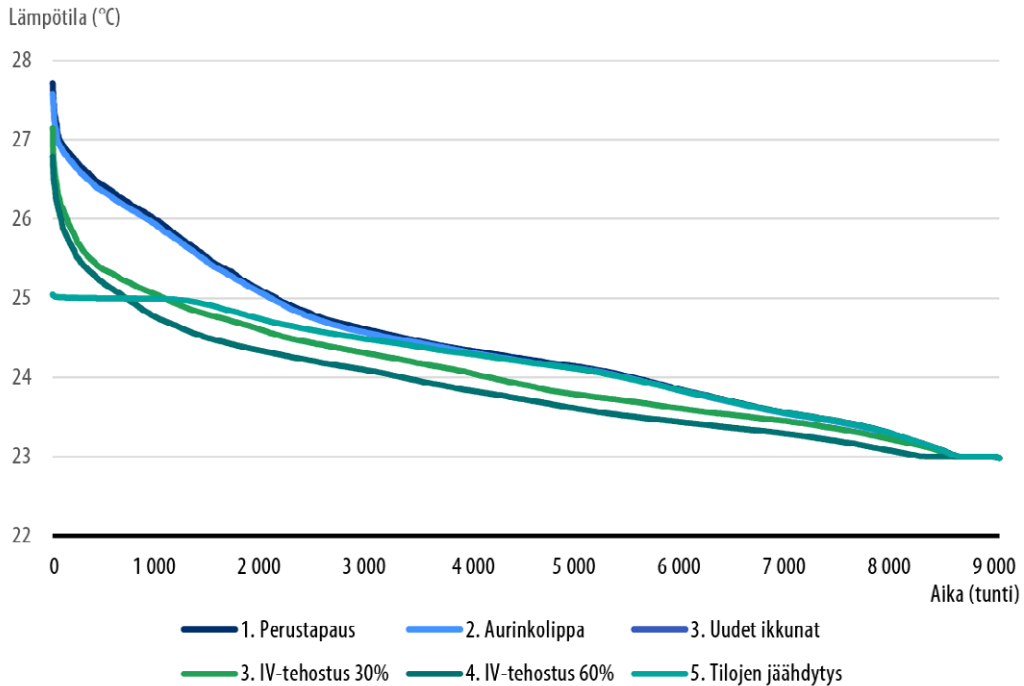
**Taulukko 3.15.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana 80-luvun vanhainkodin kuumimmassa yhden hengen asunnossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Asetunnit yli 25°C	Asetunnit yli 27°C	Asetunnit yli 30°C	Asetunnit yli 32°C
1. Perustapaus	10 682	4 820	1 008	143
2. Auringonsuojakalvo	6 834	2 694	420	7
3. Uudet auringonsuojaikkunat	7 472	2 688	370	2
4. IV-tehostus 30%	7 959	3 186	567	40
5. IV-yötehostus 30%	9 581	4 093	796	91
6. IV-tehostus 60%	6 115	2 287	314	7
7. IV-yötehostus 60%	8 601	3 491	628	55
8. Tilojen jäädytys	16	0	0	0

Kuvassa 3.12 on esillä uudisvanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon huonelämpötilan pysyvyyskäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 3.2) vuoden 2018 aikana. Kuva 3.12 osoittaa, että huonelämpötilat ovat kaikissa simuloituissa tapauksissa huomattavasti matalammat kuin 80-luvun vanhainkodissa eivätkä ylitä asu-  
misterveysasetuksen toimenpiderajaa 30 °C, koska uudisvanhainkoti on varustettu kaikissa tapauksissa ilmanvaihdon tuloilman aktiivisella jäädytyksellä. Kuva osoittaa, että etelä- ja länsijulkisivuille ikkunoiden yläpuolelle asennettu 1 m syvä aurinkolippa ei juurikaan laske huonelämpötiloja. Ulkoisen auringonsuojauksen vähäinen vaikutus johtuu siitä, että perustapauksessa auringonsuojaus on auringonsuojaikkunoiden ja kaihtimien käytön seurauksena jo niin hyvä, ettei ulkoisella auringonsuojauksella saavuteta enää merkittävää lisähyötyä. Sen sijaan ilmanvaihdon tehostus laskee korkeimpia huonelämpötiloja merkittävästi, koska ilmanvaihto on varustettu aktiivisella jäädytyksellä. Kun ilmanvaihdon lisäksi myös tiloissa käytetään aktiivista jäädytystä, saadaan korkeimmat huonelämpötilat pidettyä noin 25 celciusasteessa.



**Kuva 3.12.** Uudisvanhainkodin kuumimman yhden hengen asunnon lämpötilan pysyvyys hellevuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukossa 3.16 on esillä uudisvanhainkodin kuumimman asunnon 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Tulokset osoittavat, että ilmanvaihdon jatkuva tehostus kesäkuukausien aikana laskee 25 °C ylittäviä astetunteja merkittävästi. Ilmanvaihdon 30 %:n tehostus laskee 25 °C ylittäviä astetunteja noin 1 440 °Ch ja 60 % tehostus noin 1 610 °Ch perustapaukseen verrattuna.

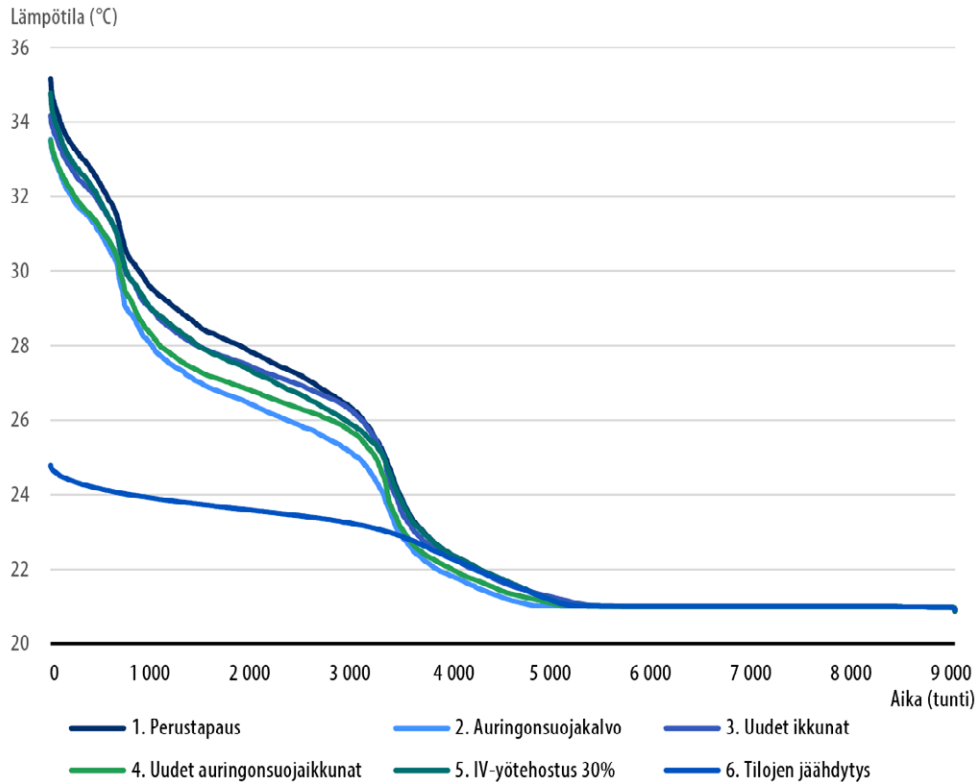
**Taulukko 3.16.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana uudisvanhainkodin kuumimmassa yhden hengen asunnossa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Asetunnit yli 25 °C	Asetunnit yli 27 °C	Asetunnit yli 30 °C	Asetunnit yli 32 °C
1. Perustapaus	1 918	15	0	0
2. Aurinkolippa	1 795	10	0	0
3. IV-tehostus 30 %	476	0	0	0
4. IV-tehostus 60 %	308	0	0	0
5. Tilojen jäähdytys	0	0	0	0

## Kerrostalot

Kuvassa 3.13 on esillä 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyskäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 3.3) vuoden 2018 aikana. Kuva 3.13 osoittaa että, kaihtimilla varustetussa perustapauksessa huonelämpötila on korkeimmillaan jopa noin 35 °C ja kaikissa aktiivista jäähdytystä vailla olevissa ylläampemisen torjuntatapauksissa (2–5) asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ylittyy selvästi (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015). Tutkituista tapauksista ainoastaan aktiivisella tilojen jäähdytyksellä ja kaihtimien käytöllä korkeimmat huonelämpötilat saadaan pidettyä alle 25 celsiusasteessa.

**Kuva 3.13.** 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys hellevuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



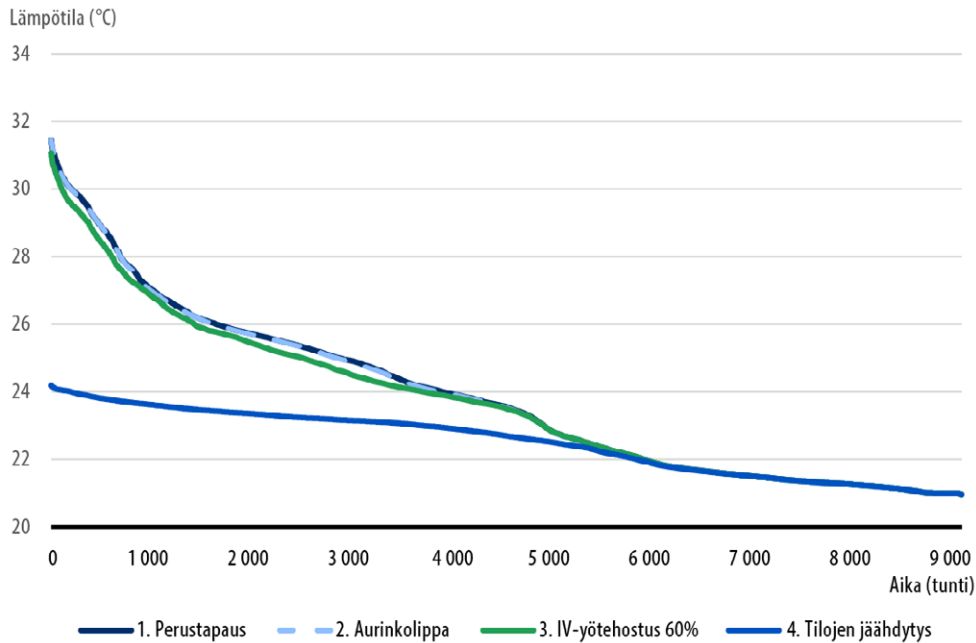
Taulukossa 3.17 on esillä 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko osoittaa, että kaikki aktiivista jäähdytystä vaille olevat ratkaisuvaihtoehdot yllälämpenevät erittäin merkittävästi. Auringsuojakalvon asentaminen alkuperäisiin ikkunoihin on tutkituista aktiivista jäähdytystä vaille olevista ratkaisuista tehokkain yksittäinen yllälämpenemisen torjuntakeino esimerkkirakennuksessa. Kuten 80-luvun vanhainkodissa, myös tämän esimerkkirakennuksessa analysoidun huoneen lämpötila on kesäkuukausien aikana lähes jatkuvasti korkeampi kuin ulkolämpötila, joten alkuperäisten ikkunoiden heikompi lämmöneristystaso auringsuojakalvoa käytettäessä myös osaltaan vähentää yllälämpenemistä uusilla ikkunoilla varustettuihin ratkaisuihin verrattuna. Esimerkkirakennuksessa koneellisen poistoilmanvaihdon yöaikainen 30 %:n tehostus vähentää kuumimman makuuhuoneen yllälämpenemistä tutkituista aktiivista jäähdytystä vaille olevista ratkaisuista vähiten 27, 30 ja 32 °C ylittäviä astetunteja tarkasteltaessa.

**Taulukko 3.17.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana 70-luvun kerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Asetunnit yli 25 °C	Asetunnit yli 27 °C	Asetunnit yli 30 °C	Asetunnit yli 32 °C
1. Perustapaus	12 695	6 737	2 054	672
2. Auringonsuojakalvo	8 326	3 782	1 052	122
3. Uudet ikkunat	11 337	5 458	1 575	347
4. Uudet auringonsuojaikkunat	9 348	4 138	1 142	144
5. IV-yötehostus 30%	11 159	5 548	1 697	457
6. Tilojen jäähdytys	0	0	0	0

Kuvassa 3.14 on esillä uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 3.4) vuoden 2018 aikana. Kuva 3.14 osoittaa että, huonelämpötilat eivät ylitä asumisterveysasetuksen toimenpiderajaa 32 °C (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015) millään ratkaisuvaihtoehdolla. Toisaalta 30 °C toimenpideraja, jota sovelletaan esim. kotihoidossa olevien vanhusten tapauksessa, ylittyy kaikissa aktiivista jäähdytystä vailla olevissa ratkaisuisissa. Kuten uudisvanhainkodissa, myöskään uudiskerrostalossa aurinkolipan käyttö ei juurikaan vaikuta huonelämpötiloihin auringonsuojaikkunoiden ja kaihtimien käytön vuoksi. Ilmanvaihdon yöaikainen 60 %:n tehostus kesällä laskee varsin vähän huonelämpötiloja verrattuna perustapaukseen, jossa on jo käytössä 30 %:n yöaikainen ilmanvaihdon tehostus. Tutkituista tapauksista ainoastaan aktiivisella tilojen jäähdytyksellä ja kaihtimien käytöllä korkeimmat huonelämpötilat saadaan pidettyä noin 24 celciusasteessa.

**Kuva 3.14.** Uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys hellevuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukossa 3.18 on esillä uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko osoittaa, että kaikki aktiivista jäädytystä vailla olevat ratkaisuvaihtoehdot yllämpenevät selvästi. Aurinkolipan käyttö ei ole juurikaan vähennä yllämpenemistä, mutta ilmanvaihdon yöaikainen 60 %:n tehostus laskee 25 °C ylittäviä astetunteja noin 830 °Ch perustapaukseen verrattuna.

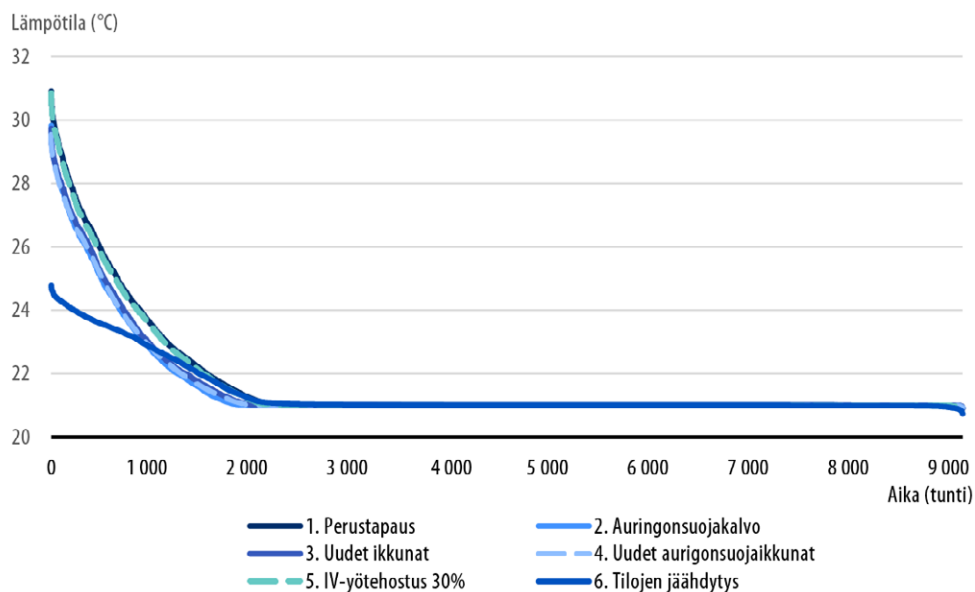
**Taulukko 3.18.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana uudiskerrostalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Asetunnit yli 25 °C	Asetunnit yli 27 °C	Asetunnit yli 30 °C	Asetunnit yli 32 °C
1. Perustapaus	5 260	1 822	101	0
2. Aurinkolippa	5 200	1 801	98	0
3. IV-yötehostus 60%	4 434	1 443	45	0
4. Tilojen jäädytys	0	0	0	0

## Pientalot

Kuvassa 3.15 on esillä 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyykäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 3.5) vuoden 2018 aikana. Kuva 3.15 osoittaa että, asumisterveysasetuksen toimenpideraja 30 °C ylittyy perustapauksessa sekä koneellisen poistoilmanvaihdon kesäaikaisen yötehostuksen tapauksissa. Muissa aktiivista jäähdytystä vailla olevissa ylläampenenen torjuntaratkaisuisissa toimenpideraja ei ylity, mutta korkeimmat huonelämpötilat ovat kuitenkin lähes 30 °C. Tutkituista tapauksista ainoastaan aktiivisella tilojen jäähdytyksellä ja kaihtimien käytöllä korkeimmat huonelämpötilat saadaan pidettyä alle 25 celsiusasteessa.

**Kuva 3.15.** 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys hellevuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukossa 3.19 on esillä 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko osoittaa, että uusien auringonsuojaikkunoiden asentaminen etelän ja lännen puoleisille julkisivuille ja uusien hieman heikommalla auringonsuojaksella varustettujen ikkunoiden asentaminen muille julkisivuille tapauksessa 4 on tutkituista ratkaisuisista tehokain yksittäinen aktiivista jäähdytystä vailla oleva ylläampenenen torjuntakeino. Mutta, tulokset osoittavat, että auringonsuojakalvon asentaminen on lähes yhtä tehokas ylläampenenen torjuntakeino esimerkkirakennuksessa. Koneellisen poistoilmanvaihdon yöaikainen 30 %:n tehostaminen kesällä laskee kuumimman makuuhuoneen lämpötilaa tutkituista ylläampenenen torjuntaratkaisuisista selvästi vähiten ja 25 °C ylittävät astetunnit vähenevät ilmanvaihdon tehostuksen seurauksena vain noin

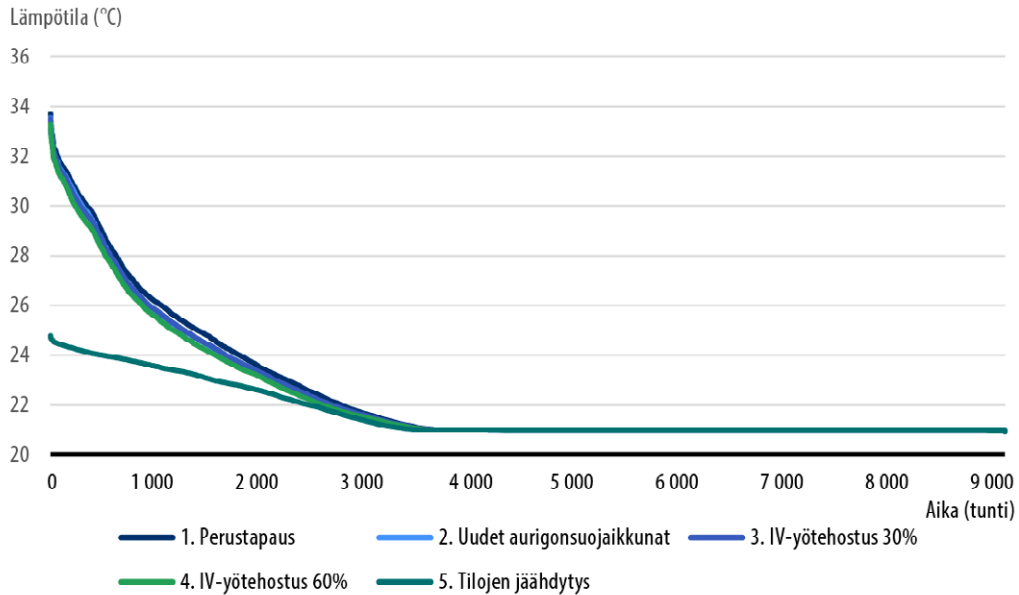
80 °Ch. Tulos johtuu siitä, että koneellisen poistoilmanvaihdon tehostaminen lisää suoraan vain keittiön, WC:n ja märkätilojen ilmanvaihtoa, joissa poistoilmaventtiilit sijaitsevat ja muiden tilojen kuten kuumimman makuuhuoneen ilmanvaihto lisääntyy vain vaipan läpi virtaavan korvausilmavirran lisääntymisen seurauksena.

**Taulukko 3.19.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana 60-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Asetunnit yli 25 °C	Asetunnit yli 27 °C	Asetunnit yli 30 °C	Asetunnit yli 32 °C
1. Perustapaus	1 378	441	7	0
2. Auringonsuojakalvo	856	187	0	0
3. Uudet ikkunat	928	203	0	0
4. Uudet auringonsuojaikkunat	852	171	0	0
5. IV-yötehostus 30 %	1 295	404	5	0
6. Tilojen jäähdytys	0	0	0	0

Kuvassa 3.16 on esillä uudispientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyyssäyrät simuloituissa tapauksissa (ks. taulukko 3.6) vuoden 2018 aikana. Kuva osoittaa että, asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015) ylittyy kaikissa aktiivista jäähdytystä vailla olevissa tapauksissa. Tulokset osoittavat, että uudispientalo yllämpenee selvästi enemmän kuin 60-luvun pientalo paremmalla auringonsuojauksella varustettujen ikkunoiden käytöstä huolimatta, koska tarkastelussa käytetty uudispientalon kuumin makuuhuone on varustettu suurella etelänpuoleisella ikkunalla, mutta 60-luvun pientalon kuumimmassa makuuhuoneessa on ikkuna vain pohjoispuoleisella julkisivulla. Tutkituista tapauksista ainoastaan aktiivisella tilojen jäähdytyksellä ja kaihtimien käytöllä korkeimmat huonelämpötilat saadaan pidettyä noin 25 celsiusasteessa.

**Kuva 3.16.** Uudispientalon kuumimman makuuhuoneen lämpötilan pysyvyys hellevuoden 2018 aikana eri ratkaisuvaihtoehdoilla.



Taulukossa 3.20 on esillä uudispientalon kuumimman makuuhuoneen 25, 27, 30 ja 32 °C ylittävät astetunnit vuoden 2018 aikana eri simulointitapauksissa. Taulukko osoittaa, että kaikki aktiivista jäähdytystä vailla olevat ratkaisuvaihtoehdot yllämpenevät merkittävästi. Tulosten perusteella kesäaikaisen ilmanvaihdon 60 %:n yötehostus on tehokkain tutkittu yllämpenemisen torjuntakeino aktiivisen jäähdityksen käyttöä lukuunottamatta. Ilmanvaihdon 30 %:n tehostuksella on lähes yhtä suuri vaikutus huone- ja sisätiloihin kuin auringonsuojaikkunoiden asentamisella etelän- ja lännenpuoleisiin julkisivuihin. Tulokset osoittavat, että koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihdon tehostamisella on huomattavasti suurempi vaikutus kuumimman makuuhuoneen yllämpenemiseen kuin koneellisen poistoilmanvaihdon tehostamisella 60-luvun pientalossa. Tämä johtuu siitä, että uudispientalon ilmanvaihdon tehostaminen kasvattaa suoraan makuuhuoneiden tuloilmavirtaa perustapauksen 12 L/s tasosta 16 ja 19 l/s tuloilmavirtoihin 30 %:n ja 60 %:n tehostuksella.



**Taulukko 3.20.** Eri lämpötilatasot ylittävät astetunnit hellevuoden 2018 aikana uudispientalon kuumimmassa makuuhuoneessa eri ratkaisuvaihtoehdoilla.

Tapaukset	Asetunnit yli 25 °C	Asetunnit yli 27 °C	Asetunnit yli 30 °C	Asetunnit yli 32 °C
1. Perustapaus	4 074	2 027	415	33
2. Uudet auringonsuojaikkunat	3 647	1 811	340	20
3. IV-yötehostus 30 %	3 642	1 784	317	19
4. IV-yötehostus 60 %	3 293	1 580	251	14
5. Tilojen jäähdytys	0	0	0	0

### 3.5.2 Energian tarve ja energiakustannukset

Tässä luvussa tarkastellaan, kuinka yllämpenemisen torjuntakeinot vaikuttavat esimerkkirakennusten ostoenergiankulutukseen ja energiakustannuksiin hellevuoden 2018 aikana. Energiakustannukset on laskettu käyttäen rakennustyyppikohtaisia kaukolämmön ja sähkön keskihintoja Suomessa tammikuussa 2023 (kaukolämpö) ja vuoden 2022 aikana (sähkö) (kts. luku 2.3.1).

#### Vanhainkodit

Taulukko 3.21 osoittaa yllämpenemisen torjuntakeinojen (kts. taulukko 3.1) vaikutuksen 80-luvun vanhainkodin kaukolämmön ja sähkön vuotuisen ostoenergiankulutukseen sekä energiakustannuksiin. Tulokset osoittavat että, kaikilla simuloituilla ratkaisuilla on vaikutusta kaukolämmön kulutukseen ja useimmilla ratkaisuilla on vaikutusta myös sähkönkulutukseen. Tapauksessa 2 auringonsuojakalvon asentaminen alkupe räisiin kaihtimilla varustettuihin ikkunoihin lisää hieman kohteen lämmitystarvetta ja vuotuiset energiakustannukset kasvavat noin 2 %, koska auringonsuojakalvo vähentää ikkunoiden kautta tulevaa auringon lämpökuormaa myös lämmityskaudella. Tapauksessa 3 uusien auringonsuojaikkunoiden asentaminen etelän ja lännenpuolen julkisivuille ja normaalitasoisella auringonsuojauksella varustettujen ikkunoiden asentamisen muille julkisivuille vähentää selvästi lämmitystarvetta ja energiakustannukset vähenevät noin 7 %. Tapauksissa 4–7 ilmanvaihdon tehostaminen kasvattaa sekä ilmanvaihdon lämmitystarvetta että puhallinsähkönkulutusta. Ilmanvaihdon jatkuva tehostaminen kesäkuukausien aikana kasvattaa vuotuisia energiakustannuksia kaikkiaan noin 2–5 % riippuen siitä, kasvatetaanko ilmamääriä 30 vai 60 %. Ilmanvaihdon

tehostaminen kesällä yöaikaan kasvattaa energiakustannuksia vähemmän, mutta yö-aikainen tehostus ei ole esimerkkikohteessa niin tehokas yllämpenemisen torjuntakeino kuin ilmanvaihdon jatkuva tehostaminen kesällä (kts. taulukko 3.15). Kaihtimilla ja tilojen aktiivisella jäähdytyksellä varustetussa tapauksessa 8 aktiivinen jäähdytys kasvattaa kohteen vuotuisia energiakustannuksia simuloidun hellevuoden 2018 aikana noin 3 %, eli selvästi vähemmän kuin ilmanvaihdon tehostaminen 60 % jatkuvasti kesällä. Tilojen aktiivisen jäähdytyksen käyttö, joka on tutkituista ratkaisuista selvästi tehokkain yllämpenemisen torjuntakeino (kts. kuva 3.11), lisää esimerkkikohteen energiakustannuksia noin 1 500 € hellevuoden aikana. Tällöin aktiivisen jäähdytyksen energiakustannus koko rakennuksen nettoalaa (4 068 m<sup>2</sup>) kohti on noin 0,4 €/m<sup>2</sup>.

**Taulukko 3.21.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus 80-luvun vanhainkodin ostoenergiankulutukseen (MWh/a) ja energiakustannuksiin (€/a) perustapaukseen verrattuna vuoden 2018 aikana.

Tapaukset	Energiankulutus			Energiakustannukset		
	Kauko- lämpö	Sähkö	Kauko- lämpö	Sähkö	Yht.	Ero (%)
1. Perustapaus	363,4	247,1	27 341	28 752	56 093	0,0
2. Auringonsuojakalvo	+15,3	0,0	+1 154	0,0	+1 178	+2,1
3. Uudet auringon- suojaikkunat	-52,4	0,0	-3 939	0,0	-3 939	-7,0
4. IV-tehostus 30 %	+4,4	+8,5	+327	+984	+1 312	+2,3
5. IV-yötehostus 30 %	+1,5	+2,6	+113	+308	+421	+0,8
6. IV-tehostus 60 %	+11,2	+16,8	+842	+1 955	+2 796	+5,0
7. IV-yötehostus 60 %	+3,5	+5,5	+266	+639	+905	+1,6
8. Tilojen jäähdytys	+0,8	+12,6	+58	+1 466	+1 524	+2,7

Taulukko 3.22 osoittaa yllämpenemisen torjuntakeinojen (kts. taulukko 3.2) vaikutuksen uudisvanhainkodin kaukolämmön ja sähkön vuotuisen ostoenergiankulutukseen sekä energiakustannuksiin. Tulokset osoittavat ettei, tapauksessa 2 käytössä olevalla aurinkolipalla ole vaikutusta kohteen energiankulutukseen, tosin aurinkolipan käytöllä ei ole juurikaan vaikutusta kohteen huonelämpötiloihin (kts. kuva 3.12). Tapauksissa 3 ja 4 ilmanvaihdon jatkuva kesäaikainen tehostus kasvattaa ilmanvaihdon lämmitystarpeen ja puhallinsähkönkulutuksen lisäksi myös jäähdytyksen sähkönkulutusta, koska

kohte on varustettu ilmanvaihdon aktiivisella jäähdytyksellä. Ilmanvaihdon tehostaminen kasvattaa kohteen vuotuisia energiakustannuksia noin 3–7 %, eli noin 1 300–2 800 € riippuen tehostuksen määrästä. Tilojen aktiivinen jäähdytys, joka on tutkituissa tapauksissa ilmanvaihdon tehostamista tehokkaampi yllämpenemisen torjuntakeino, kasvattaa vuotuisia energiakustannuksia hieman yli 0,5 %, eli noin 260 €. Tällöin tilojen aktiivisen jäähdytyksen energiakustannus koko rakennuksen nettoalaa (4 068 m<sup>2</sup>) kohti on vain 0,06 €/m<sup>2</sup> ja vastaavasti ilmanvaihdon aktiivisen jäähdytyksen energiakustannus on 0,18 €/m<sup>2</sup>.

**Taulukko 3.22.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus uudisvanhainkodin ostoenergiankulutukseen (MWh/a) ja energiakustannuksiin (€/a) perustapaukseen verrattuna vuoden 2018 aikana.

Tapaukset	Energiankulutus				Energiakustannukset		
	Kauko- lämpö	Sähkö	Kauko- lämpö	Sähkö	Yht.	Ero (%)	Kauko- lämpö
1. Perustapaus	190,7	231,8	6,4	14 352	26 969	41 321	0,0
2. Aurinkolippa	0,0	0,0	-0,1	+3	-1	+2	0,0
3. IV-tehostus 30 %	+5,4	+7,6	+1,5	+407	+884	+1 291	+3,1
4. IV-tehostus 60 %	+14,4	+14,7	+2,5	+1 083	+1 709	+2 793	+6,8
5. Tilojen jäähdytys	+0,2	+2,1	+2,1	+12	+247	+259	+0,6

## Kerrostalot

Taulukko 3.23 osoittaa yllämpenemisen torjuntakeinojen (kts. taulukko 3.3) vaikutuksen 70-luvun kerrostalon kaukolämmön ja sähkön vuotuisen ostoenergiankulutukseen sekä energiakustannuksiin. Tulokset osoittavat että, auringonsuojakalvon asentaminen alkuperäisiin ikkunoihin tapauksessa 2 kasvattaa hieman kohteen lämmitystarvetta ja energiakustannuksia, kuten 80-luvun vanhainkodissa. Tapauksissa 3 ja 4 uusien ikkunoiden asentaminen vähentää kohteen lämmitystarvetta ja vuotuisen energiakustannukset vähenevät lasitusratkaisusta riippuen noin 2–3 %. Tapauksessa 5 koneellisen poistoilmanvaihdon tehostaminen, jonka vaikutus yllämpenemiseen on varsin vähäinen (kts. taulukko 3.17) kasvattaa vuotuisia energiakustannuksia noin 1 %:n, eli noin 500 €. Kerrostalon olohuoneiden aktiivinen jäähdytys, jolla pystytään hallitsemaan asuntojen lämpöoloja tehokkaasti, kasvattaa koko rakennuksen tasolla energiakustannuksia noin 6 %, eli noin 3 100 €. Aktiivisen jäähdytyksen energiakus-

tannus jäädytyksellä varustettujen asuntojen lattiapinta-alaa kohden on tällöin keskimäärin 1,7 €/m<sup>2</sup>. Esimerkkikohteessa asuntokohtainen jäädytyksen vuotuinen energiakustannus vaihtelee asunnon koosta riippuen noin 60 ja 200 € välillä, kun jäädytyksen energiakustannuksen määrää arvioidaan e.m. keskimääräisen energiakustannuksen avulla.

**Taulukko 3.23.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus 70-luvun kerrostalon ostoenergiankulutukseen (MWh/a) ja energiakustannuksiin (€/a) perustapaukseen verrattuna vuoden 2018 aikana.

Tapaukset	Energiankulutus			Energiakustannukset		
	Kauko- lämpö	Sähkö	Kauko- lämpö	Sähkö	Yht.	Ero (%)
1. Perustapaus	357,5	88,7	33 358	20 216	53 574	0,0
2. Auringonsuojakalvo	+7,5	0,0	+695	0,0	+721	+1,3
3. Uudet ikkunat	-15,8	0,0	-1 473	0,0	-1 473	-2,7
4. Uudet auringonsuojaikkunat	-13,4	0,0	-1 247	0,0	-1 246	-2,3
5. IV-yötehostus 30 %	+1,3	+1,7	+119	+391	+510	+1,0
6. Tilojen jäädytys	0,0	+13,7	0,0	+3 135	+3 135	+5,9

Taulukko 3.24 osoittaa yllämpenemisen torjuntakeinojen (kts. taulukko 3.4) vaikutuksen uudiskerrostalon kaukolämmön ja sähkön vuotuisen ostoenergiankulutukseen sekä energiakustannuksiin. Tulokset osoittavat, ettei tapauksessa 2 käytössä olevalla aurinkolipalla ole vaikutusta kohteen energiankulutukseen, tosin aurinkolipan käytöllä ei ole juurikaan vaikutusta kohteen huonelämpötiloihin (kts. kuva 3.14) samoin kuin uudisvanhainkodissa. Tapauksessa 3 ilmanvaihdon yöaikaisen tehostamisen lisääminen kesällä perustapauksessa käytetystä 30 %:n tehostuksesta 60 %:iin kasvattaa energiakustannuksia noin 1 %:n, eli noin 400 €. Kerrostalon olohuoneiden aktiivinen jäädytys, joka on ainoa tutkittu yllämpenemisen torjuntakeino, jolla pystytään hallitsemaan asuntojen lämpöoloja tehokkaasti, kasvattaa koko rakennuksen tasolla energiakustannuksia noin 4 %, eli noin 1 150 €. Aktiivisen jäädytyksen energiakustannus jäädytyksellä varustettujen asuntojen lattiapinta-alaa kohden on tällöin keskimäärin 0,8 €/m<sup>2</sup>. Esimerkkikohteessa asuntokohtainen jäädytyksen vuotuinen energiakustannus vaihtelee asunnon koosta riippuen noin 28 ja 78 € välillä, kun jäädytyksen energiakustannuksen määrää arvioidaan e.m. keskimääräisen energiakustannuksen avulla.

**Taulukko 3.24.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus uudiskerrostalon ostoenergiankulutukseen (MWh/a) ja energiakustannuksiin (€/a) perustapaukseen verrattuna vuoden 2018 aikana.

Tapaukset	Energiankulutus		Energiakustannukset			
	Kauko- lämpö	Sähkö	Kauko- lämpö	Sähkö	Yht.	Ero (%)
1. Perustapaus	164,5	69,0	15 344	15 734	31 078	0,0
2. Aurinkolippa	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3. IV-yötehostus 60 %	+1,0	+1,4	+91	+310	+401	+1,3
4. Tilojen jäähdytys	0,0	+5,1	0,0	+1 153	+1 153	+3,7

## Pientalot

Taulukko 3.25 osoittaa yllämpenemisen torjuntakeinojen (kts. taulukko 3.5) vaikutuksen 60-luvun pientalon vuotuiseseen sähkönkulutukseen sekä energiakustannuksiin. Tulokset osoittavat että, auringonsuojakalvon asentaminen alkuperäisiin ikkunoihin tapauksessa 2 kasvattaa hieman kohteen lämmitystarvetta ja energiakustannuksia, kuten 80-luvun vanhainkodissa tai 70-luvun kerrostalossa. Tapauksissa 3 ja 4 uusien ikkunoiden asentaminen vähentää kohteen lämmitystarvetta ja vuotuisen energiakustannukset vähenevät lasitusratkaisusta riippuen noin 5–6 %. Tapauksessa 5 koneellisen poistoilmanvaihdon tehostaminen, jonka vaikutus yllämpenemiseen on erittäin vähäinen (kts. taulukko 3.22), kasvattaa vuotuisia energiakustannuksia hieman yli 0,5 %, eli 35 €. Pientalon olohuoneen aktiivinen jäähdytys, jolla pystytään hallitsemaan asuintilojen lämpöoloja tehokkaasti, kasvattaa koko rakennuksen tasolla energiakustannuksia hieman alle 2 %, eli 93 €. Aktiivisen jäähdytyksen energiakustannus rakennuksen nettoalaan kohden on tällöin noin 0,7 €/m<sup>2</sup>.

**Taulukko 3.25.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus 60-luvun pientalon ostoenergiankulutukseen (MWh/a) ja energiakustannuksiin (€/a) perustapaukseen verrattuna vuoden 2018 aikana.

Tapaukset	Energiankulutus		Energiakustannukset	
	Sähkö	Sähkö	Ero (%)	
1. Perustapaus	34,5	5 637	0,0	
2. Auringonsuoja- kalvo	+0,8	+135	+2,4	
3. Uudet ikkunat	-2,1	-351	-6,2	
4. Uudet auringon- suojaikkunat	-1,8	-296	-5,3	
5. IV-yötehostus 30 %	+0,2	+35	+0,6	
6. Tilojen jäähdytys	+0,6	+93	+1,6	

Taulukko 3.26 osoittaa yllämpenemisen torjuntakeinojen (kts. taulukko 3.6) vaikutuksen uudispientalon vuotuisen sähkönkulutukseen sekä energiakustannuksiin. Tulokset osoittavat että, tutkituilla ratkaisuilla on varsin pieni vaikutus esimerkkirakennuksen energiankulutukseen ja energiakustannuksiin. Aktiivista jäähdytystä vaille olevat ratkaisut (tapaukset 2–4), joiden vaikutus yllämpenemiseen on varsin pieni, kasvattavat vuotuisia energiakustannuksia enimmillään noin 3 %, eli 71 €, ilmanvaihdon yöaikaisen tehostuksen tapauksessa 4. Pientalon yläkerran aulatilaa aktiivinen jäähdytys, jolla pystytään hallitsemaan makuuhuoneiden lämpöoloja tehokkaasti, kasvattaa koko rakennuksen tasolla energiakustannuksia hieman vähemmän kuin ilmanvaihdon 60 %:n tehostus, eli 67 €. Aktiivisen jäähdytyksen energiakustannus rakennuksen nettoalaan kohden on tällöin noin 0,4 €/m<sup>2</sup>.

**Taulukko 3.26.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus uudispientalon ostoenergiankulutukseen (MWh/a) ja energiakustannuksiin (€/a) perustapaukseen verrattuna vuoden 2018 aikana.

Tapaukset	Energian- kulutus, sähkö	Energia- kustannukset, sähkö	Energia- kustannukset, ero (%)
1. Perustapaus	13,0	2 442	0,0
2. Uudet auringon- suojaikkunat	+0,1	+24	+1,0
3. IV-yötehostus 30 %	+0,1	+26	+1,1
4. IV-yötehostus 60 %	+0,4	+71	+2,9
5. Tilojen jäähdytys	+0,4	+67	+2,8

## 4 Korkeiden lämpötilojen terveyshaitat

Helteestä aiheutuvien vakavien terveyshaittojen (kuolleisuus, sairaalahoitajaksot) määrää Manner-Suomessa arvioitiin nykytilanteessa (vuosina 1999–2018) sekä tulevaisuudessa eri ilmastoskenaarioissa ja aikapisteissä (2050, 2080). Tulevaisuuden vaikutuksia tarkasteltiin tilanteessa, jossa väestö ja yhteiskunta eivät sopeudu muuttuviin ilmasto-olosuhteisiin. Lisäksi arvioitiin asuntojen tai palvelutalojen yllämpenemisen ehkäisyyn tähtäävien sopeutumistoimien vaikutusta vakaviin terveyshaittoihin sekä terveyshaitoista syntyviin kustannuksiin. Sopeutumistoimien osalta arvioinnin tulokset on kuvattu kappaleessa 5.2.

Helteen terveyshaittojen laskenta perustui ensisijaisesti helleaaltopäivistä aiheutuviin haittoihin yli 65-vuotiaiden ikäryhmässä, sillä aikaisempien selvitysten perusteella kansanterveyden kannalta merkittävät vakavat terveyshaitat liittyvät Suomessa pitkittyvään helteeseen ja ilmenevät pääasiallisesti ikääntyneiden keskuudessa (Lahdensivu ym. 2023). Laskennassa sovellettiin ulkoilman lämpötilan ja kuolleisuuden/sairaalahoitajaksot välisiä altiste-vastesuhteita. Nämä altiste-vastesuhteet kuvastavat epäsuorasti korkeista sisälämpötiloista aiheutuvia vaikutuksia, sillä rakennusten yllämpeneminen on keskeinen tekijä helteen terveyshaittojen ilmenemisen taustalla. Korkeista sisälämpötiloista aiheutuvien vaikutusten suora arvioiminen ei ole tois- taiseksi mahdollista, sillä ulko- ja sisälämpötilojen ja toisaalta sisälämpötilojen ja terveyshaittojen välisiä kvantitatiivisia yhteyksiä ei tunneta riittävän hyvin.

### 4.1 Terveyshaitat nykyisin

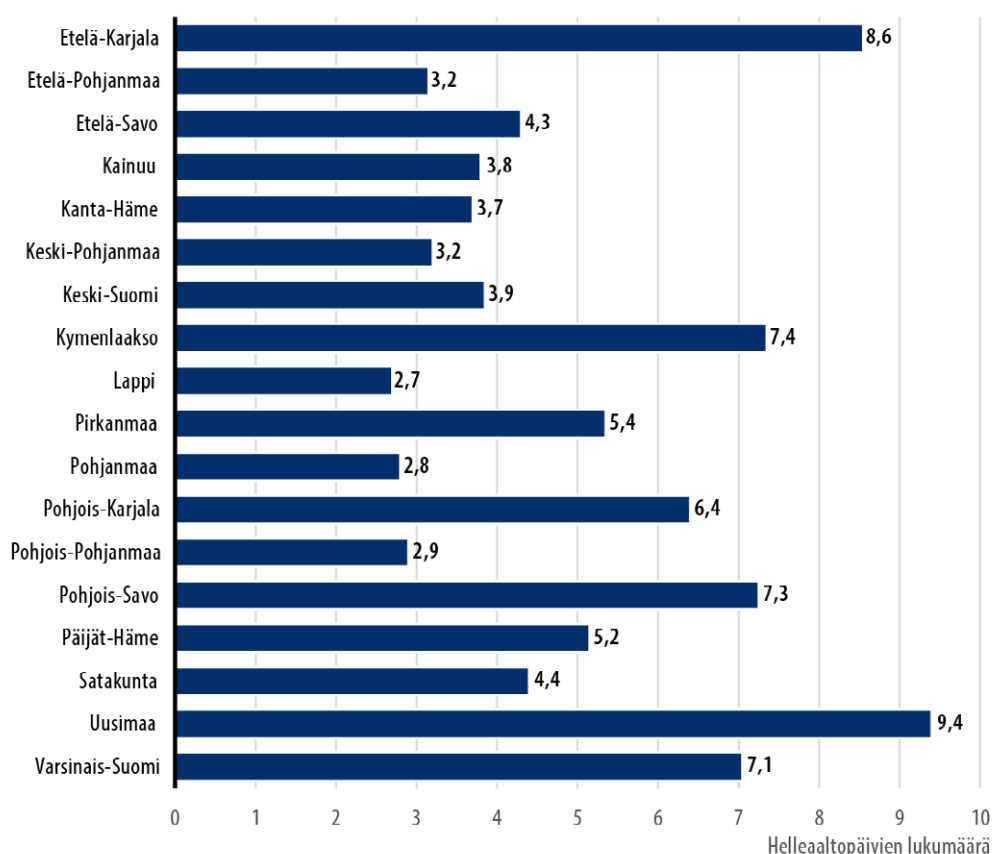
Arvio helteen terveysvaikutuksista nykyilmastossa perustui maakuntakohtaisiin lämpötilahavaintoihin vuosina 1999–2018. Hellepäivän kynnyslämpötilaksi katsottiin vuorokauden keskilämpötila 20,8 astetta, joka oli Uudenmaan lämpötilajakauman 90. prosenttipiste touko-elokuussa 1999–2018, ja helleaallon vähimmäiskestoksi kolme peräkkäistä vuorokautta. Samaa helleaaltopäivän kriteeriä ja pääkaupunkiseudun väestölle määritettyjä altiste-vastesuhteita sovellettiin arvioinnissa kaikkiin maakuntiin, koska kattavaa aluekohtaista tietoa altiste-vastesuhteesta ei ollut saatavilla. On kuitenkin todennäköistä, että kuuman sään terveyshaitat alkavat suurin piirtein samassa lämpötilassa eri puolilla Suomea.

Helleaaltopäivien lukumäärässä ja vastaavasti myös terveyshaittojen määrässä on huomattavaa alue- ja vuosikohtaista vaihtelua. Vuosina 1999–2018 helleaaltopäivien keskimääräinen vuosittainen lukumäärä vaihteli maakunnittain kolmesta yhdeksään päivään, ollen pienin Lapissa ja suurin Uudellamaalla (kuva 4.1). Yleisesti katsoen



helleaaltopäivien esiintyminen oli yleisempää Etelä- ja Itä-Suomessa ja vähäisempää Pohjois- ja Länsi-Suomessa.

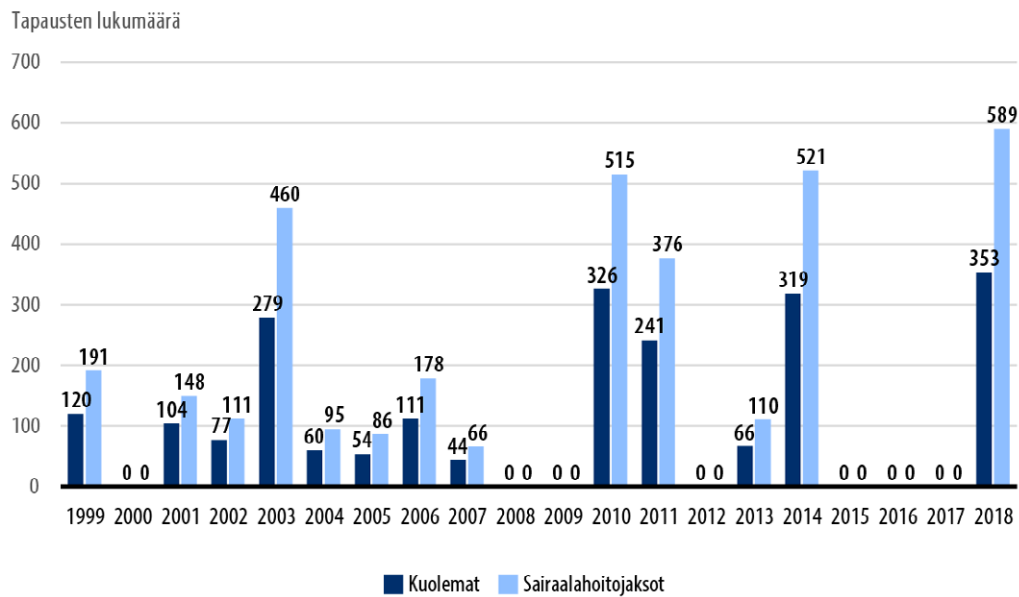
**Kuva 4.1.** Helleaaltopäivien keskimääräinen vuosittainen lukumäärä maakunnittain vuosina 1999–2018.



Kuumimpina kesinä ajanjaksolla 1999–2018 helleaalloista aiheutui koko Manner-Suomen alueella useita satoja ennenaikaisia kuolemia ja sairaalahoitajaksoja. Viileimpinä kesinä vakavia haittoja ei puolestaan esiintynyt tässä arvioinnissa käytetyn helleaallon määritelmän rajoissa lainkaan (kuva 4.2). Suurimpia terveyshaitat olivat ennätyskellisen helteisenä kesänä 2018. Vuosina 1999–2008 kuolemia tapahtui kaiken kaikkiaan 847 ja sairaalahoitajaksoja 1 335 ja vuosina 2009–2018 vastaavasti 1 304 ja 2 113. Vakavat terveyshaitat siis lisääntyivät tarkastelujakson jälkimmäisellä puoliskolla yli 50 %. On hyvä huomata, että kuvassa 4.2 esitetyt vuosikohtaiset lukumäärät jossain määrin yliarvioivat vaikutuksia ajanjakson alkupuolella ja aliarvioivat vaikutuksia jakson loppupuolella, koska kaikkien vuosien kohdalla laskelmat perustuvat vuoden 2009 väestömäärään ja kuolleisuuden/sairastuvuuden taustariskiin. Vuosikohtaiset arviot

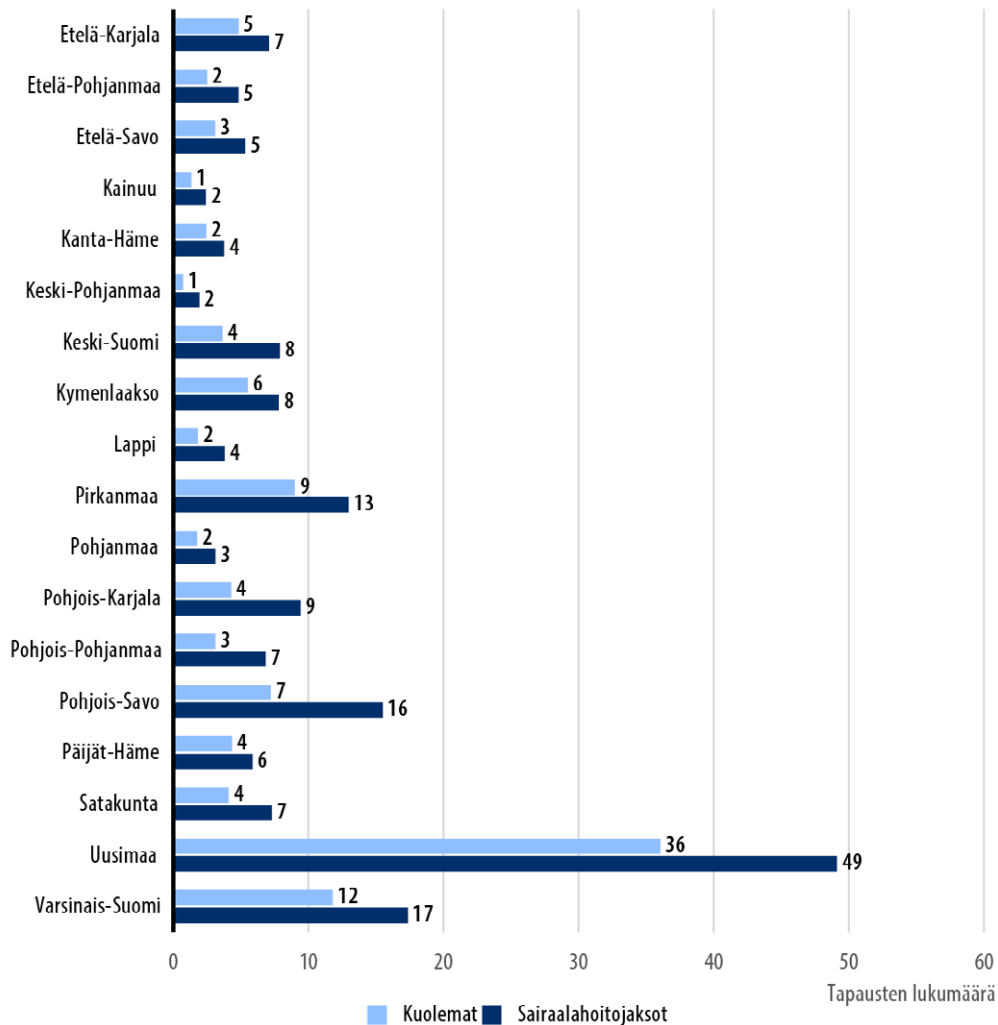
eivät siten kuvasta väestön ikääntymisestä johtuvaa terveysriskin lisääntymistä tarkastellun ajanjakson aikana.

**Kuva 4.2.** Helleaalloista aiheutuneet kuolemat ja sairaalahoitojaksot Manner-Suomessa vuosina 1999–2018.



Helteen vakavien terveyshaittojen kokonaismäärä on selvästi suurin Uudellamaalla, mitä selittävät helleaaltopäivien yleisyys ja suuri väestömäärä suhteessa muihin maakuntiin (kuva 4.3). Ajanjaksolla 1999–2018 helleaaltopäivistä aiheutui Uudellamaalla vuosittain keskimäärin 36 ennenaikaista kuolemaa ja 49 sairaalahoitojaksoa. Vähäisimpiä terveyshaitat olivat Pohjois- ja Länsi-Suomen maakunnissa, vuosittain keskimäärin muutamia kuolemia ja sairaalahoitojaksoja.

**Kuva 4.3.** Helleaalloista vuosittain keskimäärin aiheutuneet kuolemat ja sairaalahoitojaksot maakunnittain vuosina 1999–2018.



Koko Manner-Suomessa helleaaltopäivistä aiheutui ajanjaksolla 1999–2018 vuosittain keskimäärin 108 ennen aikaista kuolemaa ja 172 sairaalahoitojaksoa (taulukko 4.1). Kaikista kuolemista 33 % ja sairaalahoitojaksoista 28 % tapahtui Uudellamaalla. Kun terveyshaittojen lukumäärä suhteutetaan ikääntyneiden väestömäärään, ero vaikutuksissa kuitenkin pienentyy maakuntien välillä. Sairaalahoitojaksojen osalta suhteelliset vaikutukset ovat Pohjois-Savossa sekä Pohjois- ja Etelä-Karjalassa jopa suurempia kuin Uudellamaalla, mikä selittyy sairaalahoidon tarpeen suuremmalla taustariskillä näissä maakunnissa.

**Taulukko 4.1.** Helleaalloista ja lämpimistä päivistä vuosittain keskimäärin aiheutuneet kuolemat ja sairaalahoitajaksot maakunnittain koko väestössä sekä 100 000:a yli 65-vuotiasta asukasta kohden vuosina 1999–2018.

Maakunta	Helleaallot				Lämpimät päivät	
	Kuolemat, koko väestö	Kuolemat / 100 000 asukasta	Sairaalahoito, koko väestö	Sairaalahoito / 100 000 asukasta	Kuolemat, koko väestö	Sairaalahoito, koko väestö
Etelä-Karjala	5	17	7	25	5	6
Etelä-Pohjanmaa	2	7	5	13	3	7
Etelä-Savo	3	9	5	16	3	6
Kainuu	1	8	2	15	1	3
Kanta-Häme	2	8	4	12	3	5
Keski-Pohjanmaa	1	6	2	16	1	2
Keski-Suomi	4	8	8	17	4	9
Kymenlaakso	6	15	8	22	5	7
Lappi	2	5	4	11	2	4
Pirkanmaa	9	11	13	16	10	13
Pohjanmaa	2	6	3	10	2	4
Pohjois-Karjala	4	13	9	28	4	9
Pohjois-Pohjanmaa	3	5	7	12	4	10
Pohjois-Savo	7	15	16	32	7	15
Päijät-Häme	4	11	6	15	5	6
Satakunta	4	9	7	16	5	9
Uusimaa	36	18	49	24	33	43
Varsinais-Suomi	12	14	17	21	11	16
<b>Manner-Suomi</b>	<b>108</b>	<b>12</b>	<b>172</b>	<b>19</b>	<b>110</b>	<b>174</b>

Terveyshaittojen määrä laskettiin vertailun vuoksi myös päivittäisiin lämpötiloihin perustuen (taulukko 4.1). Näin laskettuna keskimääräiset vuosittaiset vaikutukset (110 kuolemaa ja 174 sairaalahoitajaksoa koko Manner-Suomessa) olivat lähes samansuuruisia kuin helleaaltopäiviin perustuvassa arviossa. Nämä kaksi laskentatapaa eivät ole keskenään täysin verrannollisia, sillä päivittäisten lämpötilojen vaikutusta arvioitaessa vertailukohtana on vuorokauden keskilämpötila, jossa kuolleisuus tai sairaalahoitajaksot ovat kesäaikana pienimmillään. Tämä minimivaikutustasoa kuvaava lämpötila on selvästi hellepäivän kynnyslämpötilaa alhaisempi (vuorokauden keskilämpötila 18,8 / 17,7 astetta). Päivittäisiin lämpötiloihin perustuvan arvion voidaan katsoa edustavan lämpimän ja kuuman sään vaikutuksia pois lukien pitkittyvästä helteestä aiheutuva lisävaikutus. Vertailu kuitenkin osoittaa, että helleaaltoihin keskittyvä tarkastelu antaa varsin hyvän kuvan helteen kansanterveydellisten vaikutusten mittaluokasta.

Tämän arvioinnin vaikutusestimaatit ovat sairaalahoitajaksoiden osalta jonkin verran suurempia kuin RAIL-projektissa saadut estimaatit (Lahdensivu ym. 2023). RAIL-projektissa helleaaltopäivistä arvioitiin aiheutuvan nykyisin (ajanjaksolla 1999–2018) vuosittain keskimäärin 38 sairaalahoitajaksoa Uudellamaalla ja 4,8 sairaalahoitajaksoa Pohjois-Pohjanmaalla. Ero tuloksissa johtuu tarkentuneista maakuntakohtaisista arvioista koskien sairaalahoitoon joutumisen taustariskiä.

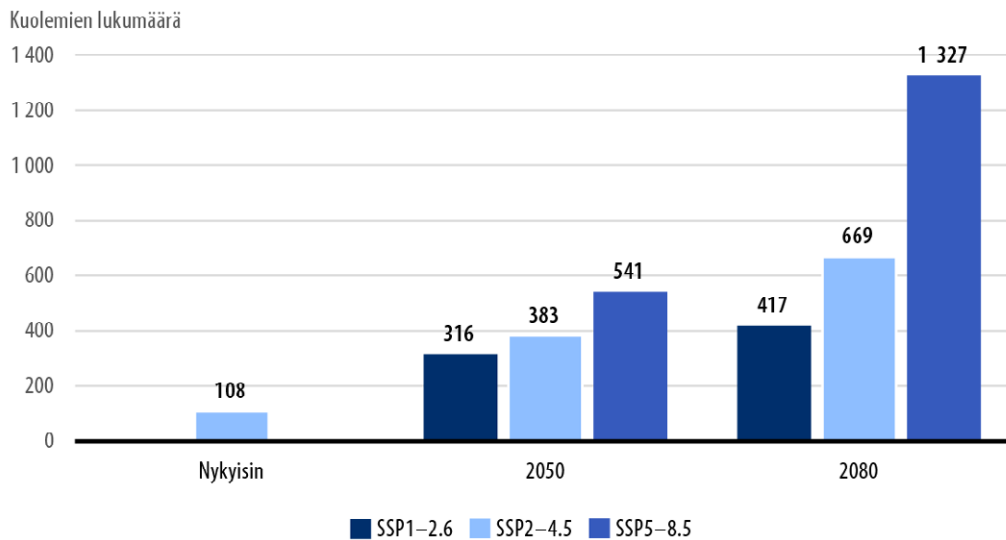
## 4.2 Terveyshaitat tulevaisuudessa

Helleaaltojen terveysvaikutusten arviointi tulevaisuuden ilmastossa perustui 25 ilmastomallin tuottamiin simuloituihin lämpötiloihin. Arvioinnissa huomioitiin ikääntyneiden väestömäärän muutos tulevaisuudessa eri maakunnissa. Laskennassa hellepäivän kynnyslämpötilana käytettiin samaa arvoa kuin nykyhetken vaikutuksia arvioitaessa (20,8 °C), joten tulevaisuutta koskevat estimaatit kuvaavat tilannetta, jossa väestö ja yhteiskunta eivät sopeudu lämpenevään ilmastoon. Kyseessä on siis "worst case" arvio, joka on hyvin epätodennäköinen. Luotettavaa määrällistä arviota siitä, missä määrin sopeutumista tulee tapahtumaan, ei pystytä kuitenkaan antamaan.

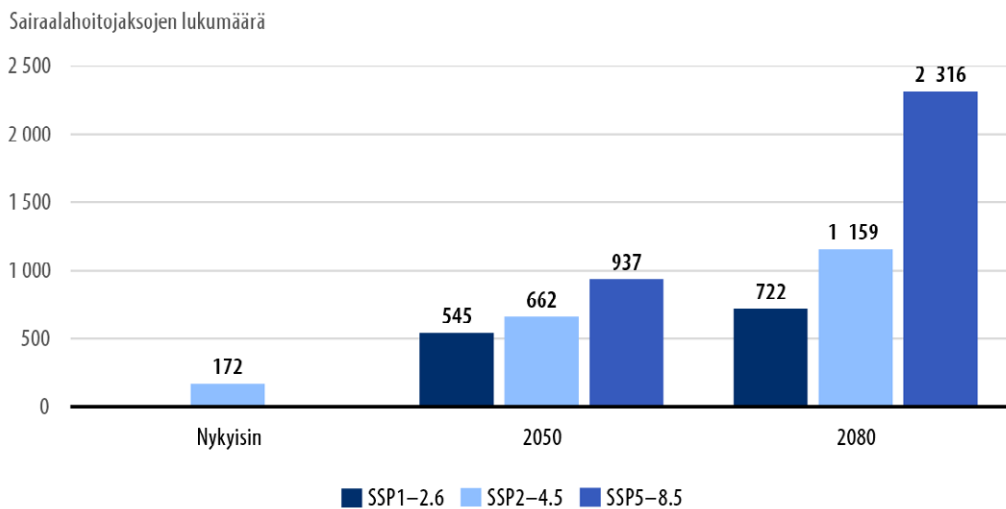
Helleaaltopäivien terveyshaitat tulevat lisääntymään huomattavasti jo lähitulevaisuudessa, jos haittojen torjumiseksi ei tehdä sopeutumistoimia. Keskiskenaariossa SSP2-4.5 helleaaltopäiviin liittyvä kuolleisuus ja sairaalahoitajaksoiden määrä ovat 3–4 kertaa nykyistä suurempia jo vuoteen 2050 mennessä (kuvat 4.4 ja 4.5). Riskien lisääntymiseen vaikuttaa lähivuosikymmenien aikana helleaaltopäivien yleistymisen lisäksi voimakkaasti väestön ikääntyminen. Vuosisadan loppua kohden terveysvaikutusten määrä edelleen kasvaa, mutta haittojen suuruus riippuu voimakkaammin ilmastomuutoksen hillinnän onnistumisesta. Vuoteen 2080 mennessä helteeseen liittyvän kuolleisuuden ja sairaalahoitajaksoiden määrän arvioidaan olevan keskiskenaariossa

6–7 kertaa suurempia kuin nykyisin. On kuitenkin syytä huomioida, että mitä pidemmälle ennusteet ulottuvat sen suurempia epävarmuuksia niihin liittyy. Haittoihin vaikuttavat ilmaston lämpenemisen ja sopeutumisen lisäksi myös mm. aluekohtaiset muutokset väestön määrässä, ikärakenteessa ja terveydentilassa sekä muu yhteiskunnallinen kehitys.

**Kuva 4.4.** Helleaalloista vuosittain keskimäärin aiheutuvat kuolemat Manner-Suomessa nykyisin sekä tulevaisuudessa eri ilmastoskenaarioissa ja aikapisteissä.



**Kuva 4.5.** Helleaalloista vuosittain keskimäärin aiheutuvat sairaalahoitajaksot Manner-Suomessa nykyisin sekä tulevaisuudessa eri ilmastoskenaarioissa ja aikapisteissä.



Taulukossa 4.2 on esitetty maakuntakohtaiset arviot helleaaltopäivien terveysvaikutuksista tulevaisuudessa keskiskenaariossa SSP2-4.5, joka on tällä hetkellä todennäköisin tulevaisuuden näkymä ilmastonmuutoksen etenemisestä. Terveyshaittojen kokonaisuus pysyy tulevaisuudessa selvästi suurimpana Uudellamaalla. Yli 65-vuotiaiden väestömäärään suhteutettuna terveyshaitat ovat kuitenkin monessa maakunnassa yhtä suuria tai jopa suurempia kuin Uudellamaalla.

**Taulukko 4.2.** Helleaalloista vuosittain keskimäärin aiheutuvat kuolemat ja sairaalahoitajaksot maakunnittain koko väestössä sekä 100 000:a yli 65-vuotiasta asukasta kohden SSP2-4.5 ilmastoskenaariossa tulevaisuuden eri aikapisteissä.

Maakunta	2050				2080			
	Kuolemat		Sairaalahoito		Kuolemat		Sairaalahoito	
	Koko väestö	per 100 000	Koko väestö	per 100 000	Koko väestö	per 100 000	Koko väestö	per 100 000
Etelä-Karjala	14	37	21	55	24	53	35	79
Etelä-Pohjanmaa	10	19	21	38	19	30	40	62
Etelä-Savo	12	28	22	51	21	42	39	77
Kainuu	4	18	7	35	7	29	14	55
Kanta-Häme	11	20	19	35	20	31	34	54
Keski-Pohjanmaa	3	18	8	47	6	29	16	77
Keski-Suomi	16	21	36	48	28	32	63	73
Kymenlaakso	16	33	24	48	28	49	41	72
Lappi	6	13	13	27	12	20	25	43
Pirkanmaa	36	25	58	40	62	37	99	59
Pohjanmaa	9	19	17	36	17	32	32	59
Pohjois-Karjala	14	30	30	65	25	45	53	97
Pohjois-Pohjanmaa	18	17	42	39	34	27	79	63
Pohjois-Savo	21	29	47	66	36	42	81	96

Maakunta	2050				2080			
	Kuolemat		Sairaalahoito		Kuolemat		Sairaalahoito	
	Koko väestö	per 100 000	Koko väestö	per 100 000	Koko väestö	per 100 000	Koko väestö	per 100 000
Päijät-Häme	19	29	27	43	32	43	47	63
Satakunta	17	28	31	50	30	41	53	73
Uusimaa	117	28	175	42	201	41	300	62
Varsinais-Suomi	40	29	63	46	67	42	107	67
<b>Manner-Suomi</b>	<b>383</b>	<b>26</b>	<b>662</b>	<b>44</b>	<b>669</b>	<b>38</b>	<b>1159</b>	<b>66</b>



## 5 Sopeutustoimien kustannus- hyötytarkastelu: lämpötila

### 5.1 Energia- ja investointikustannukset

Tässä luvussa tarkastellaan luvussa 3.1 esiteltyn ylilämpenemisen torjuntakeinojen kustannuksia esimerkkirakennuksissa saavutettuun hyötyyn nähden. Kustannustarkastelussa otetaan huomioon hellevuoden 2018 aikaiset energiakustannukset (kts. luku 3.5.2) sekä ylilämpenemisen torjuntakeinojen investointikustannukset. Saavutettua hyötyä mitataan sillä, kuinka paljon kukin ylilämpenemisen torjuntakeino vähentää esimerkkirakennuksen kuumimman asuintilan 25 °C ylittäviä astetunteja vuoden aikana (kts. luku 3.5.1). Tarkastelussa ylilämpenemisen torjuntakeinojen kustannustehokkuutta mitataan tunnusluvun avulla, joka on vuotuisen energia- ja investointikustannuksen suhde saavutettuun hyötyyn nähden.

#### Vanhainkodit

Taulukko 5.1 osoittaa, että ilmanvaihdon 30 %:n tehostaminen on tutkituista ylilämpenemisen torjuntakeinoista kustannustehokkain 80-luvun vanhainkodissa, koska sen toteuttamisen ei oleteta vaativan investointeja. Sen sijaan ilmanvaihdon 60 %:n tehostamisen oletetaan vaativan uuden isomman ilmanvaihtokoneen sekä väljemmän kanaviston asentamista, joiden investointikustannus on merkittävä. Mikäli ilmanvaihdon 60 %:n tehostaminen voidaan toteuttaa olemassa olevalla ilmanvaihtojärjestelmällä, olisi sen kustannustehokkuus samaa suuruusluokkaa kuin 30 %:n tehostamisen tapauksessa. Auringonsuojakalvon asentaminen ikkunoihin on tutkituista ratkaisuista ilmanvaihdon 30 %:n tehostuksen jälkeen seuraavaksi kustannustehokkain ratkaisu. Uusien ikkunoiden asentamisen kustannustehokkuus pelkästään ylilämpenemisen torjunnan näkökulmasta on varsin heikko esimerkkirakennuksessa, mutta ikkunoiden uusiminen tehdään tyypillisesti vanhojen ikkunoiden heikon kunnon vuoksi ja tällöin hyvän auringonsuojauksen lisäkustannus on tyypillisesti suhteellisen pieni saavutettavaan hyötyyn nähden. Tilojen aktiivisen jäähdytyksen toteuttaminen vaatii jäähdytyskoneen, jäähdytysvesiverkoston sekä jäähdyttävien huonelaitteiden asentamista, jonka investointikustannus on merkittävä. Mutta, se on tutkituista ratkaisuista ainoa, jolla huonelämpötilat saadaan täysin hallintaan.

**Taulukko 5.1.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus 80-luvun vanhainkodin kuumimman asunnon 25 °C yllittäviin astetunteihin sekä energiakustannuksiin. Ratkaisuvaihtoehtojen investointikustannukset sekä energia- ja investointikustannusten suhde saavutettuun hyötyyn.

Tapaukset	Aste- tuntien vähenemä (°Ch)	Energia- kustannus (€/a)	Investointi kustannus (€)	Kustannus yht.(€)	Kustannus yht./ astetuntien vähenemä (€/°Ch)
2. Auringon- suojakalvo	3 848	1 178	42 742	43 920	11,4
3. Uudet aurion- suojaikkunat	3 210	-3 939	200 644	196 705	61,3
4. IV-tehostus 30 %	2 723	1 312	0	1 312	0,5
5. IV- yötehostus 30 %	1 101	421	0	421	0,4
6. IV-tehostus 60 %	4 567	2 796	278 210	281 006	61,5
7. IV- yötehostus 60 %	2 081	905	278 210	279 115	134,1
8. Tilojen jäähdytys	10 666	1 524	286 142	287 666	27,0

Taulukko 5.2 osoittaa, että ilmanvaihdon 30 %:n tehostaminen on tutkituista ylläpennemisen torjuntakeinoista kustannustehokkain uudisvanhainkodissa, koska sen toteuttamisen ei oleteta vaativan investointeja. Ratkaisu vähentää ylläpennemistä merkittävästi, koska uudisvanhainkodin ilmanvaihto on varustettu aktiivisella jäädytyksellä. Kuten 80-luvun vanhainkodissa, myös uudisvanhainkodissa ilmanvaihdon 60 %:n tehostamisen oletetaan vaativan lisäinvestoinnin suurempaa ilmanvaihtokoneeseen ja väljempään kanavistoon, joka heikentää ratkaisun kustannustehokkuutta merkittävästi. Jos ilmanvaihdon 60 %:n tehostaminen saadaan toteutettua ilman lisäinvestointeja, on ratkaisu erittäin kustannustehokas. Tilojen varustaminen aktiivisella jäädytyksellä vaatii investoinnit hieman suurempaan jäädytyskoneeseen sekä jäädytysvesiverkostoon ja huonelaitteisiin, joiden investointikustannus on niin merkit-

tävä saavutettuun hyötyyn nähden, että ratkaisun kustannustehokkuus jää varsin heikoksi. Ulkoisen auringonsuojauksen lisääminen on erittäin kallis ratkaisu saavutettavaan hyötyyn nähden esimerkikohteessa, joka on jo perustasoltaan varustettu erittäin hyvällä auringonsuojauksella.

**Taulukko 5.2.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus uudisvanhainkodin kuumimman asunnon 25 °C ylittäviin astetunteihin sekä energiakustannuksiin. Ratkaisuvaihtoehtojen investointikustannukset sekä energia- ja investointikustannusten suhde saavutettuun hyötyyn.

Tapaukset	Aste- tuntien vähenemä (°Ch)	Energia- kustannus (€/a)	Investointi kustannus (€)	Kustannus yht.(€)	Kustannus yht./ astetuntien vähenemä (€/°Ch)
2. Aurinkolippa	123	2	177 764	177 766	1 445,3
3. IV-tehostus 30 %	1 442	1 291	0	1 291	0,9
4. IV-tehostus 60 %	1 610	2 793	86 206	88 999	55,3
5. Tilojen jäähdytys	1 918	259	264 812	265 071	138,2

## Kerrostalot

Taulukko 5.3 osoittaa, että koneellisen poistoilmanvaihdon 30 %:n tehostaminen on tutkituista ratkaisuista kustannustehokkain yllämpenemisen torjuntakeino 70-luvun kerrostalossa, koska sen toteuttamisen ei oleteta vaativan investointeja. Tosin ratkaisu vähentää yllämpenemistä vain vähän. Tilojen aktiivinen jäähdytys asuntojen olohuoneisiin asennettavalla jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla on erittäin kustannustehokas ratkaisu ja sillä saadaan torjuttua asuntojen yllämpeneminen. Taulukossa esitetty tilojen jäähdytyksen investointikustannus on kerrostalon kaikkien asuntojen ilmalämpöpumppujen yhteenlaskettu kustannus. Ilmalämpöpumpun kustannus asennettuna esimerkiksi 81 m<sup>2</sup>:n asuntoon (3h+k) maksaa esimerkikirakennuksessa noin 1 900€. Auringonsuojakalvon asentaminen olemassa oleviin ikkunoihin on lähes yhtä kustannustehokas ratkaisu, kuin ilmalämpöpumpun asentaminen, mutta ratkaisun vaikutus yllämpenemiseen on selvästi pienempi. Uusien ikkunoiden asentamisen kustannustehokkuus on selvästi heikompi kuin muiden tutkittujen ratkaisujen, mutta kun ikkunat on kuntonsa puolesta uusittava, on yllämpenemisen torjunta auringonsuojakunoiden avulla selvästi kustannustehokkaampaa kuin uusilla perustason ikkunoilla.

**Taulukko 5.3.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus 70-luvun kerrostalon kuumimman makuuhuoneen 25 °C ylittäviin asetunteihin sekä energiakustannuksiin. Ratkaisuvaihtoehtojen investointikustannukset sekä energia- ja investointikustannusten suhde saavutettuun hyötyyn.

Tapaukset	Asetuntien vähenemä (°Ch)	Energia-kustannus (€/a)	Investointi-kustannus (€)	Kustannus yht.(€)	Kustannus yht./ asetuntien vähenemä (€/°Ch)
2. Auringon-suojakalvo	4 369	721	23 000	23 721	5,4
3. Uudet ikkunat	1 358	-1 473	95 621	94 148	69,3
4. Uudet auringon-suojaikkunat	3 347	-1 246	100 086	98 840	29,5
5. IV-yötehostus 30 %	1 536	510	0	510	0,3
6. Tilojen jäähdytys	12 695	3 135	40 097	43 232	3,4

Taulukko 5.4 osoittaa, että tilojen aktiivinen jäähdytys asuntojen olohuoneisiin asennettavalla jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla on tutkituista ratkaisuista selvästi kustannustehokkain uudiskerrostalossa ja sillä saadaan torjuttua asuntojen yllämpeneminen. Kaikissa tutkituissa uudiskerrostalon tapauksissa on mukana ilmanvaihdon 30 %:n tehostaminen, mutta 60 %:n tehostamisen oletetaan vaativan lisäinvestointeja hieman suurempaan ilmanvaihtokoneeseen sekä väljempään kanavistoon, joka heikentää ratkaisun kustannustehokkuutta. Ulkoisen auringonsuojauksen lisääminen on erittäin kallis ratkaisu saavutettavaan hyötyyn nähden esimerkikohteessa, joka on jo perustasoltaan varustettu erittäin hyvällä auringonsuojauksella.

**Taulukko 5.4.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus uudiskerrostalon kuumimman makuuhuoneen 25 °C ylittäviin astetunteihin sekä energiakustannuksiin. Ratkaisuvaihtoehtojen investointikustannukset sekä energia- ja investointikustannusten suhde saavutettuun hyötyyn.

Tapaukset	Aste- tuntien vähenemä (°Ch)	Energia- kustannus (€/a)	Investointi kustannus (€)	Kustannus yht.(€)	Kustannus yht./ astetuntien vähenemä (€/°Ch)
2. Aurinkolippa	60	0	39 819	39 819	663,7
3. IV-yötehostus 60%	826	401	28 567	28 968	35,1
4. Tilojen jäähdytys	5 260	1 153	35 122	36 275	6,9

## Pientalot

Taulukko 5.5 osoittaa, että koneellisen poistoilmanvaihdon 30 %:n tehostaminen on tutkituista ratkaisuista kustannustehokkain yllämpenemisen torjuntakeino, koska sen toteuttamisen ei oleteta vaativan investointeja, mutta ratkaisun vaikutus yllämpenemiseen on erittäin vähäinen. Tilojen jäähdytys pientalon olohuoneeseen asennettavalla lämmittävällä ja jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla erittäin kustannustehokas ratkaisu ja sillä saadaan torjuttua oleskelutilojen yllämpeneminen, kun asunnon väliovia pidetään auki. Kuten 70-luvun kerrostalossa, myös 60-luvun pientalossa auringonsuojakalvon asentaminen olemassa oleviin ikkunoihin on lähes yhtä kustannustehokas ratkaisu, kuin ilmalämpöpumpun asentaminen, mutta ratkaisun vaikutus yllämpenemiseen on selvästi pienempi. Kuten 70-luvun kerrostalossa, myös 60-luvun pientalossa uusien ikkunoiden asentamisen kustannustehokkuus on selvästi heikompi kuin muiden tutkittujen ratkaisujen, mutta kun ikkunat on kuntonsa puolesta uusittava, on yllämpenemisen torjunta auringonsuojakikkunoiden avulla kustannustehokkaampaa kuin uusilla perustason ikkunoilla.

**Taulukko 5.5.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus 60-luvun pientalon kuumimman makuuhuoneen 25 °C ylittäviin astetunteihin sekä energiakustannuksiin. Ratkaisuvaihtoehtojen investointikustannukset sekä energia- ja investointikustannusten suhde saavutettuun hyötyyn.

Tapaukset	Aste- tuntien vähenemä (°Ch)	Energia- kustannus (€/a)	Investointi- kustannus (€)	Kustannus yht.(€)	Kustannus yht./ astetuntien vähenemä (€/°Ch)
2. Auringon- suojakalvo	522	135	1 900	2 035	3,9
3. Uudet ikkunat	450	-351	7 161	6 810	15,1
4. Uudet aurigon- suojaikkunat	526	-296	7 623	7 327	13,9
5. IV- yötehostus 30%	83	35	0	35	0,4
6. Tilojen jäähdytys	1 378	93	2 428	2 521	1,8

Taulukko 5.6 osoittaa, että kaikki uudispientalossa tutkitut yllämpenemisen torjunta-ratkaisut ovat energia- ja investointikustannuksiltaan suhteellisen pieniä. Kuten useimmissa muissakin esimerkkirakennuksissa, myös uudispientalossa ilmanvaihdon tehostaminen on kustannustehokkain ratkaisu, joskin sen vaikutus yllämpenemiseen on hyvin pieni. Esimerkkikohteessa oletetaan, että ilmanvaihdon 60 %:n tehostaminen vaatii investoinnin suurempaa ilmanvaihtokoneeseen, mutta toisin kuin muissa esimerkkikohteissa, saman kanaviston oletetaan riittävän 60 %:n tehostamistapauksessa. Tilojen jäähdytys uudispientalon yläkerran aulaan asennettavalla lämmittävällä ja jäähdyttävällä ilmalämpöpumpulla on tutkituista ratkaisuista toiseksi kustannustehokkain, mutta se on ratkaisuista ainoa, jolla saadaan hallittua yläkerran makuuhuoneiden lämpöoloja. Uudispientalossa perustason auringonsuojauksella varustettujen uusien ikkunoiden korvaaminen etelä- ja länsifasadeilla auringonsuojaikkunoilla vaatii vain pienen lisäinvestoinnin, joten ratkaisu on kustannustehokas yllämpenemisen torjuntakeino, vaikka sen vaikutus esimerkkitapauksessa kuumimman makuuhuoneen yllämpenemiseen on vähäinen.

**Taulukko 5.6.** Eri ratkaisuvaihtoehtojen vaikutus uudispientalon kuumimman makuuhuoneen 25 °C ylittäviin astetunteihin sekä energiakustannuksiin. Ratkaisuvaihtoehtojen investointikustannukset sekä energia- ja investointikustannusten suhde saavutettuun hyötyyn.

Tapaukset	Aste- tuntien vähenemä (°Ch)	Energia- kustannus (€/a)	Investointi kustannus (€)	Kustannus yht.(€)	Kustannus yht./ astetuntien vähenemä (€/°Ch)
2. Uudet aurigon- suojaikkunat	427	24	904	928	2,2
3. IV-yötehostus 30 %	432	26	0	26	0,1
4. IV-yötehostus 60 %	781	71	804	875	1,1
5. Tilojen jäähdytys	4 074	67	2 428	2 495	0,6

## 5.2 Vaikuttavuus terveyshaittojen ehkäisyssä

Asuntojen ja palvelutalojen yllämpenemisen torjuntatoimenpiteiden potentiaalista vaikutusta helteen vakavien terveyshaittojen ehkäisyssä tarkasteltiin kesän 2018 pitkittyneen, koko maan laajuisen helleaallon näkökulmasta. Helleaallosta aiheutuneiden kuolemien ja sairaalahoitajaksojen määrää arvioitiin nykytilanteessa sekä tilanteessa, jossa erityyppiset asunnot jäähdytettäisiin asuntokohtaisten ilmalämpöpumppujen avulla tai kaikkien nykyisin ilman ilmalämpöpumppua olevien asuntojen huonelämpötilaa laskettaisiin passiivisin keinoin yhdellä tai kahdella asteella. Tämän suuruinen lämpötilan lasku saattaisi olla useimmissa asunnoissa realistisesti saavutettavissa rakennuksen aurinkosuojausta ja yöaikaista tuuletusta parantamalla. Lisäksi arvioitiin palvelutalojen aktiivisen jäähdytyksen vaikuttavuutta.

Ilmalämpöpumppujen asentamista ja palvelutalojen jäähdytystä koskevissa skenaarioissa oletettiin, että aktiivisen jäähdytyksen avulla saadaan täysin ehkäistyä huone-tilojen yllämpeneminen ja helteestä aiheutuva terveysriski. Passiivisten jäähdytyskeinojen vaikutusta arvioitaessa puolestaan oletettiin, että huone-tilojen viilentäminen yhdellä tai kahdella asteella laskee terveysriskiä samassa suhteessa kuin vastaavan suuruinen lasku ulkoilman lämpötilassa. Vaikutusten laskennassa sovellettiin kaikkien

asuntotyyppien ja palvelutalojen osalta samoja kappaleessa 2.2.3 kuvattuja helleaaltopäivien ja korkeiden päivittäisten lämpötilojen vaikutusta kuvaavia altiste-astesuhteita.

Arvio kesän 2018 helleaallon terveysvaikutuksista sekä eri toimenpiteiden potentiaalinen vaikuttavuus terveyshaittojen ehkäisyssä on esitetty taulukossa 5.7. Helleaallosta aiheutui Manner-Suomessa arviolta 417 ennenaikaista kuolemaa ja 704 sairaalahoitajaksoa. Jos kaikki yli 65-vuotiaiden kodit (pientalot sekä rivi- ja kerrostaloasunnot) Manner-Suomessa jäähdytettäisiin ilmalämpöpumpun avulla, samankaltaisen helleaallon kuolleisuusvaikutuksista voitaisiin tämän arvioinnin perusteella ehkäistä 55 % ja sairaalahoitovaikutuksista 95 %. Vaikutukset kuolleisuuteen olisivat sairaalahoitajaksoja vähäisempiä, sillä suuri osa hellekuolemista tapahtuu sairaaloiden ja terveyskeskusten vuodeosastoilla, ja ne johtuvat joko täysin tai osittain vuodeosastojen lämpöolosuhteista. Rakennusten ylikämpeneminen voi myös johtaa sairaalahoidon tarpeen kasvuun pidentämällä vuodeosastojaksojen keskimääräistä pituutta. Tätä mahdollista vaikutusta ei kuitenkaan otettu arvioinnissa huomioon, koska tieto altiste-astesuhteesta puuttuu.



**Taulukko 5.7.** Kesän 2018 helleaallon terveysvaikutukset nykytilanteessa sekä tilanteessa, jossa toteutetaan rakennusten yllämpenemisen ehkäisyyn tähtäviä sopeutumistoimia yli 65-vuotiaiden väestöryhmässä. Asuntoihin kohdistuvat sopeutumistoimet (ilmalämpöpumpun asentaminen, huoneilman viilentäminen passiivisin keinoin) on oletettu toteutettavan asunnoissa, joissa ei ole nykyisin ilmalämpöpumppua.

<b>Sopeutumistoimet</b>	<b>Kuolemien kokonaismäärä (vähenemä nykytilanteesta)</b>	<b>Sairaalahoitojaksojen kokonaismäärä (vähenemä nykytilanteesta)</b>
<b>Nykytilanne (ei sopeutumistoimia)</b>	<b>417</b>	<b>704</b>
Ilmalämpöpumpun asentaminen kaikkiin asuntoihin	187 (-230)	36 (-668)
Ilmalämpöpumpun asentaminen pientaloihin	361 (-56)	534 (-170)
Ilmalämpöpumpun asentaminen kerrostaloasuntoihin	281 (-136)	317 (-387)
Ilmalämpöpumpun asentaminen rivitaloasuntoihin	380 (-37)	592 (-112)
Asuntojen huoneilman viilennys 1 asteella passiivisin keinoin	370 (-47)	558 (-146)
Asuntojen huoneilman viilennys 2 asteella passiivisin keinoin	316 (-101)	401 (-303)
Jäähdyttävä ilmastointi palvelutaloihin	405 (-12)	668 (-36)

Eri asuntotyyppejä vertailtaessa eniten terveyshaittoja voitaisiin ehkäistä jäähdyttämällä kerrostaloasunnot, koska näistä vain pieneen osaan (4,4 %) on toistaiseksi asennettu ilmalämpöpumppu. On mahdollista, että kerrostaloasuntojen aktiivisen jäähdytyksen avulla voitaisiin estää jopa nyt esitettyä arviota suurempi osuus helleaallojen terveyshaitoista, sillä kerrostaloasunnoissa yllämpenemiseen ja kuumuudelle altistumiseen on hankalampi vaikuttaa passiivisten jäähdytyskeinojen tai oman käyttäytymisen avulla kuin pien- ja rivitaloissa. Lisäksi kerrostaloasunnoissa asuvien ikääntyneiden määrä on suurin eteläisemmissä maakunnissa, joissa helleaaltopäiviä esiintyy yleisemmin kuin muualla Suomessa.

Ilmalämpöpumppujen asentamista koskevien sopeutumisskenaarioiden tulokset todennäköisesti jossain määrin yliarvioivat tämän toimenpiteen avulla saavutettavissa olevia hyötyjä helteen vakavien terveyshaittojen ehkäisyssä. Ilmalämpöpumpun jäähdytystehokkuuteen vaikuttavat asunnon ominaisuudet ja käyttötapa, joten käytännössä ilmalämpöpumppujen asentaminen ei todennäköisesti täysin ehkäisisi huoneitilojen yllämpenemistä ja terveysriskejä kaikissa asunnoissa. Epävarmuutta tuloksiin aiheutuu myös olettamasta, että ilmalämpöpumppujen nykyinen esiintyvyys asunnokannassa on samanlainen kaikissa maakunnissa ja eri-ikäisten asukkaiden kodeissa.

Yli 65-vuotiaiden keskuudessa kaikkien nykyisin ilman ilmalämpöpumppua olevien kotien (pientalot sekä kerros- ja rivitaloasunnot) huoneilman viilentäminen yhdellä asteella ehkäisisi korkeiden lämpötilojen kuolleisuusvaikutuksista 11 % ja sairaalahoitajaksoista 21 %. Kahden asteen viilennys vähentäisi vaikutuksia vastaavasti 24 % ja 43 %. Passiivisten jäähdytyskeinojen avulla voidaan siis olennaisesti vaikuttaa terveyshaittojen ilmenemiseen. Tulosta tulkitessa on kuitenkin syytä huomioida, että vaikka asuntojen kuumentuminen helteellä on suomalaisessa rakennuskannassa yleinen ongelma, yllämpenemisen voimakkuudessa on asuntojen välillä paljon vaihtelua (Lahdensivu ym. 2023). Nyt arvioidun suuruista terveyshaittojen vähenemistä ei siten todennäköisesti saavutettaisi laskemalla tasaisesti kaikkien asuntojen huonelämpötilaa yhdellä tai kahdella asteella, vaan todellisuudessa herkästi kuumentuvia asuntoja pitäisi pystyä viilentämään useammilla asteilla. Se, kuinka suuressa osassa näistä asunnoista olisi käytännössä mahdollista saavuttaa riittävä lämpötilojen lasku passiivisten keinojen avulla, on epävarmaa.

Palvelutalojen aktiivinen jäähdyttäminen ehkäisisi arvioinnin perusteella joitakin kymmeniä kuolemia ja sairaalahoitajaksoja. Vaikutus on huomattavasti vähäisempi kuin mitä asuntojen jäähdyttämisellä on mahdollista saavuttaa, koska palvelutaloissa asuu vain pieni osuus ikääntyneistä. Tulos on linjassa aikaisemman arvion kanssa, jonka perusteella sosiaalihuollon hoivalaitoksissa ja palvelutaloissa tapahtuneiden kuolemien osuus kaikista helleaallosta aiheutuneista kuolemista oli Suomessa vuosina 2000–2014 noin 4 % (Kollanus & Lanki 2021). Vaikutusten laskennassa helteestä oletettiin aiheutuvan palvelutalojen asukkaille yhtä suuri riski kuin yksityisasunnoissa asuville ikääntyneille, sillä kuolleisuusriskin on havaittu olevan sosiaalihuollon hoivalaitoksissa ja palvelutaloissa samaa suuruusluokkaa tai jopa hieman pienempi kuin kodeissa (Kollanus ym. 2021). Palvelutaloissa asuvat ikääntyneet ovat todennäköisesti keskimäärin heikkokuntoisempia ja siten haavoittuvampia kuumuuden vaikutuksille kuin kotona asuvat ikääntyneet, mutta toisaalta palvelutalojen ympärivuorokautinen hoiva suojaa kuumuuden haitoilta.

Terveyshaittojen taloudellisten kustannusten arvioinnissa tarkasteltiin kesän 2018 ennätysellisistä helteistä aiheutuneista sairaalahoitajaksista terveydenhuollolle koituneiden suorien kustannusten suuruusluokkaa. Lisäksi arvioitiin asuntoihin asennettavien ilmalämpöpumppujen avulla potentiaalisesti saavutettavissa olevia säästöjä sairaalahoidon kustannuksissa.

Arvioinnin perusteella helleaaltopäivistä aiheutui kesällä 2018 sairaalahoidon kustannuksia noin 2,85 miljoonaa euroa. Jos ilmalämpöpumppu asennettaisiin kaikkiin yli 65-vuotiaiden asuntoihin, joista se nykyisin puuttuu, sairaalahoitajaksista voitaisiin ehkäistä mahdollisesti jopa 95 %, jolloin sairaalahoidon kustannuksista koituva säästö olisi arviolta 2,70 miljoonaa euroa (taulukko 5.8). Sairalahoidosta aiheutuvat kustannukset eivät siis ole mitättömiä, mutta kuitenkin pieniä suhteutettuna ilmalämpöpumppujen asentamiseen ja käyttöön liittyviin kustannuksiin. On kuitenkin hyvä huomata, että sairaalahoitoon liittyvät suorat kustannukset aliarvioivat huomattavasti helteen terveys- ja viihtyisyshaittojen yhteiskunnallisia kokonaiskustannuksia, joita aiheutuu myös mm. kuolleisuudesta, lievistä sairastuvuusvaikutuksista ja oireilusta, tapaturmista, toimintakyvyn alenemisesta ja viihtyisyshaitoista. Nämä vaikutukset jätettiin arvioinnin ulkopuolelle, koska tieto altiste-vastesuhteesta puuttuu ja/tai kustannusten laskentaan liittyy huomattavaa epävarmuutta.

**Taulukko 5.8** Yli 65-vuotiaiden asuntoja koskeviin sopeutumistoimiin liittyvät investointi- ja käyttökustannukset asuntojen omistajille sekä helteestä aiheutuvien sairaalahoitajaksojen ehkäisystä syntyvät säästöt terveydenhuollolle kesän 2018 hellejakson aikana. Investointikustannukset osoittavat investoinnin kokonaisarvon sekä vuotuisen investoinnin arvon, jos investointi tehdään 15 vuoden aikana.

Sopeutumistoimenpide	Investointi- kustannukset (yhteensä / per vuosi, milj. €)	Energia- kustannukset (milj. € / vuosi)	Säästetyt sairaalahoidon kustannukset (milj. € / vuosi)
Ilmalämpöpumpun asentaminen kaikkiin asuntoihin	1 119 / 75	83	2,70
Ilmalämpöpumpun asentaminen pientaloihin	267 / 18	36	0,69
Ilmalämpöpumpun asentaminen kerrostaloasuntoihin	693 / 46	34	1,56
Ilmalämpöpumpun asentaminen rivitaloasuntoihin	159 / 11	13	0,45

## 6 Rakennusten ilmanvaihto- järjestelmien resilienssi hengitystieinfektioita vastaan

Tässä tutkimuksen osassa arvioidaan, miten paljon nykysäädöksiin mukaan suunniteltuja ilmanvaihtomääriä pitäisi suurentaa tartuntapohjaiseen mitoitukseen siirtyessä. Mitattiin ilmanvaihdon tehokkuutta ja osoitettiin vähennetyn henkilömäärän käyttämisen tarve yhdessä ilmanvaihtoteknisten keinojen kanssa.

Koronavirus (SARS-CoV-2) tarttuu pisaratartuntana ja ilmapälitteisesti hienojakoisen aerosolien välityksellä. Näitä molempia syntyy, kun sairastunut henkilö hengittää, puhuu, huutaa, yskii tai aivastaa. Pisaratartunta tapahtuu tartuttavan henkilön läheisyydessä, kun taas aerosolit jäävät leijumaan ilmaan ja kulkeutuvat tilassa ilman liikkeiden mukana pitkiäkin matkoja (Vuorinen ym. 2020). Rakennusten ilmanvaihdolla on suuri merkitys aerosolilevitteisten hengitystieinfektioiden hallinnassa. Lyhytaikaisten sairauspoissaolojen ja ulkoilmavirran välinen yhteys on tunnettu jo pitkään (Milton ym. 2000), mutta sitä ei ole käytetty ilmanvaihdon suunnittelussa. Eri virusten aiheuttamien akuuttien ylähengitystieinfektioiden (ns. flunssatartunnat) ja selvästi vakavamman koronaviruksen leviämisen osoittaminen ilmateitse aerosolien välityksellä (Morawska ym. 2020) on tuonut asian esille uudella tavalla, koska myös tulevaisuuden infektiouhat vaativat varautumista. Italialainen koulututkimus osoitti, että 10 l/s,hlö koneellisella ilmanvaihdolla varustetuissa koulurakennuksissa koronan tartuntariski oli 80% pienempi kuin painovoimaisen ilmanvaihdon kouluissa (Buonanno ym. 2022). WHO on laatinut ilmanvaihdon tiekartan (WHO 2021) siitä, kuinka rakennusten ilmanvaihtoa voidaan parantaa. Vastaavasti eurooppalaisten LVI-alan yhdistysten liitto REHVA (2020 ja 2022) on kehittänyt ohjeistusta ja työkaluja niin olemassa olevia rakennusten ilmanvaihdon parantamiseksi kuin uusien ilmanvaihtojärjestelmien suunnitteluun ja oikeaan käyttöön epidemian aikana.

Tutkitun tiedon lisääntyminen koronaviruksen leviämisestä on johtanut siihen, että on tuotu esiin tarve uusien ilmanvaihdon suunnitteluperusteet (Morawska ym. 2021). Nykyisin ilmanvaihdon mitoitus perustuu aistittuun ilman laatuun eli ihmisperäisten hajujen ja rakennusmateriaalien emissioiden poistamiseen. Tartuntapohjaisen ilmanvaihtokriteerin käyttöönotoksi on esitetty uusi menetelmä (Kurnitski ym. 2021), jolla voidaan laskea tilassa tarvittava ilmanvaihtomäärä oleskelun tartuttavuusluvun perusteella, kun oletetaan huoneilman olevan täydellisesti sekoittunut. Huonetilassa voi esiintyä varsin huomattavia vaihteluita paikallisissa aerosolipitoisuuksissa ja ilmanvaihdon tehokkuuden parantamiseksi sekä tartuntariskin alentamiseksi voidaan käyt-

tää erilaisia ilmanjakoratkaisuja (Su ym. 2021). Sitä varten uusissa suunnittelumene-  
telmissä tulisi ottaa käyttöön epäpuhtauksien poistotehokkuuden tarkastelu tartuntati-  
lannetta vastaavalla pistemäisellä epäpuhtauslähteellä, jotta ilmavaihtojärjestelmien  
resilienssia hengitystieinfektiota vastaan voidaan parantaa.

Tässä tutkimuksen osassa selvitettiin, miten paljon nykysäädöksen mukaan suunnit-  
teltuja ilmanvaihtomääriä pitäisi suurentaa tartuntapohjaisen mitoituksen siirtyessä.  
Suoritettiin ilmanvaihdon tehokkuuden mittaukset ja CFD-laskelmat tutkittavissa ti-  
loissa ja osoitettiin miten pistemäisellä lähteellä määritettyä epäpuhtauksien poistote-  
hokkuutta voidaan käyttää ilmanvaihdon suunnittelussa. Ilmanvaihdon ja ilmanjaon  
parantamisen lisäksi tutkittiin myös muita mahdollisuuksia tartuntariskin vähentä-  
miseksi kuten kasvomaskeiden ja henkilökohtaisten ilmanpuhdistimien vaikutuksia. Tutki-  
tuille tiloille tehtiin ilmanvaihtomitoitus nykyisten säädösten ja sisäilmaluokituksen oh-  
jearvojen mukaisesti sekä tartuntapohjaisella ilmanvaihdon mitoitusmenetelmällä.  
Osoitettiin vähennetyn henkilömäärän käyttämisen tarve yhdessä ilmanvaihtoteknis-  
ten keinojen kanssa.

## 6.1 Nykyisen säädöksen mukaisen ilmanvaihdon riittävyys tartuntariskin hallinnassa

Hengitystieinfektoriskin määrittämistä varten nykyisen säädöksen mukaisella ilmanvai-  
hdolla määriteltiin koulurakennuksen, avotoimiston ja liikuntahallin tyypilliset tilat, henki-  
lötiheys ja oleskelu tutkimuksen valittujen mallirakennusten ja mm. opetushallituksen  
ohjeiden perusteella. Valituille tiloille tehtiin ilmanvaihtomitoitus nykyisen ympäristömi-  
nisteriön säädöksen ja Sisäilmaluokituksen S2 ja S1 ohjearvojen mukaisesti. Näitä il-  
mavirtoja vertailtiin tartuntariskin ja R-luvun avulla laskettujen ilmavirtojen kanssa täy-  
dellisen sekoittuminen ja ilman kasvomaskeja ja ilmanpuhdistimia tilanteessa.

Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvai-  
hdesta YM 1009/2017 käytetään seuraavia ilmavirtoja:

- 6 l/(s hlö) ulkoilmavirta, joka vastaa ulkoilma + 800 ppm CO<sub>2</sub> pitoisuutta
- Käyttäjän ulkopuolella 0,15 (l/s)/m<sup>2</sup>
- Asetusta täydentävät ohjeet, josta löytyvät ohjearvot mm. liikuntatiloille

Sisäilmastoluokitus 2018 määrittää ulkoilmavirrat yhteneväisesti EN 16798-1:2019 standardin kanssa käyttäen vähäpäästöisiä M1 materiaaleja:

- S1-luokka: 0,5 l/s,lattia-m<sup>2</sup> + 10 l/s, henkilö (CO<sub>2</sub> yli taustan 350 ppm)
- S2-luokka: 0,35 l/s,lattia-m<sup>2</sup> + 7 l/s, henkilö (CO<sub>2</sub> yli taustan 550 ppm)
- S3-luokka/D2: 0,35 l/s,lattia-m<sup>2</sup> tai vähintään 6 l/s, henkilö

Tyypillisiin tiloihin muodostuvia ilmavirtoja on havainnollistettu taulukossa 6.1.

**Taulukko 6.1** Tyypillisten tilojen ilmanvirtoja

Tila	Lattia- ala	SIY 2018 S1		SIY 2018 S2		YM 1009/2017	FINVAC	STM 545/2015
		l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>	l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>	l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>	l/s,hlö
Toimitila, normaali tilatehokkuus	10-12	16	1,5	11	1,0	6	1,0	—
Toimitila, suuri tilatehokkuus	6-8	14	2,0	9	1,5	6	1,5	—
Neuvottelu- huone	3	12	4,0	8	3,5	6	3,0	—
Taukotila, kahvio	1,5	11	5,0	8	4,0	6	2,0	—
Hotellihuone		10		8		6		—
Käytävä ja porrashuone			1,0		0,5		0,5	—
Opetustila tai muu oleskelutila	2	11	5,5	8	4,0	6	3,0	4
Luentosali		10		8		6		4
Käytävä, aula			1,5		1,0		1,0	—
Päiväkodin ryhmätilat	3	12	4,0	8	3,0	6	3,0	4

Tutkimukseen valitut tilat on kuvattu taulukossa 6.2. Isossa opetustilassa, avotoimistossa, neuvotteluhuoneessa ja liikuntasalissa tarkastelu on tehty kahdella henkilömäärällä. Todellista ilmanjakoa kuvaavalle epäpuhtauksien poistotehokkuudelle on käytetty tavanomaisilla ratkaisuilla sekoittavalle ilmajaolle saavutettavissa olevia arvoja (REHVA 2023), jotka hieman poikkeavat luvussa 6.3 mitatuista arvoista. Vertailun vuoksi tarkastelu on tehty myös täydellisen sekoittumisen tilanteessa  $\varepsilon_b=1$ .

**Taulukko 6.2** Tutkimukseen valitut tilat

	Henkilömäärä	Vähennetty hlö-määrä	Pinta-ala m <sup>2</sup>	Korkeus m	$\varepsilon_b$
Opetustila	25		56,5	2,9	0,9
Opetustila, pieni	13		30,5	2,9	1
Opetustila, yhdistetty	50		129,5	2,9	0,75
Avotoimisto	31	24	257	3	0,6
Neuvotteluhuone	15	5	23,5	2,8	1
Liikuntasali	25	20	217,5	6	0,5
Kuntosali	12		173,5	3,5	0,6

Tutkittaville tiloille on laskettu YM asetuksen ja Sisäilmastoluokituksen mukaiset ilmavirrat taulukossa 6.3, jossa on vertailun vuoksi esitetty myös referenssikohteiden mitoitusilmavirrat. Näitä ilmamääriä voidaan verrata taulukossa 6.4 esitettyihin tartuntapohjaisiin ilmanvaihtomääriin, jotka ovat laskettu täydellisen sekoittumisen ( $\varepsilon_b=1$ ) ja todellisella, mitatulla epäpuhtauksien poistotehokkuudella. Avotoimistossa, neuvotteluhuoneessa ja liikuntasalissa ilmavirrat on laskettu myös vähennetyllä henkilömäärällä, jotta voitaisiin osoittaa henkilömäärän muutoksen vaikutusta.

Tuloksista nähdään, että opetustilojen tartuntapohjaiset ilmamäärät ovat kahden normaalikokoisen opetustilan tapauksessa lähellä nykyisiä mitoituksia, mitkä ovat olennaisesti suurempia kuin YM asetuksen ilmavirrat. Yhdistetyssä, 130 m<sup>2</sup> opetustilassa ja avotoimistossa sama tilanne saavutetaan vähennetyllä henkilömäärällä (40 vs. 50 hlö opetustilassa ja 31 vs. 24 hlö avotoimistossa). Neuvotteluhuoneessa ja liikuntasalissa tartuntapohjaiset ilmamäärät ovat varsin isoja. Neuvotteluhuoneessa henkilömäärää pitää vähentää kolmasosaan, jotta nykymitoituksen mukainen ilmanvaihto riittäisi epidemiatilanteessa. Tämä on enemmän, kun lähikontaktin (1,5 m) välttämisen



edellyttämä vähennys puoleen. Näin myös taulukossa esitetty 23,2 l/s m<sup>2</sup> ei ole käytännössä relevantti koska täyttä henkilömäärää ei voida lähikontaktin takia käyttää. Yleisesti, opetustiloissa tartuntapohjaiset ilmamäärät ovat pienempiä kuin S1 luokan ja muissa tiloissa on vähennettävä henkilömäärää, jotta S1 luokan ilmavirrat riittäisivät epidemiatilanteessa.

**Taulukko 6.3** YM asetuksen, Sisäilmastoluokituksen mukaiset ja referenssi-kohteisiin suunnitellut ilmavirrat.

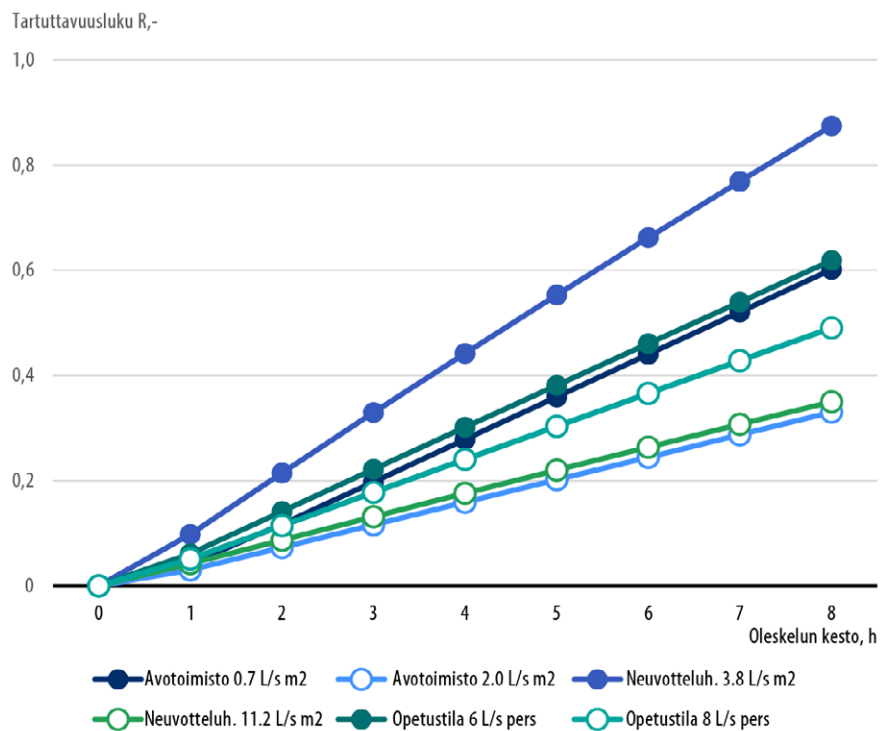
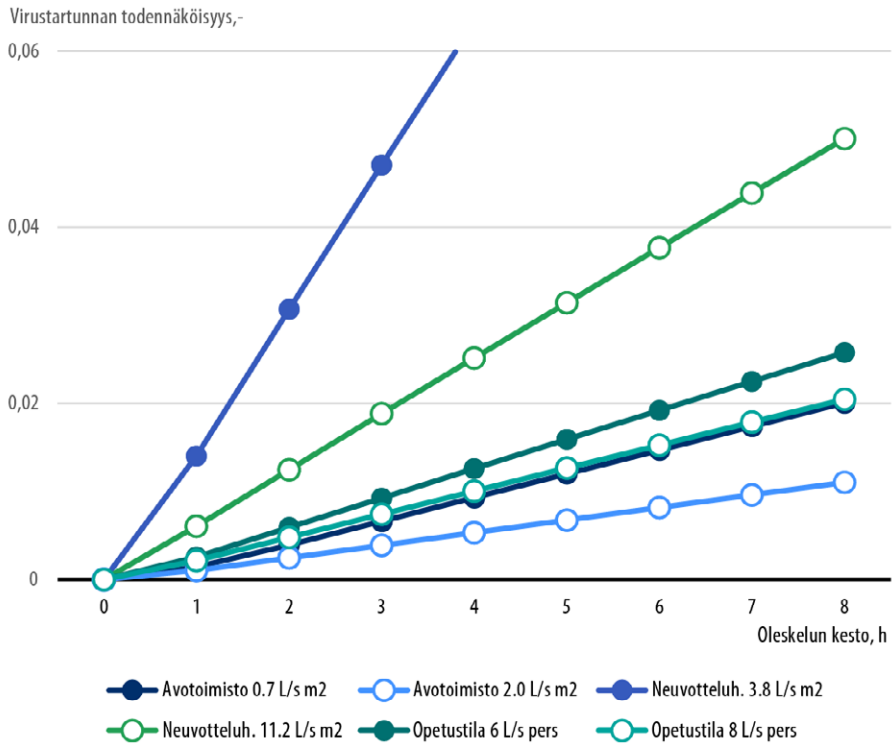
	YM 1009/2017		SIY 2018 S1		SIY 2018 S2		Referenssi-kohte	
	l/s,hlö	l/s,m <sub>2</sub>	l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>	l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>	l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>
Opetustila	6,0	2,6	11,1	4,9	7,8	3,4	9,2	4,0
Opetustila, pieni	6,0	2,6	11,2	4,8	7,8	3,3	9,2	3,9
Opetustila, yhdistetty	6,0	2,3	11,3	4,4	7,9	3,1	10,3	4,0
Avotoimisto	6,0	0,7	14,1	1,7	9,9	1,2	19,4	2,3
Neuvottelu-huone	6,0	3,8	10,8	6,9	7,5	4,8	10,0	6,4
Liikuntasali	15 –30			5,5		4,0		9,9
Kuntosali	15–25	6,0		6,0		6,0		6,1

**Taulukko 6.4** Tartuntapohjainen ilmanvaihtomäärä täydellisen sekoittumisen ja mitatulla epäpuhtauksien poistotehokkuudella ja vähennetyllä henkilömäärällä.

	R<1, $\varepsilon_b=1$		$\varepsilon_b$	R<1		R<1, vähennetty henkilömäärä	
	l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>		-	l/s,hlö	l/s,m <sup>2</sup>	l/s,hlö
Opetustila	8,0	3,5	0,9	8,9	3,9		
Opetustila, pieni	7,6	3,2	1	7,6	3,2		
Opetustila, yhdistetty	8,0	3,1	0,75	10,6	4,1		
Avotoimisto	16,2	2,0	0,6	27,1	3,3	23,8	2,2
Neuvottelu-huone	36,3	23,2	1,0	36,3	23,2	28,8	6,1
Liikuntasali	54,6	6,3	0,5	109,1	12,5	101,4	9,3
Kuntosali	51,9	3,6	0,6	86,5	6,0		

Ilmavirtojen vaikutusta on havainnollistettu kuvassa 6.1, jossa on esitetty tartunnan todennäköisyys ja tartuttavuusluku YM asetuksen mukaisella ja tartuntapohjaisesti määritetyllä ilmanvaihdolla olettamalla täydellisen sekoittumisen epäpuhtauksien poistotehokkuus  $\varepsilon_b=1$ . Neuvotteluhuoneessa on käytetty täyden 15 hlö:n sijasta vähennettyä henkilömäärä 8 hlö lähikontaktin estämiseksi. Erot ovat merkittäviä kaikissa tiloissa, mutta suurimmillaan neuvotteluhuoneessa ja avotoimistossa.

**Kuva 6.1** Tartunnan todennäköisyys ja tartuttavuusluku YM asetuksen ja tartuntapohjaisella ilmanvaihdoilla.



Tartuntapohjaisen ilmanvaihdon ilmavirtoja tarvitaan ainoastaan epidemian tilanteessa. Muuten ilmanvaihtojärjestelmää voidaan ohjata tarpeenmukaisesti, yleensä CO<sub>2</sub> tai läsnäolon ja lämpötilan mukaan. REHVA (2022) ohjeistuksessa suositellaan tarpeenmukaisen ilmanvaihtojärjestelmän asetusarvoksi epidemiatilanteessa 550 ppm eikä ilmanvaihtojärjestelmään tavanomaisiin käyntiaikoihin tarvitse tehdä muutoksia. Asetusarvon muutos pitää tehdä manuaalisesti, koska viruksia havaitsevia antureita ei ole olemassa. 550 ppm asetusarvolla ilmanvaihtojärjestelmä toimi tavanomaisen oleskelun tapauksessa täydellä teholla. Muulloin kuin epidemian aikana suositellaan CO<sub>2</sub> asetusarvoksi 800 ppm opetustiloissa ja neuvotteluhuoneissa ja 650 ppm toimistoissa, ravintoloissa ja liikuntatiloissa.

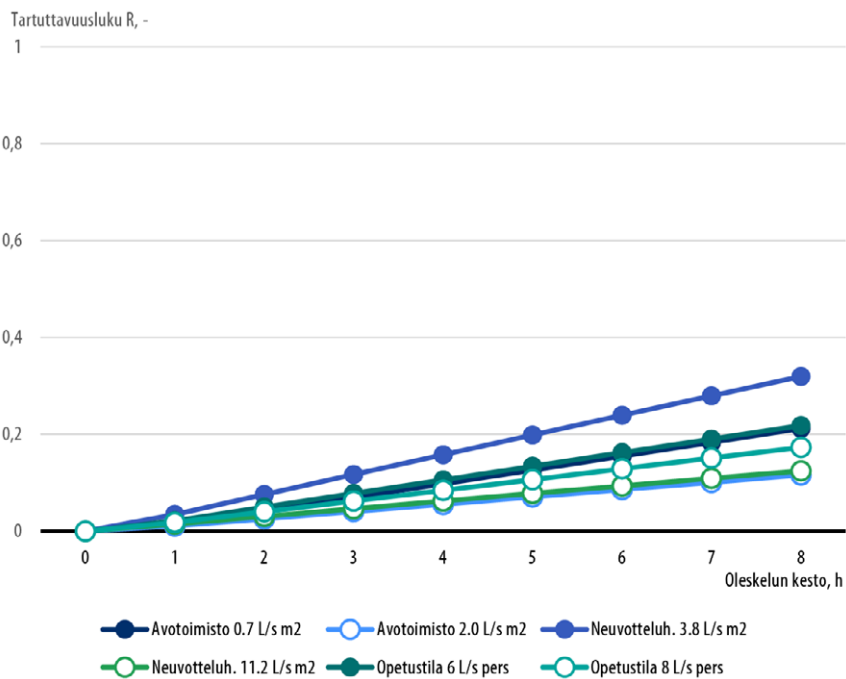
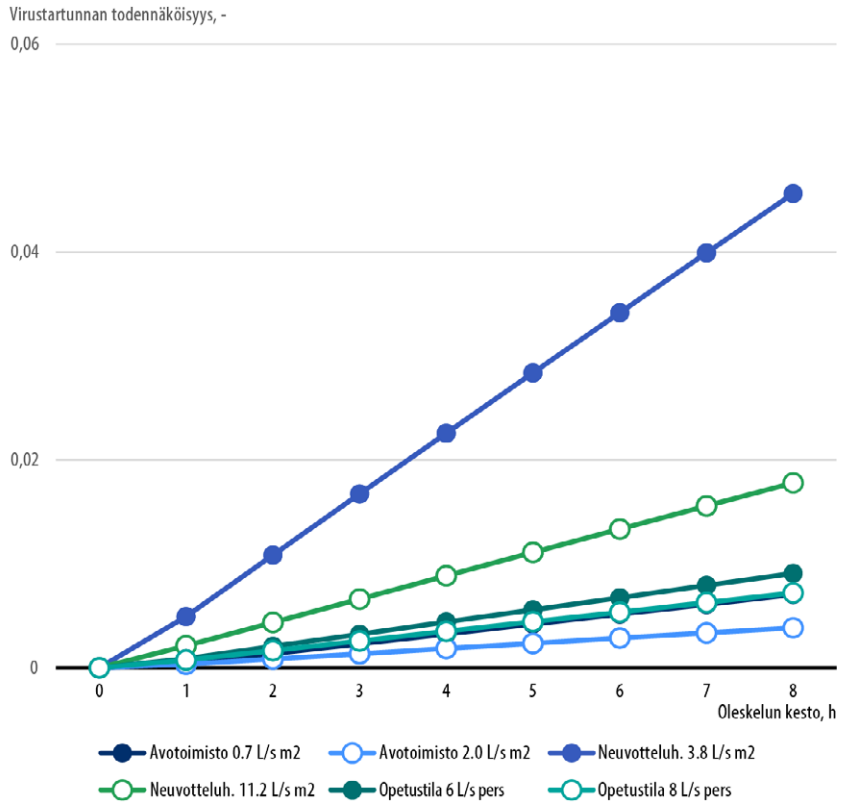
## 6.2 Huonekohtaisten ilmanpuhdistimien ja kasvomaskien vaikutus

Virusten poistamiseksi huonekohtaisilla ilmanpuhdistimilla voidaan korvata osa ilmanvaihdosta tai tehostaa ilmanvaihtoa tarvittaessa. Taulukosta 2.7 ja yhtälöstä (2.4) nähdään, että 100 %:n poistotehokkuuden tapauksessa ilmanpuhdistimen ilmavirta voidaan suoraan vähentää ilmanvaihdon tuloilmavirrasta. Vastaavasti, epidemiatilanteessa voidaan ilmanpuhdistimen avulla tuottaa tarvittava suurempi ilmavirta. Esim. HEPA suodattimella varustettujen ilmanpuhdistimien poistotehokkuus on käytännössä 100 %. Virusten poistoon kuitenkin riittävät heikomman erotusasteen suodattimet, esim. ePM1 suodattimet. Virusten suodatuksella tarkoitetaan kiinteiden pienhiukkasten suodatusta, koska ihmisen uloshengittämät pisarat haihtuvat ja kutistuvat hetkellisesti ja kulkeutuvat sen jälkeen ilmassa kuten kiinteät pienhiukkaset, joiden suodatus muistuttaa ulkoilman suodatusta. Pisaroiden kokoalue alkaa 0,2 µm ja jatkuu yli 100 µm, mutta suodatuksen kannalta tärkeä on pienimmän kokoalueen, noin 0,5–5 µm tehokas sieppaus.

Tutkittua tietoa ilmanpuhdistimien käyttämisestä löytyy mm. opetustiloista (CDC 2021, Curtius ym 2021). Suositellaan vähintään kahta, keskeisesti (ei siis opetustilan nurkkiin) sijoitettua ilmanpuhdistinta, joiden yhteenlaskettu ilmavirta vastaa noin 5 l/h tilan ilmanvaihtokerrointa. Näin tarvitaan yksi ilmanpuhdistin per noin 30 m<sup>2</sup> lattia-alaa. Yleisesti ilmanpuhdistimen suodatuksen erotusasteella laskettu puhdas ilmavirta pitää olla vähintään kaksi kertaa suurempi kuin tilan perusilmanvaihto (REHVA 2021). Käytännön ongelmana on kuitenkin ilmanpuhdistimien sijoittaminen keskelle huonetilaa, lisäksi laitteiden aiheuttama melu on otettava huomioon. Monessa tapauksessa on hankittu pieniä ilmanpuhdistimia, mitkä ovat lopulta sijoitettu seinien viereen, jolloin lopputulos on tehotonta niin alimittaisten ilmavirtojen kuin väärän sijainnin takia.

Kasvomasteilla on tartuntariskiä ja vastaavasti tarvittavaa ilmamäärä alentava vaikutus, mikä nähdään yhtälöstä (2.4). Kasvomaskien vaikutus voidaan laskea varovaisesti arvioituilla kasvomaskien erotusasteilla (Ueki 2020), altistuvalla henkilölle 0,3 ja tautia levittävälle henkilölle 0,5 (erot arvoissa johtuvat uloshengitettävien pisaroiden haihtumisesta ja kutistumisesta). Kasvomaskien vaikutusta on havainnollistettu laske-  
malla niillä kuvassa 6.1 esitetyt tapaukset, kuva 6.2. Nähdään, että kasvomaskien tapauksessa YM asetuksen ilmavirrat ovat hyvin riittäviä. Pitkäaikaiseen oleskeluun kasvomasteja ei voida kuitenkaan suositella, koska maskin sisään muodostuu korkea, noin 2 200 ppm hiilidioksidipitoisuus (Geiss 2020).

**Kuva 6.2** Tartunnan todennäköisyys ja tartuttavuusluku kasvomaskeilla, YM asetuksen ja tartuntapohjaisella ilmanvaihdoilla.

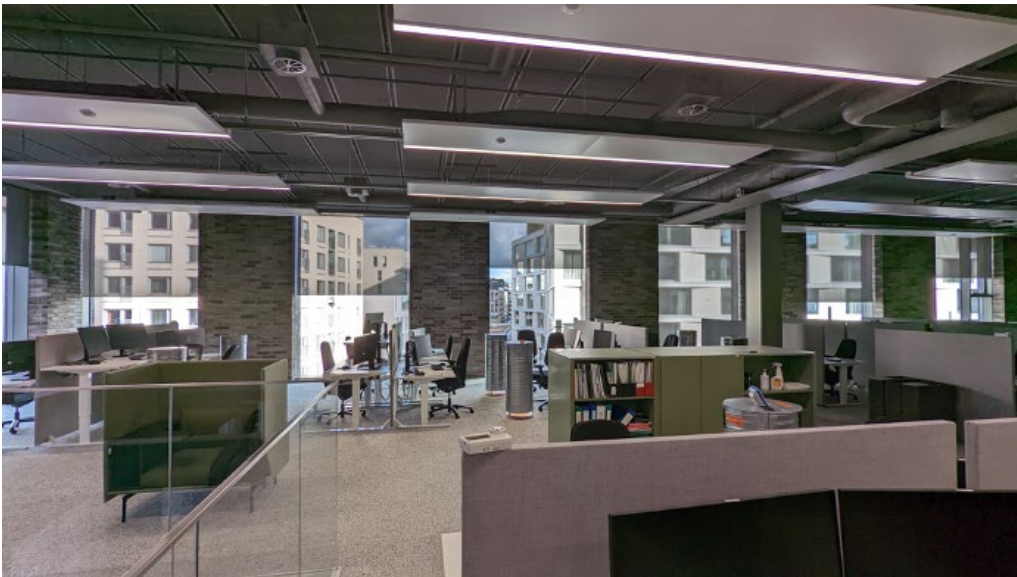


## 6.3 Ilmanvaihdon tehokkuuden mittaukset

Tutkimukseen valituissa tiloissa (Taulukko 6.2) toteutettiin epäpuhtauksin poistotehokkuuden mittaukset merkkiainemenetelmällä. Pistemäisen lähteen epäpuhtauksin poistotehokkuuden  $\varepsilon_b$  kuvaa ilmanvaihdon tehokkuutta virustartunnan leviämistä vastavassa tilanteessa, jossa tilassa on yksi (tai muutama) tartuttaja. Se poikkeaa tavanomaisesta epäpuhtauksien poistotehokkuudesta  $\varepsilon_v$ , joka määritetään tasaisesti jakautuneella lähteellä poistoilman ja hengitysvyöhykkeen pitoisuuden suhteena. Suurissa tiloissa, jossa epäpuhtauslähteinä toimivat kaikki henkilöt, saavutetaan yleisesti käytetyllä seikoittavalla ilmanjaolla likimain  $\varepsilon_v=1$ . Pistemäisen lähteen tapauksessa tilanne on erilainen, koska korkean pitoisuuden vyöhyke muodostuu yleensä lähteen läheisyyden ja kauempana pitoisuus laskee. Sen takia suurissa tiloissa yleensä  $\varepsilon_b < 1$ , ja se on mitattava REHVA:n ohjeistuksen mukaisesti vähintään kahdella epäpuhtauslähteen sijainnilla (REHVA 2023).

Esimerkkejä mitatuista tiloista on esitetty kuvassa 6.3. Epäpuhtauslähteelle käytettiin mittauksessa epäedullista (oleskeluvyöhykkeen reunalla kaukana poistopisteistä) ja edullista sijaintia (poistopisteen alapuolella). Merkkiainemittaus suoritettiin vakiopäästömenetelmällä, jossa hengitysvyöhykkeeltä eri kohdissa huonetilaa mitataan tasan-tuneen tilanteen pitoisuudet, joita verrattiin poistoilmakanavasta mitattuun pitoisuuteen.

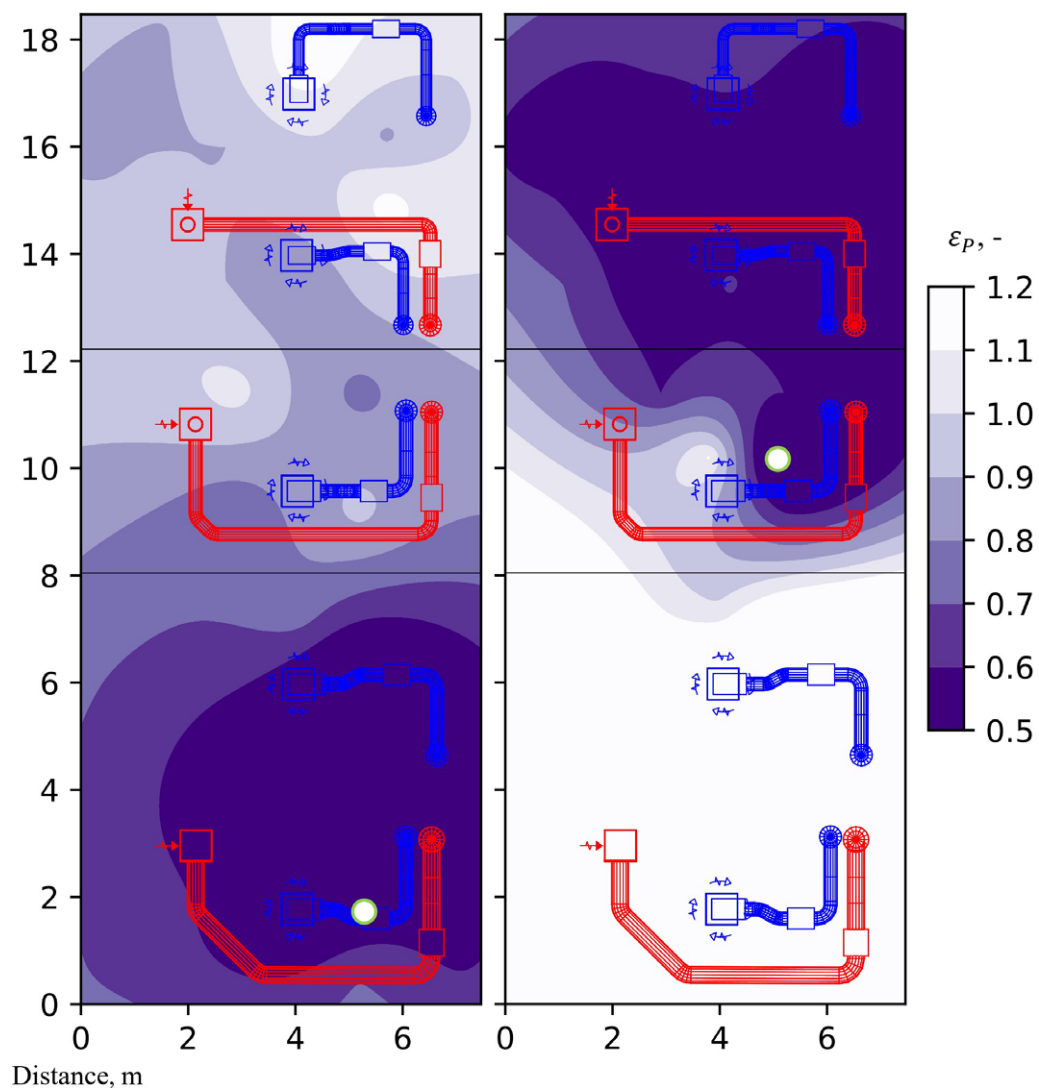
**Kuva 6.3** Ilmanvaihdon tehokkuuden mittaus merkkiainemenetelmällä opetustilassa ja avotoimistossa. Kuvista näkyy loggereita, jotka osoittavat mittauspisteet, ja henkilöitä kuvaavia ilmanvaihtokanavasta valmistettuja lämmitettyjä nukkeja.



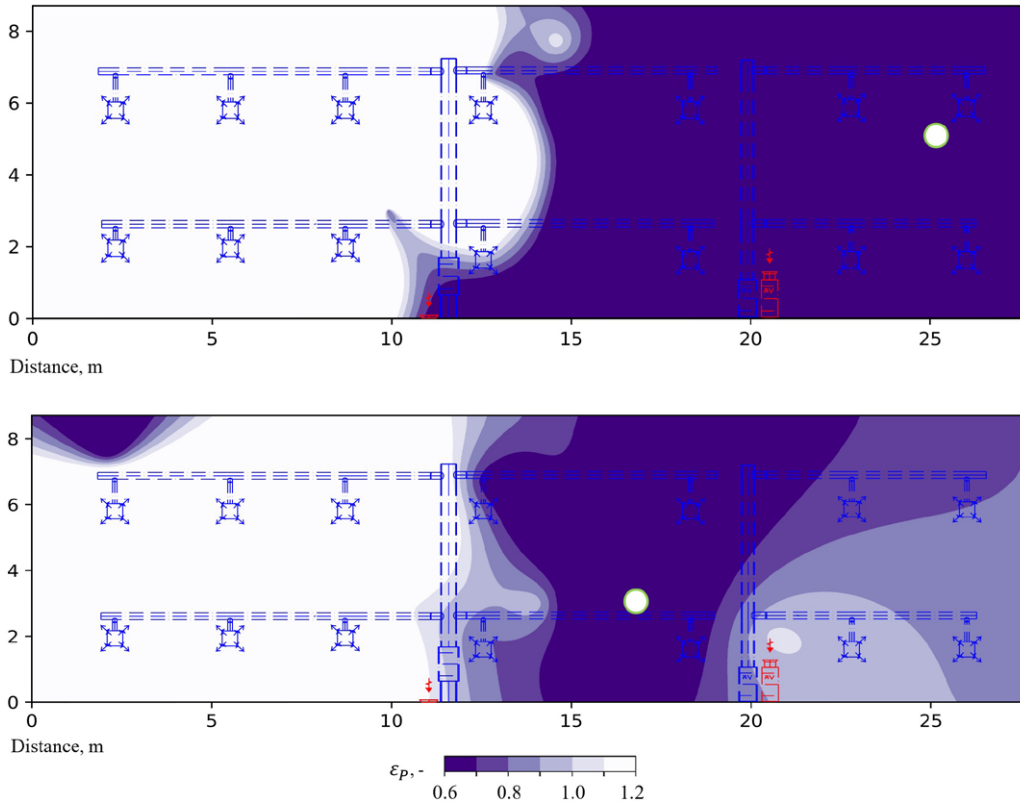


Yhdistetyn opetustilan kahden mittauksen tulokset on esitetty esimerkinomaisesti kuvassa 6.4. Tässä suuressa 130 m<sup>2</sup> tilassa merkkiaine ei ole täysin sekoittunut ja tilaan muodostuvat erilaisten pitoisuuksien vyöhykkeet. Ilmiö on vielä voimakkaampi 257 m<sup>2</sup> avotoimistossa, joka oli suurin mitattu tila, kuva 6.5.

**Kuva 6.4** Paikalliset epäpuhtauspoistotehokkuuden arvot yhdistetyssä opetustilassa. Epäpuhtauslähteen sijainti (vihreä ympyrä) alhaalla oikealla ja keskellä opetustilaa. Vasemman kuvan mittauksen  $\varepsilon_b=0.76$  ja oikean  $\varepsilon_b=0.77$ , keskiarvo  $\varepsilon_b=0.76$ .

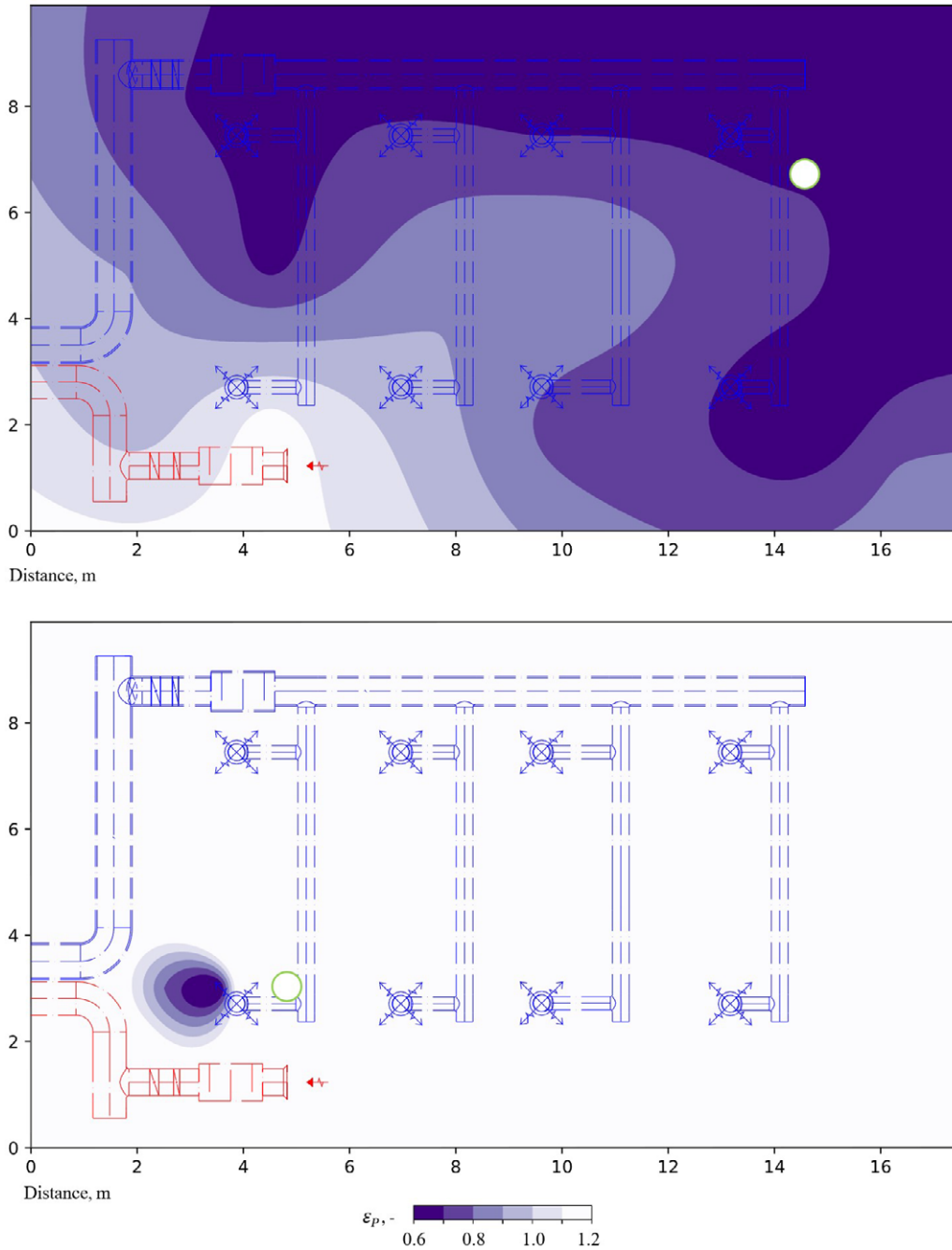


**Kuva 6.5** Avotoimiston paikallisen epäpuhtauspoistotehokkuuden jakauma. Epäpuhtauslähteen sijainti (vihreä ympyrä) oikealla päädyssä ja keskellä tilaa. Ylemmän kuvan mittauksen  $\varepsilon_b=0.34$  ja alemman  $\varepsilon_b=0.64$ , keskiarvo  $\varepsilon_b=0.49$ .



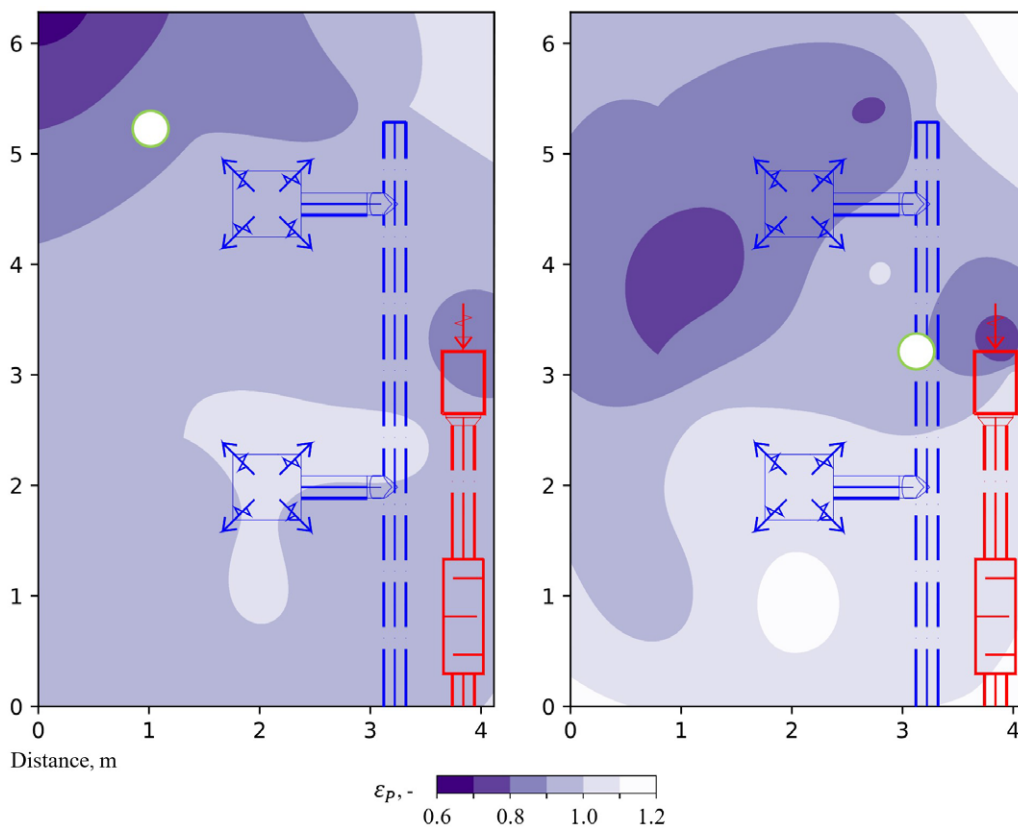
Mitatussa kuntosalissa oli tehokas ja muista suurista tiloista poiketen myös tehokkaasti sekoittava ilmanjako, jolloin pitoisuuserot tilan eri paikoissa olivat pieniä, kuva 6.6. Kuntosalin toinen mittaus suoritettiin poistopisteen alapuolelle sijoitetulla epäpuhtauslähteellä, joka toimi tehokkaana paikallispoistona ja muualla tilassa pitoisuudet olivat hyvin alhaisia. Tämä tilanne antaa paremman kuvan kuin muut epäpuhtauslähteen sijainnit, joten ko. tulos ei ole edustava.

**Kuva 6.6** Kuntosalin paikallisen epäpuhtauksien poistotehokkuuden jakauma. Epäpuhtauslähteen sijainti (vihreä ympyrä) on valittu alemmassa kuvassa tarkoituksellisesti ohjeiden vastaisesti poistopisteen alapuolelle. Ylemmän kuvan mittauksen  $\varepsilon_b=0.53$  ja alemman  $\varepsilon_b=1.53$ , keskiarvo  $\varepsilon_b=1.03$ .



Pienemissä tiloissa merkkiaineen sekoittuminen voi olla lähellä täydellistä sekoittumista myös pistemäisen lähteen tapauksessa. Esimerkkinä siitä on 23,5 m<sup>2</sup> neuvotteluhuone, jossa pitoisuuserot ovat pieniä, kuva 6.7 Yhteenvedo mittaustuloksista on esitetty taulukossa 6.5.

**Kuva 6.7** Neuvotteluhuoneen paikallisen epäpuhtauslähteen poistotehokkuuden jakauma. Epäpuhtauslähteen sijainnilla ei ole tässä pienemmässä tilassa suurempaa vaikutusta. Vasemman kuvan mittauksen  $\varepsilon_b=0.90$  ja oikean  $\varepsilon_b=0.95$ , keskiarvo  $\varepsilon_b=0.93$ .



**Taulukko 6.5** Yhteenveto ilmanvaihdon tehokkuuden mittaustuloksista.

	Epäpuhtauksien poistotehokkuus $\varepsilon_b$ (-) mittaus1 / mittaus2	Epäpuhtauksien poistotehokkuus, $\varepsilon_b$ (-) keskiarvo
Opetustila	0.73 / 0.84	0.79
Opetustila, pieni	0.99 / 1.88	1.43
Opetustila, yhdistetty	0.77 / 0.76	0.76
Liikuntasali	0.52 / 0.35	0.44
Avotoimisto	0.34 / 0.64	0.49
Neuvotteluhuone	0.90 / 0.95	0.93
Kuntosali	0.53 / 1.53	1.03

Tulosten mukaan normaalikokoisen opetustilan ilmanvaihdon tehokkuus on jäänyt melko kauas täydellisestä sekoittumisesta osoittaen käytetyn sekoittavan ilmanjaon heikohkoa tehokkuutta pistemäisen lähteen tapauksessa. Pienessä opetustilassa sama ilmanjakoratkaisu on sitä vasten toiminut syrjäyttävän ilmanjaon tavalla. Mahdollisesti ilmasuihkut ovat kulkeutuneet seinäpintoja pitkin lattialle, jolloin hengitysvyöhykkeelle on muodostunut alhaisempi pitoisuus kuin huoneen yläosaan. Yhdistetyn opetustilan suuresta koosta johtuen (130 m<sup>2</sup>) alhainen  $\varepsilon_b$  arvo on odotusten mukainen. Liikuntasalin mittaustulokset osoittavat mahdollista oikosulkuvirtausta koska salin alaosaan muodostunut korkea pitoisuus viittaa siihen, ettei korkeasta katosta tulevat ilmasuihkut välttämättä ylety riittävästi hengitysvyöhykkeelle.

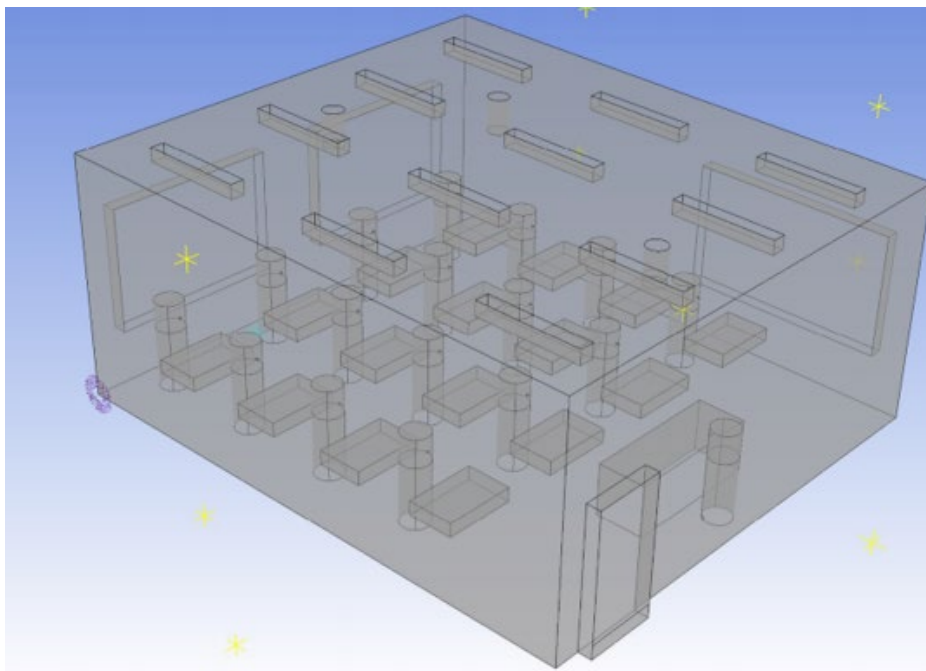
## 6.4 CFD- simuloinnit henkilöetäisyyden, tilan koon, ilmanvaihdon sekä henkilöiden aktiviteettitason merkityksestä hengitysinfektioriskiä

CFD-simuloinnilla mallinnettiin opetustilaa, yhdistettyä opetustilaa, avotoimistoa sekä kuntosalia, jotka kaikki olivat samoja kuin mittauksissa käytetyt. Mallinnusten avulla tutkittiin, mitä tiloissa tapahtuu tiettyjen muutosten vaikutuksesta. Opetustilojen kohdalla tarkasteltiin henkilöiden välisen etäisyyden sekä tilan koon vaikutusta tartuntariskiin. Avotoimiston tapauksessa selvitettiin, mikä vaikutus tilaan sijoitetuilla huoneilmanpuhdistimilla on. Kuntosalimallinnuksessa puolestaan tutkittiin, miten tartuntariski kehittyy, kun tilassa olevien henkilöiden aktiviteettitaso muuttuu paikallaan olevasta raskasta liikuntasuoritetta tekeväksi.

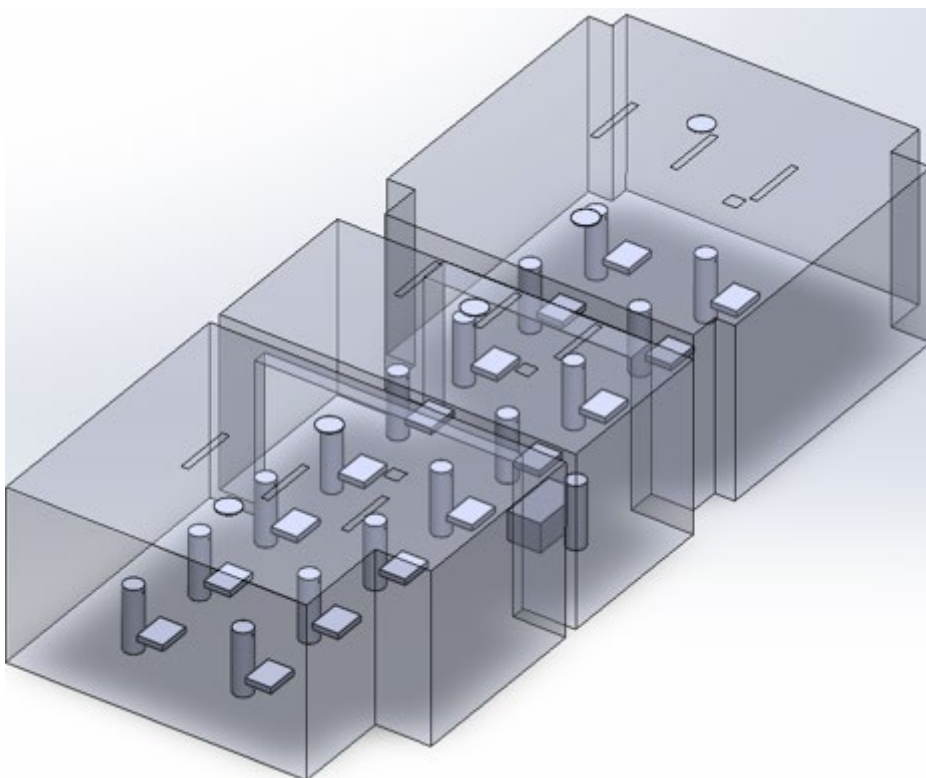
### 6.4.1 Opetustilat

Tarkastelun kohteina oli kaksi erilaista opetustilaa, joista pienempi oli 56,5 m<sup>2</sup>:n yksittäinen luokkatilamoduli ja suurempi kolmesta moduleista (56,5, 42,5 ja 30,5 m<sup>2</sup>) muodostettu yhdistetty 129,5 m<sup>2</sup>:n tila. Isommissa moduleissa oli kaksi tuloilmalaitetta ja yksi poistopiste, pienimmässä 1+1. Tilojen CFD-mallien havainnekuvat on esitetty kuvissa 6.8 ja 6.9. Kummassakin tilassa oli mallinnustapauksissa 17 henkilöä (16 oppilasta + opettaja) ja myös käytetty tuloilmavirta (4 l/s/m<sup>2</sup>) oli sama. Yhdistetyn tilan tapauksessa käytettiin tuloilmavirran, tuloilman lämpötilan (19°C) ja tilan keskimääräisen sisälämpötilan (21°C) osalta reunaehtoina kenttämittauksia. Pieni opetustila mallinnettiin ennen mittauksia ja siinä tuloilman lämpötila oli asteen matalampi. Tästä huolimatta pienen tilan keskimääräinen sisälämpötila (23,5°C) oli korkeampi johtuen suuremmasta henkilötiheydestä. Taulukko 6.6 on esitetty esimerkinomaisena CFD-mallia varten määritetty lämpötase pienen opetustilan tapauksessa.

**Kuva 6.8** Pienen luokkatilan CFD-malli



**Kuva 6.9** Yhdistetyn luokkatilan CFD-malli.

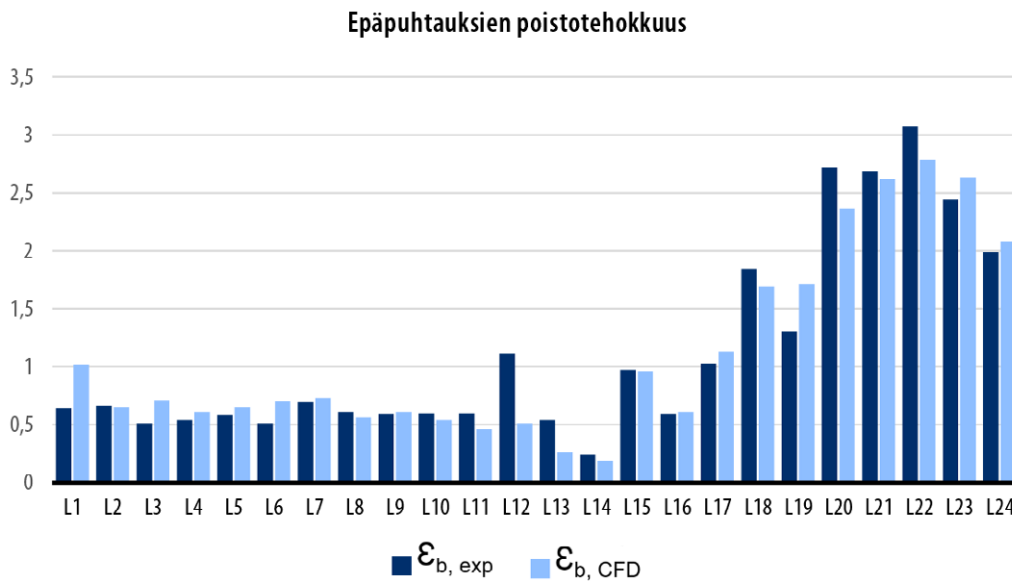


**Taulukko 6.6** Lämpökuormat ja ilmanvaihtoon liittyvät suureet sekä lämpötase pienen luokkahuoneen CFD-mallinnuksissa.

Lämmönlähde	Lämpökuorma (W)	Lämpökuorma (W/m <sup>2</sup> )	Ilmanvaihto		
Ihmiset (60 W x 17)	1020	18,2	Tuloilmavirta	230 l/s	4,1 l/s/m <sup>2</sup>
Valaisimet (30 W x 12)	360	6,4	T_tuloilma	18°C	
			T_huone	23°C	
Lämpöteho yht.	1380	24,7	Jäähdytys yht.	-1380 W	-24,7 W/m <sup>2</sup>

Yhdistetyn opetustilan mallin validointiin käytettiin pistemäisen lähteen epäpuhtauksien poistotehokkuuden  $\varepsilon_b$  mittaustuloksia yhdistetystä luokkatilasta. Kuvassa 6.10 on esitetty mitatut (tummansininen) ja CFD-mallin antamat (vaaleansininen) poistotehokkuudet eri puolilla luokkatilaa. Kuten kuvasta nähdään, lasketut poistotehokkuudet ovat hyvin linjassa mitattujen kanssa.

**Kuva 6.10** Mallinnettu ja mitattu pistemäisen lähteen epäpuhtauksien poistotehokkuus eri puolilla yhdistettyä opetustilaa.

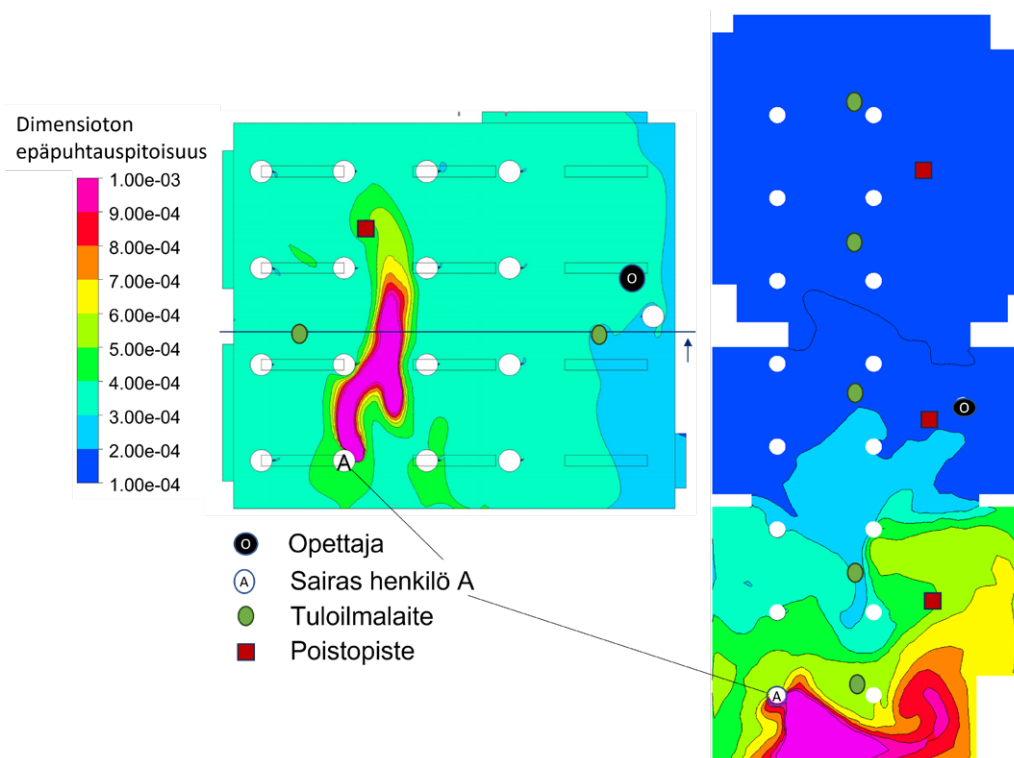




Validoidulla CFD-mallilla tarkasteltiin epäpuhtauksien poistotehokkuuksia ja paikallisia epäpuhtauspitoisuuksia yhdistetyssä opetustilassa sekä yhdessä tilan kolmesta opetusmodulista 1,1 metrin (istuvan henkilön hengitysvyöhyke) korkeudelta. Yhdistetyssä tilassa poistotehokkuus laskettiin sekä verraten paikallista pitoisuutta kaikkien tilan kolmen poiston keskiarvoon, että pelkästään siihen poistoon, joka oli samassa modulissa kuin sairas henkilö. Mallinuksissa oli tilan koosta riippumatta aina 16 oppilasta + opettaja ja tuloilmavirta lattianeliötä kohti pidettiin myös samana, joten sisäilman lämpötila oli pienessä tilassa (23°C) jonkin verran korkeampi kuin yhdistetyssä. Vertailutapauksia laskettiin kolmelle eri sairaan henkilön sijainnille A-C. Pienessä opetustilassa sairas oli kussakin tapauksessa eri puolilla tilaa, kun taas yhdistetyssä kussakin eri modulissa.

Kuva 6.11 näyttää dimensiottoman epäpuhtauspitoisuuden (normeerattu siten, että pitoisuus on sairaan hengityksessä tasan yksi) sairaan ollessa paikalla A. Pienessä luokkatilassa epäpuhtauspilvi lähtee suoraviivaisesti sairaan luota kohti poistoa, kun taas isossa tilassa se kiinnittyy seinään ja lähtee sitä seuraten kiertämään huoneessa.

**Kuva 6.11** Dimensioton epäpuhtauspitoisuus pienessä ja yhdistetyssä luokkatilassa sairaan henkilön ollessa paikalla A.

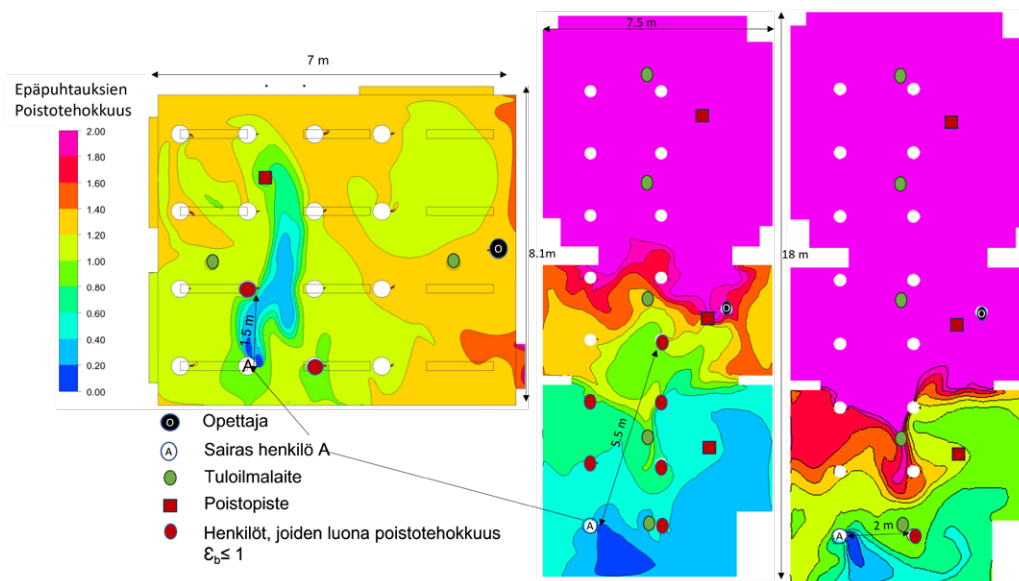


Dimensioton epäpuhtauspitoisuus sairaan ollessa paikalla B on esitetty Liitteen 1 kuvassa 1. Tällöin sekä pienen että ison luokkatilan tapauksessa korkeiden pitoisuuksien alue (oranssi/punainen) on rajattu, mutta toisaalta jonkin verran kohonneita pitoisuuksia (puhtaan vihreät sävyt) esiintyy laajemmalla alueella verrattuna tilanteeseen, jossa sairas on paikalla A.

Liitteen 1 kuvassa 2 nähdään dimensioton epäpuhtauspitoisuus sairaan ollessa paikalla C. Vaikka korkeiden pitoisuuksien alue onkin pienessä tilassa hyvin pieni, pitoisuudet ovat lähes koko tilassa koholla, kuten vihreä väri osoittaa. Isossa tilassa korkean pitoisuuden pilvi puolestaan liikkuu kohti opettajaa ja pitoisuudet ovat merkittävästi koholla ainoastaan hänen ja sairaan oppilaan välissä.

Kuvassa 6.12 on esitetty epäpuhtauksien poistotehokkuudet pienessä ja yhdistetyssä opetustilassa sairaan ollessa paikalla A. Kuvasta nähdään, että pienessä luokkatilassa taudinaiheuttajat kulkeutuvat melko hyvin kohti poistoa ja saastuneen ilman alue ( $\varepsilon_b < 1$ ) jää pieneksi. Ainoastaan kaksi sairaan vieressä olevaa henkilöä ovat tällä alueella. Yhdistetyssä tilassa vastaava alue on suurempi ja kuusi henkilöä jää sen sisään, mikäli poistotehokkuus lasketaan käyttäen kaikkien poistojen keskiarvoa. Verrattaessa ainoastaan sairaan henkilön sijaintimodulin poistoon tilanne muuttuu merkittävästi, ja sairaan lisäksi vain yhden henkilön luona paikallinen poistotehokkuus on alle yksi.

**Kuva 6.12** Paikallisen pistelähteen aiheuttamien epäpuhtauksien poistotehokkuus pienessä ja yhdistetyssä luokkatilassa sairaan henkilön ollessa paikalla A. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



Liitteen 1 kuvasta 3 nähdään epäpuhtauksien poistotehokkuudet sairaan ollessa paikalla B. Tällöin erittäin alhaisen poistotehokkuuden alue (sininen väri) on pienessä opetustilassa pienempi kuin sairaan ollessa paikalla A, mutta alle yhden alue ulottuu laajemmalle ja sairaan lisäksi kuusi henkilöä jää sen sisään. Yhdistetyssä tilassa tilanne on myös hieman heikompi kuin sairaan A tapaus. Laskettaessa poistotehokkuus kaikkien poistojen keskiarvosta alle yhden jääetään sairaan lisäksi seitsemän oppilaan + opettajan kohdalla, ja käyttäen sairaan henkilön sijainnin poistoa kahden oppilaan kohdalla.

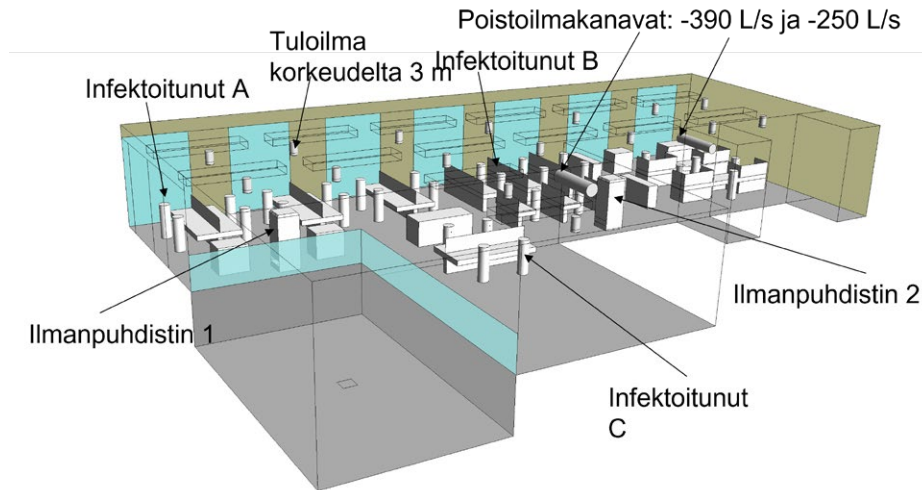
Liitteen 1 kuvassa 4 on esitetty epäpuhtauksien poistotehokkuudet sairaan ollessa paikalla C. Tämä tapaus poikkeaa kahdesta muusta, sillä nyt tilanne pienessä opetustilassa on huonompi kuin yhdistetyssä myös silloin, kun laskennassa käytetään yhdistetyn tilan osalta kaikkien poistojen keskiarvoa. Pienessä tilassa vihreä ( $\epsilon_b < 1$ ) alue käsittää valtaosan koko tilasta ja sen sisään jää sairaan lisäksi 8 oppilasta + opettaja. Yhdistetyssä tilassa käytettäessä laskennassa kaikkia poistoja 5 oppilasta + opettaja jäivät tämän alueen sisään, ja sairaan sijainnin poistoa ainoastaan opettaja.

Mallinnukset osoittavat, että useammasta modulista koostuvassa yhdistetyssä opetustilassa sairaan henkilön levittämät taudinaiheuttajat jäävät pääosin siihen moduliin, jossa tämä on, ja viereisissä moduleissa pitoisuudet ovat ainoastaan hieman koholla. Pienessä opetustilassa ja yksittäisen modulin sisällä taudinaiheuttajien leviämistä on vaikea ennustaa, sillä se määräytyy paikallisten ilmavirtojen mukaan. Kuten tuloksista nähdään, sairaan henkilön sijainnilla on varsin suuri merkitys siihen, miten moni muu tilassa taudinaiheuttajille altistuu.

## 6.4.2 Avotoimisto

Tutkimuksessa käytetty avotoimisto oli pinta-alaltaan n. 320 m<sup>2</sup> ja siellä oli mallinnuksissa täysi henkilömäärä, 31 ihmistä. Avotoimiston CFD-malli on esitetty kuvassa 6.13. Toimistotilan ilmanvaihto oli 2 l/s/m<sup>2</sup>, eli yhteensä 640 l/s. Tuloilma tuotiin 16 pyörrevirtahajottajan (kukin 40 l/s) kautta, ja poistopisteitä oli kaksi (390 l/s, 250 l/s). Tuloilman lämpötila oli 18°C ja lisäjähdytyskapasiteettia tarjosivat vesikiertoiset jäähdytyspaneelit. Sisäilman keskimääräinen lämpötila oli mallinnuksissa 23°C.

**Kuva 6.13** Avotoimiston CFD-malli, jossa näkyvät tuloilmalaitteet, poistopisteet, ilmanpuhdistimet sekä sairaiden henkilöiden sijainnit.

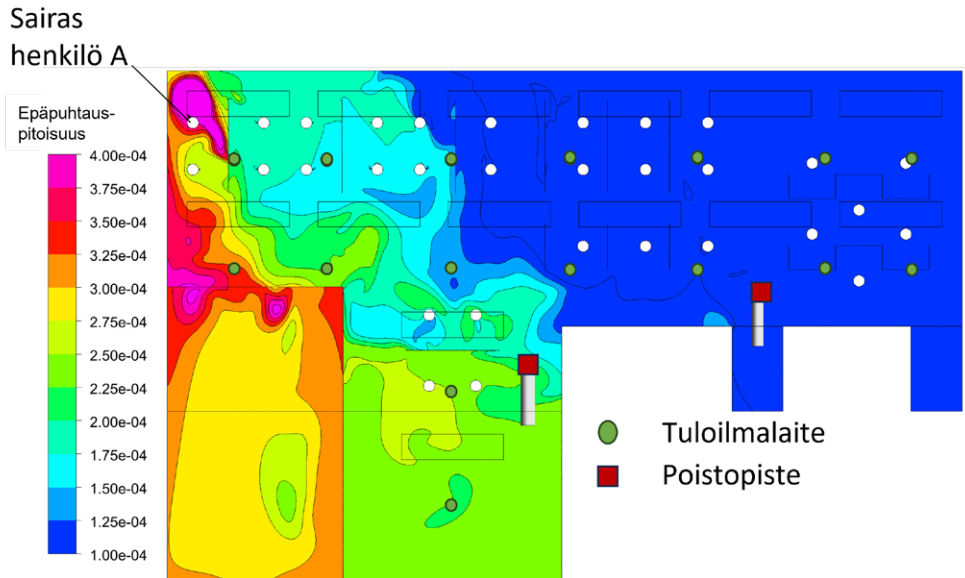


Mallinnuksissa tilaan lisättiin kaksi ilmanpuhdistinta, joiden puhtaan ilman tuotto oli 320 l/s per laite, ja täten puhtaan ilman tuotto (Clean Air Delivery Rate, CADR) oli kokonaisuudessaan yhtä suuri kuin avotoimiston tuloilmavirta. Yleensä puhdistimet mitoitetaan siten, että CADR-luku on suurempi kuin kaksi (REHVA 2021), mutta tässä tapauksessa päädyttiin käyttämään pienempää mitoitusta tilan suuren koon takia, sillä isompien puhdistimien ilmavirrat ja tätä myötä myös melutasot olisivat nousseet korkeiksi.

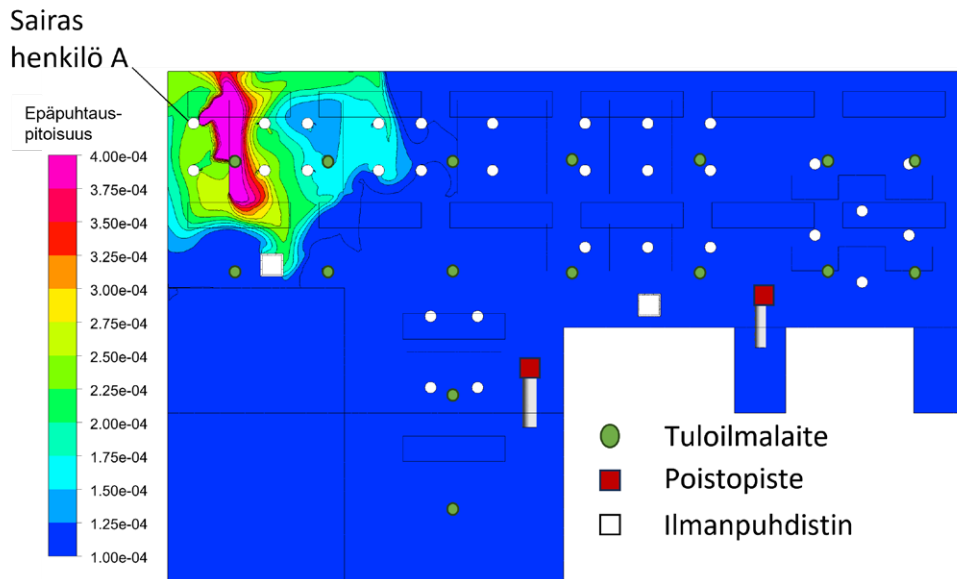
Kuten opetustilojen kohdalla, myös avotoimiston osalta tarkasteltiin epäpuhtauspitoisuuksia sekä niiden poistotehokkuutta 1,1 metrin korkeudella kolmella eri sairaan henkilön sijainnilla. Mallinnuksissa toimistossa oli 31 henkilöä. Kullekin sairaan henkilön sijainnille laskettiin perustapaus normaalia ilmanvaihtoa käyttäen sekä toinen tapaus, jossa tilaan oli sijoitettu kaksi ilmanpuhdistinta. Puhdistimet oli mitoitettu siten, että kumpikin tuotti puhdasta ilmaa 320 l/s, joten yhteensä niiden puhtaan ilman tuotto (CADR, clean air delivery rate) oli tasan yksi. REHVA:n suositus CADR-arvolle on >2 (REHVA 2021), mutta tilan koon vuoksi ilmamäärät ja sen myötä puhdistimien meluhaitat olisivat nousseet suositusmitoituksella suuriksi.

Kuvissa 6.14 ja 6.15 on esitetty dimensiottomat epäpuhtauspitoisuudet (pitoisuus sairaan hengityksessä yksi) perusilmanvaihdoilla ja puhdistimien kanssa tilanteessa, jossa saira henkilö istuu tilan nurkassa paikassa A. Perusilmanvaihdoilla epäpuhtaudet leviävät seiniä pitkin ja pitoisuus on koholla käytännössä koko toimiston vasemmassa puoliskolla. Puhdistimien avulla pitoisuus pystytään rajaamaan huoneen nurkaan muutaman työpöydän alueelle.

**Kuva 6.14** Dimensioton epäpuhtauspitoisuus avotoimistossa perusilmanvaihhdolla sairaan henkilön ollessa paikalla A.



**Kuva 6.15** Dimensioton epäpuhtauspitoisuus avotoimistossa ilmanpuhdistimien kanssa sairaan henkilön ollessa paikalla A.



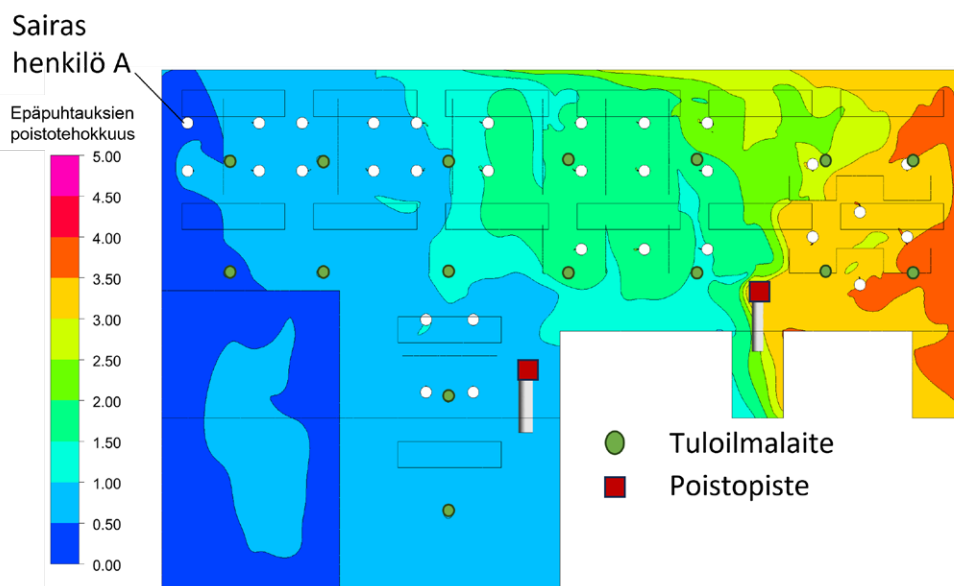
Liitteen 2 kuvista 1–2 nähdään epäpuhtauspitoisuudet perusilmanvaihhdolla ja puhdistimien kanssa sairaan ollessa tilan keskivaiheella paikassa B. Tulokset ovat hyvin samankaltaiset kuin edellä, eli perusilmanvaihhdolla epäpuhtaudet lähtevät leviämään

laajalle alueelle kohti kumpaakin poistopistettä, kun taas puhdistimen käytöllä ne pystytään rajaamaan sairaan henkilön lähivyöhykkeelle.

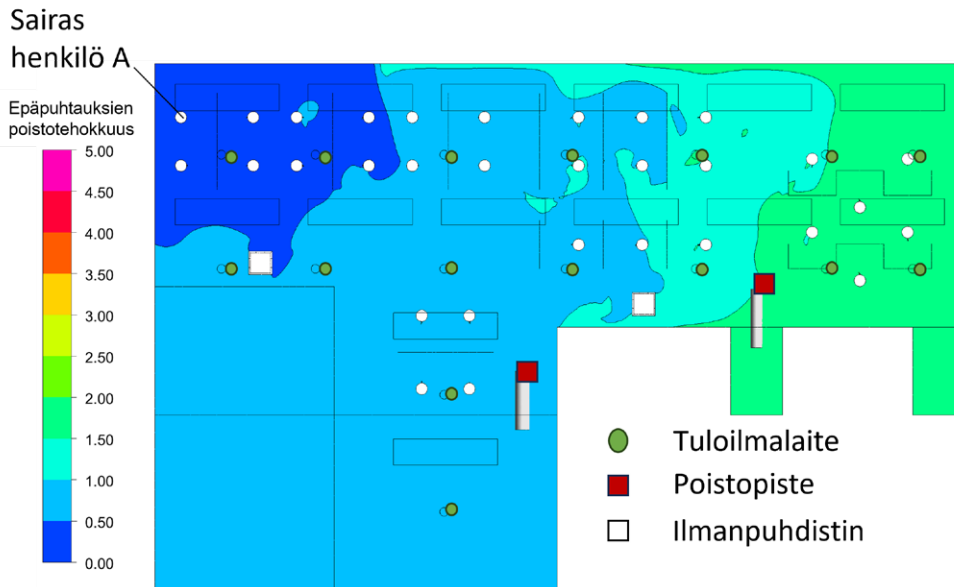
Sairaana ollessa paikassa C (Liitteen 2 kuvat 3–4), joka on käytännössä suoraan toisen poistopisteen alapuolella, tilanne on varsin toisenlainen kuin edellä. Epäpuhtauksista valtaosa menee suoraan poistoon ja hieman kohonneita pitoisuuksia on ainoastaan sairaan lähivyöhykkeellä. Tässä tapauksessa puhdistimien käytöllä ei ollut juurikaan vaikutusta.

Kuvissa 6.16 ja 6.17 esitetään epäpuhtauksien poistotehokkuudet perusilmanvaihdoilla ja puhdistimien kanssa tilanteessa, jossa sairas henkilö on paikassa A. Poistotehokkuudet on laskettu käyttäen molempien poistopisteiden pitoisuuksien keskiarvoa. Kuvien perusteella vaikuttaisi, että poistotehokkuus heikkenee lisäämällä tilaan ilmanpuhdistimet. Tilanne ei kuitenkaan ole tämä, vaan pienemmät poistotehokkuudet puhdistimien kanssa johtuvat yksinkertaisesti siitä, että epäpuhtauspitoisuudet poistopisteissä ovat merkittävästi pienemmät kuin ilman puhdistimia. Tästä syystä tapaukset eivät ole vertailukelpoisia keskenään käytettäessä indikaattorina paikallisen pistelähteen epäpuhtauksien poistotehokkuutta.

**Kuva 6.16** Paikallisen pistelähteen aiheuttamien epäpuhtauksien poistotehokkuus avotoimistossa perusilmanvaihdoilla sairaan henkilön ollessa paikalla A. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



**Kuva 6.17** Paikallisen pistelähteen aiheuttamien epäpuhtauksien poistotehokkuus avotoimistossa ilmanpuhdistimien kanssa sairaan henkilön ollessa paikalla A. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.

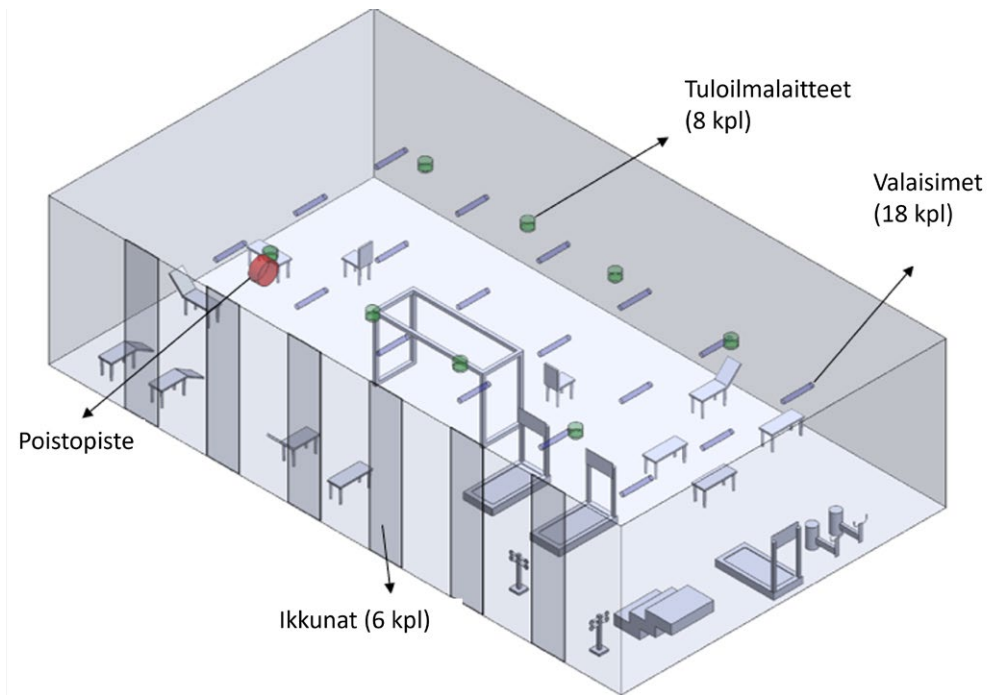


Avotoimiston mallinnustuloksista voidaan todeta, että ilmanpuhdistimien avulla pystytään varsin tehokkaasti rajoittamaan taudinaiheuttajien leviämistä tilassa. Tarkastelluissa tapauksissa jopa reilusti suosituksiin verrattuna alimitoitetuilla puhdistimilla saatiin hyviä tuloksia. Vielä puhdistintakin tehokkaampi keino on sijoittaa sairaan henkilön poistopisteen välittömään läheisyyteen, mutta tämä ei yleensä käytännössä ole mahdollista, koska ei tiedetä kuka tilassa sairastaa.

### 6.4.3 Kuntosali

Tarkastelun kohteena ollut kuntosali oli pinta-alaltaan 173,5 m<sup>2</sup> ja siellä oli avotoimiston tapaan maksimihenkilömäärä, 16 ihmistä. CFD-mallin havainnekuva on kuvassa 6.18. Kuntosalissa ilmanvaihto oli 900 l/s eli n. 5,2 l/s/m<sup>2</sup>. Tuloilmalaitteet olivat sielläkin samantyyppisiä pyörrevirtahajottajia, mutta niitä oli kahdeksan kappaletta eli ilmavirta hajottajaa kohti oli 113 l/s. Poistopisteitä oli ainoastaan yksi. Tuloilman lämpötila perustui mittauksiin ja oli 18°C. Sisälämpötila oli ihmisten ollessa paikallaan 20°C ja nousi 22,5°C:een salissa olijoiden tehdessä liikuntasuoritteita.

**Kuvassa 6.18** Kuntosalin CFD-malli, jossa näkyvät tuloilmalaitteet, poistopiste, valaisimet sekä ikkunat.

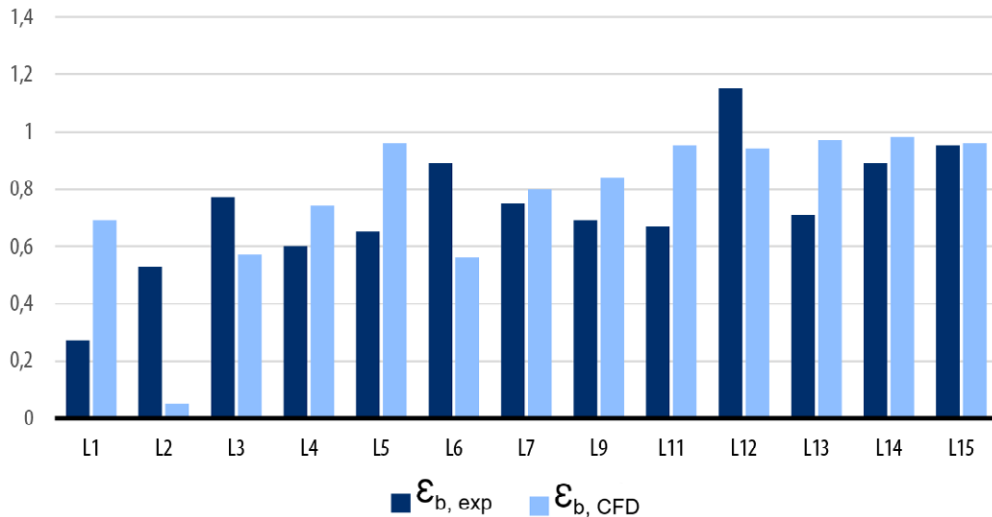


Kuntosalissa olleet ihmiset mallinnettiin samaan tapaan lämmitettyinä sylintereinä kuin muissakin tiloissa. Liikuntasuorituksen aikana uloshengitystä nostettiin lukemaan 50 l/s ja lämmöntuottoa 210 wattiin per henkilö.

Kuten opetustilan mallinnuksessa, myös kuntosalin mallin validointiin käytettiin piste-mäisen lähteen epäpuhtauksien poistotehokkuuden  $\varepsilon_b$  mittaustuloksia. Kuvassa 6.19 on esitetty mitatut (sinisellä) ja CFD-mallin antamat (punaisella) poistotehokkuudet eri puolilla kuntosalia. Tässäkin tapauksessa mallinnustulokset vastasivat hyvin mitattuja, joskin lähellä sairasta henkilöä (pisteet L1 ja L2) eroa oli jonkin verran. Erot johtuvat mitä luultavimmin siitä, että paikalliset virtaukset käyttäytyivät hieman eri tavoin mitauksissa ja mallinnuksessa.



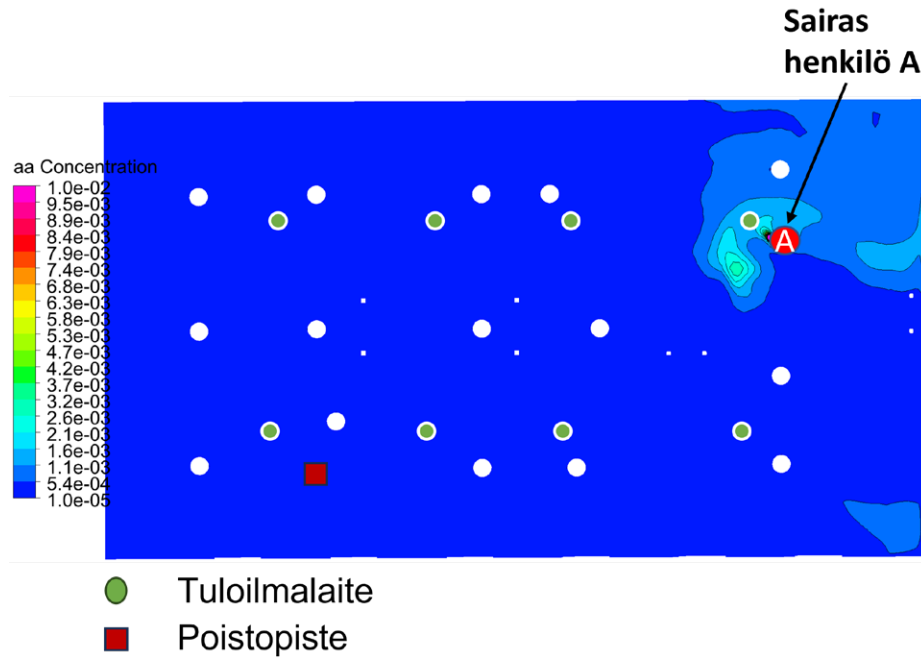
**Kuva 6.19** Pistemäisen lähteen aiheuttamien epäpuhtauksien mitatut (siniset palkit) ja laskennalliset (oranssit palkit) poistotehokkuudet eri puolilla kuntosalia.



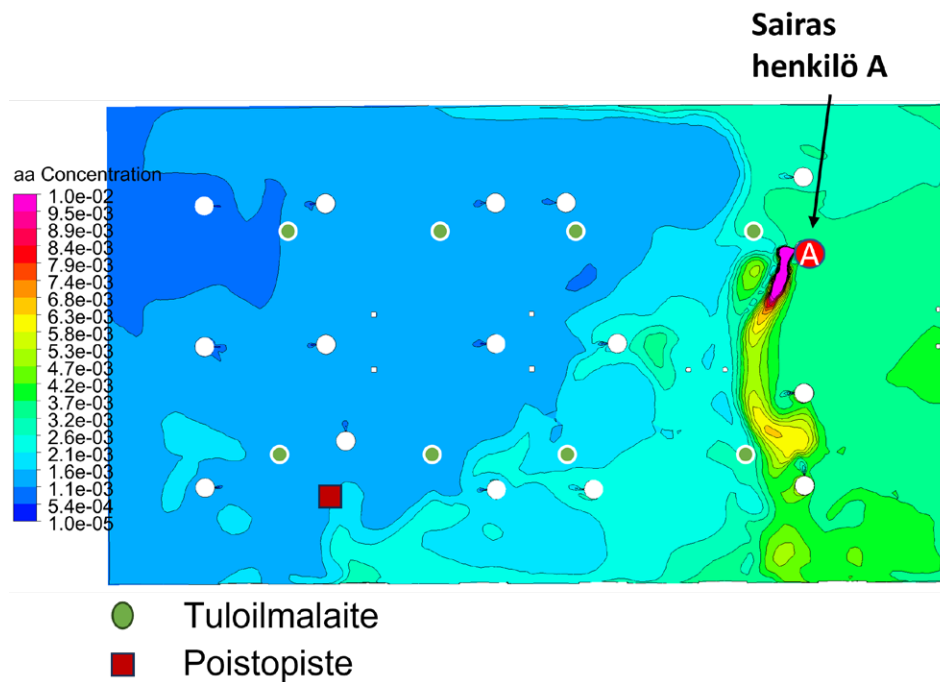
Validoitua mallia käytettiin laskemaan epäpuhtauspitoisuudet ja paikalliset epäpuhtauksien poistotehokkuudet 1,1 metrin korkeudelta kolmelle eri sairaan henkilön sijainnille A-C. Tilassa oli mallinuksissa 16 henkilöä, jotka tapauksesta riippuen olivat joko paikoillaan tai tekivät raskaita liikuntasuoritteita. Paikoillaan olevien ihmisten uloshengitysilmapvirta oli 6 l/s ja lämmöntuotto 75 W, kun taas liikuntasuoritteita tekevillä ne olivat 50 l/s ja 210 W. Tilan tuloilmavirta ja tuloilman lämpötila pidettiin kaikissa tapauksissa samoina, joten tila oli liikuntasuoritteita tehtäessä hieman lämpimämpi kuin ihmisten ollessa paikoillaan.

Kuvissa 6.20 ja 6.21 on esitetty epäpuhtauspitoisuudet kuntosalissa, kun saira henkilö on paikassa A. Pitoisuudet on kummassakin tapauksessa normalisoitu siten, että sairaan henkilön uloshengityksen pitoisuus on yksi. Kuvioista nähdään, että ihmisten ollessa paikoillaan taudinaiheuttajat jäävät sairaan henkilön välittömään lähiympäristöön, eivätkä käytännössä leviä ollenkaan. Liikuntasuoritteita tehtäessä tilanne on varsin toisenlainen ja taudinaiheuttajien pitoisuus on koholla käytännössä koko tilassa, erityisesti sairaan henkilön päädyssä.

**Kuva 6.20** Dimensioton epäpuhtauspitoisuus kuntosalissa ihmisten ollessa paikallaan ja sairaan pisteessä A.



**Kuva 6.21** Dimensioton epäpuhtauspitoisuus kuntosalissa ihmisten tehdessä raskaita liikuntasuorituksia ja sairaan ollessa pisteessä A.

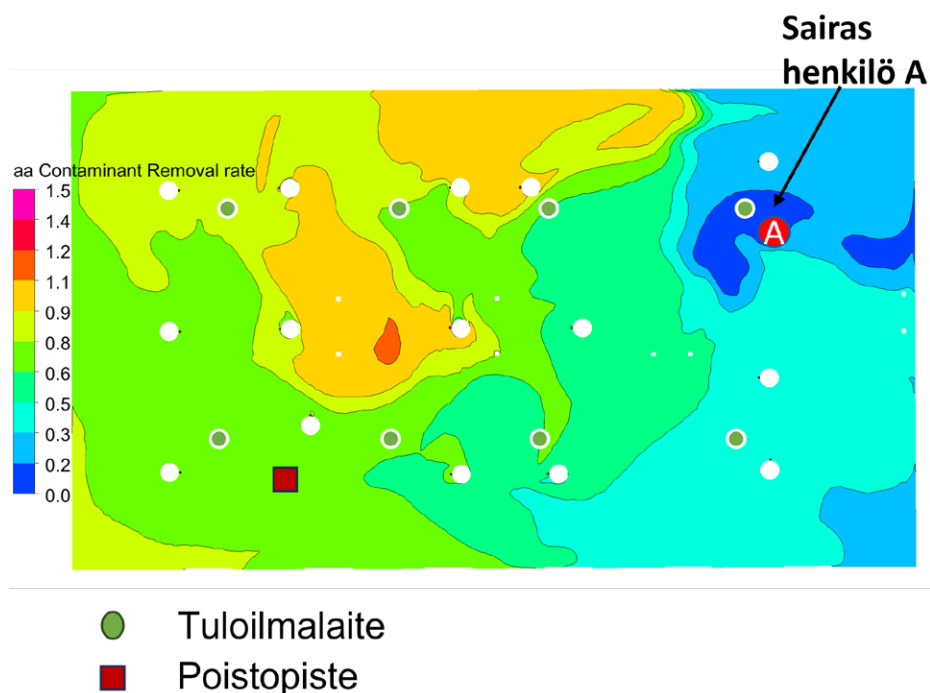


Liitteen 3 kuvat 1–2 näyttävät epäpuhtauspitoisuudet tilanteessa, jossa sairas henkilö on paikassa B lähellä poistopistettä. Kuvioista huomataan, että tässä tapauksessa taudinaiheuttajat eivät pääse leviämään edes liikuntasuoritusten aikana merkittävästi, vaan ne päätyvät poistoilman mukana heti ulos tilasta.

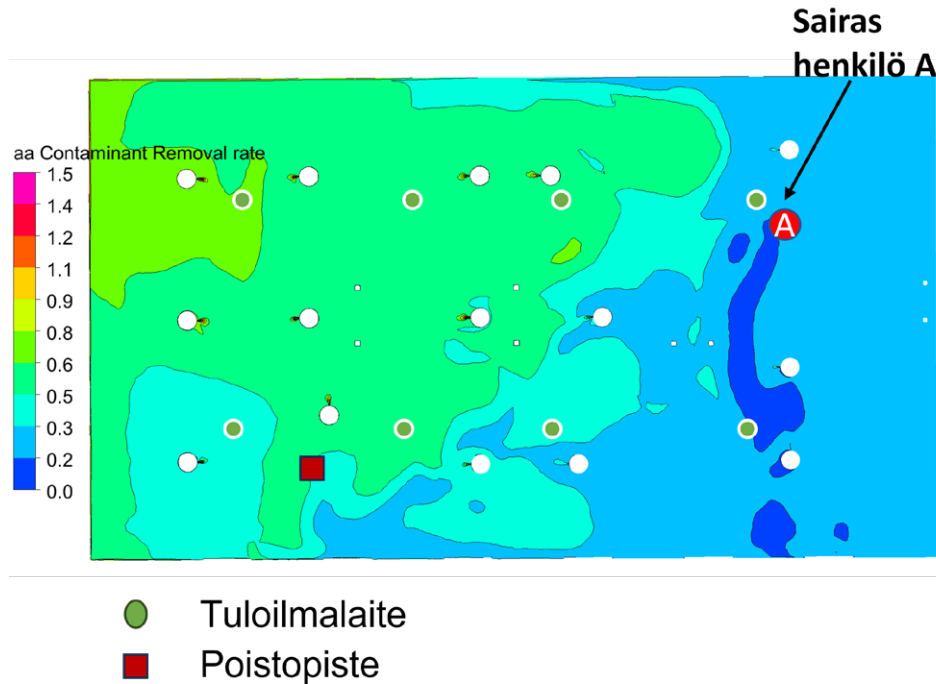
Liitteen 3 kuvissa 3–4 esitetään epäpuhtauspitoisuudet tilanteessa, jossa sairas henkilö on paikassa C, eli vastakkaisessa nurkassa kuin paikka A. Tässäkään tapauksessa taudinaiheuttajat eivät lähde leviämään ihmisten ollessa paikoillaan, mutta liikuntasuoritteita tehtäessä tapahtuu samantyyppinen leviäminen kuin sairaan A tapauksessa, joskin pitoisuudet ovat kaikkialla korkeammat. Koska tuloksissa tarkastellaan ainoastaan tilannetta 1,1 metrin korkeudella, kyse voi olla esimerkiksi siitä, että isompi osa taudinaiheuttajista päätyy juuri sille korkeudella sairaan C tapauksessa.

Kuvissa 6.22 ja 6.23 esittävät paikallisen pistelähteen aiheuttamien epäpuhtauspitoisuuksien poistotehokkuudet kuntosalissa sairaan ollessa paikassa A. Kuvioista nähdään, että poistotehokkuus on valtaosassa salia alle yhden silloinkin, kun ihmiset ovat paikallaan, ja selkeästi alle yhden koko salissa ihmisten tehdessä liikuntasuoritteita. Poistotehokkuuksien paikalliset erot ovat melko pieniä, joten ilma salissa näyttäisi sekoittuvan varsin hyvin.

**Kuva 6.22** Pistemäisen lähteen aiheuttamien epäpuhtauksien poistotehokkuus kuntosalissa ihmisten ollessa paikallaan ja sairaan henkilön pisteessä A. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



**Kuva 6.23** Pistemäisen lähteen aiheuttamien epäpuhtauksien poistotehokkuus kuntosalissa ihmisten tehdessä liikuntasuorituksia ja sairaan henkilön ollessa pisteessä A. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



Liitteen 3 kuvissa 5–6 näkyvät epäpuhtauksien poistotehokkuudet sairaan ollessa paikassa B lähellä poistopistettä. Tällöin tilanne on – kuten jo dimensiottomat pitoisuudet osoittivat – huomattavasti parempi. Alle ykkösen poistotehokkuuksia esiintyy ainoastaan sillä laidalla huonetta, jossa sairaas on, ja valtaosassa salia epäpuhtaudet poistuvat varsin tehokkaasti myös silloin, kun ihmiset tekevät liikuntasuorituksia.

Liitteen 3 kuvissa 7–8 on esillä tilanne, jossa sairaas on paikassa C. Asetelma on samantyyppinen kuin sairaan ollessa paikassa A, ja suurin ero kyseiseen tapaukseen on pienempi etäisyys poistopisteestä. Kuvioiden perusteella poistotehokkuudet ovat hieman paremmat kuin sairaan ollessa paikassa A. Tämä selittyy kuitenkin pääasiassa sillä, että pitoisuus poistopisteessä on suurempi.

Kuntosalin mallinnustuloksista voidaan tehdä se johtopäätös, että ainakin mallina olleessa salissa ilmanvaihdon avulla pystytään ehkäisemään taudinaiheuttajien leviäminen silloin, kun ihmiset eivät tee liikuntasuoritteita. Raskaan aktiviteetin aikana tilanne on kuitenkin toinen ja leviämistä tapahtuu joka puolelle, ellei sairaas satu olemaan juuri poistopisteen alapuolella.

## 6.5 Kustannusvaikutukset ja johtopäätökset

Tulosten mukaan nykyistä ilmanvaihdon mitoituskäytäntöä edustavien referenssikohteiden mukaisilla ilmavirroilla hengitysinfektoriskiä voidaan hallita tietyillä edellytyksillä. S1 ja S2 luokan välimaastoon asettautuvat tutkitun mallikoulun ilmavirrat olivat täysin riittäviä tavanomaisissa opetustiloissa. Sen sijaan avotoimistossa, jossa mitoitussilmavirrat olivat suurempia kuin S1 luokassa jouduttiin vähentämään henkilömäärä 31 henkilöstä 24 henkilöön, jotta ilmavirta olisi riittävä tartuntapohjaiseen mitoitukseen. Noin 20 %:a pienempi henkilömäärän voidaan nähdä järkevänä ratkaisuna epidemiatilanteessa, eli sen takia suurempaa ilmanvaihtoa ei välttämättä kannata mitoitaa. Näin tavanomaisissa opetus- ja toimistotiloissa tarvitaan S1 luokan lähellä oleva tai joissakin tapauksissa sitä kohtuullisissa määrin ylittävä mitoitus. On selvä, että näin suurilla ilmamäärillä toimivien ilmanvaihtojärjestelmien pitää olla tarpeenmukaisesti ohjattuja ainakin suurempien tilojen osalta. Koska mitoitussilmavirtoja tarvitaan ainoastaan epidemiatilanteessa, järjestelmä voi muuten toimia tarpeenmukaisella CO<sub>2</sub> ja lämpötilaohjauksella, jolloin energiatehokkuuden ja energiakustannusten osalta muutoksia ei ole. Tutkimuksessa mukana olleiden referenssikohteiden ilmanvaihtojärjestelmät olivat tarpeenmukaisesti ohjattuja ja niiden ilmavirrat olivat riittäviä, joten epidemiatilanteessa pitäisi ainoastaan muuttaa asetuservoja, jotta ilmanvaihtojärjestelmät toimisivat täydellä teholla. On myös otettava huomioon, että rakennusten energiatehokkuusdirektiivin uudelleen laadinnassa vaaditaan 2028 alkaen muissa kuin asuinrakennuksissa sisäilman laadun mukaista ilmanvaihdon säätöä, eli käytännössä katsoen tarpeenmukaista ilmanvaihtoa. Näin tartuntapohjaisella ilmanvaihtomitoituksella toteutetut rakennukset olisivat valmiina direktiivin tuomaan muutokseen. Johtopäätöksenä tavanomaisissa opetus- ja toimistotiloissa ei ole merkittäviä kustannusvaikutuksia.

Neuvotteluhuoneissa ja liikuntatiloissa tartuntapohjaiset ilmavirrat voivat olla huomattavan isoja, koska viruseritys on suurempi puhumisesta tai liikunnan korkeammasta hengitysmäärästä johtuen. Samalla epidemian tilanteesta niiden tilojen henkilömäärä pitää rajoittaa joka tapauksessa lähikontaktien estämisen (1,5 m etäisyys) takia. Tarkasteltavassa neuvotteluhuoneessa lähikontaktin estämisen takia henkilömäärä piti rajoittaa puoleen, mutta nykymitoituksen mukainen ilmavirta oli riittävä ainoastaan kolmasosaan rajoitetulle henkilömäärälle. Näiden tilojen osalta ilmanvaihtojärjestelmän kustannusvaikutukset voivat olla merkittäviä, mutta ne eivät välttämättä näy rakennusten kokonaiskustannuksissa tilojen pienen osuuden takia.

Huonekohtaiset ilmanpuhdistimet ovat laskennallisesti ja tutkitusti tehokas tapa alenuttaa viruspitoisuuksia ja -tartuntoja. Ilmanpuhdistimilla ei voida korvata, mutta voidaan tehostaa olemassa olevaa ilmanvaihtoa. Niiden soveltuvuus käytettäväksi epidemiatilanteessa on kuitenkin tapauskohtaista, koska sijoittaminen keskeisille paikoille voi olla vaikeata esim. muutenkin ahtaissa luokahuoneissa.

Toteutetut ilmamäärätarkastelut osoittivat yleisesti suurempaa eroa YM asetuksen ja Sisäilmastoluokituksen mukaisesti mitoitetuissa ilmajirroissa kuin tartuntapohjaisten ilmamäärien ja nykyisen mitoituskäytännön välillä. Suuri ero johtuu siitä, että YM asetus käyttää samaa ilmajirran perusarvoa 6 l/s hlö niin asuin- kuin muissakin rakennuksissa. Sisäilmastoluokituksen lähtökohtana on standardin EN 16798-1:2019 tapaan aistinvarainen ilman laatu tilaan tulijan kannalta eikä tilassa pitkäaikaisesti oleskelevan ja adaptoituneen henkilön kannalta. Sisäilmastoluokituksen S2 luokan mukainen mitoitus antaa selvästi suuremmat ja S1 luokan mukainen mitoitus jopa kaksinkertaiset ilmajirrat YM asetukseen verrattuna. Tartuntapohjaisesti mitoitetut ilmajirrat olivat 1,5...6 kertaisia YM asetukseen verrattuna, mutta suurimmat neuvotteluhuoneiden ja liikuntatilojen ilmajirrat olivat lähinnä teoreettisia, koska lähikontaktin estämisen takia pitää joka tapauksessa näissä tiloissa rajoittaa henkilömäärää, mikä vähentää myös ilmanvaihdon tarvetta. Vähennetyn henkilömäärän tapauksessa ilmajirrat olivat lähellä tai eivät olennaisesti ylittäneet S1 luokan arvoja.

Tartuntapohjaisessa ilmanvaihdon mitoituksessa on olennainen merkitys ilmanvaihdon tehokkuudella, joka on määritettävä pistemäisen epäpuhtauslähteen poistotehokkuudella. Vaikka merkittäviä kustannusvaikutuksia ei ole, tutkimuksessa suoritettut mittaukset osoittavat tarvetta ja mahdollisuuksia parantaa ilmanjakoa niin, että se toimisi tehokkaammin pistemäisen epäpuhtauslähteen tapauksessa. Helppo keino on useampien poistopisteiden käyttäminen, mitä nykyisessä suunnittelussa tasaisesti jakautuneen epäpuhtauslähteen ja sekoittavan ilmanjaon tapauksessa ei ole katsottu tarpeelliseksi. Osassa tiloista myös nykyisillä tuotteilla voidaan suunnitella kerrostava ilmanjakoa. Ilmanvaihdon tehokkuutta parantamalla voidaan välttää ylisuurten ilmajirtojen käyttämistä, mutta tällä hetkellä ei juurikaan löydy tietoja eri ilmanjakoratkaisujen suoritusarvoista. Toteutetut ilmanvaihdon tehokkuuden mittaukset osoittavat tarvetta laatia opastusta epäpuhtauslähteen poistotehokkuuden mittauksesta sekä tyypillisten ilmajakoratkaisujen toiminnasta.

## 7 Infektoriskin vähentämisen vaikutus terveyteen

### 7.1 Ilmavälitteisten virustautien merkitys terveyden kannalta

Vuoden 2020 alussa maailmalle levinnyt SARS-CoV-2-viruksen aiheuttama koronapandemia on pakottanut uudella tavalla huomioimaan terveysturvallisuuden sisätiloissa. Vallitseva tieteellinen näyttö osoittaa, että tartunta tapahtuu paljolti ilmavälitteisesti (Tang ym., 2021). Erityisesti Suomessa, missä vietetään ilmaston vuoksi paljon aikaa sisätiloissa, pitää tulevaisuudessa entistä enemmän huolehtia myös siitä, että sisätiloissa oleskelu on mahdollisimman miellyttävää ja turvallista käyttäjille. Tilanne ei ole uusi, vaikka korona nostikin tämän tärkeän asian uudella tavalla esille, sillä jo aiemmin on tutkittu, miten virustaudit sisätiloissa leviävät ja miten niiden leviämistä voisi teknisillä ratkaisuilla ehkäistä. Erilaiset influenssavirukset ovat olleet riesanamme jo satoja vuosia ja niiden leviämisestä saatu tieto onkin toiminut hyvänä pohjana koronaviruksen leviämistutkimuksille. Tässä raportissa keskitytään ilmasteitse leviävien virusten joukosta influenssa- ja koronavirusten leviämiseen.

#### 7.1.1 Viruksen leviäminen ja siihen vaikuttavat tekijät

Virusten leviäminen ja tarttuminen on monimutkainen prosessi, johon vaikuttavat viruksen kantajan ominaisuudet, muiden tartunta-alueella olevien ihmisten ominaisuudet (altistuvat henkilöt), viruksen ominaisuudet sekä ympäristön olosuhteet (Ai & Melikov, 2018; Buonanno, Morawska, ym., 2020; Holmgren ym., 2010). Ilmateitse leviävät virukset voivat levitä joko pisaratartuntana tai pienempinä aerosoleina. Pisaratartunta vaatii oleskelua tartunnan saaneen välittömässä läheisyydessä, kun taas aerosolitar-tunnan voi saada myös etäämmältä tai esimerkiksi saapumalla samaan tilaan heti tartunnan saaneen jälkeen. Aerosoleja erittyy tavanomaisessa uloshengityksessä, mutta erityisesti puhuessa, nauraessa tai yskiessä virusta voi erittyä paljon enemmän (Holmgren ym., 2010). Tarkkaa sairauden aiheuttavaa tartunnanaiheuttajan määrää ilmassa ei monissa ilmavälitteisissä infektioissa tunneta, mutta tiedetään, että tartuntaan vaikuttaa niin sairastuneen kyky erittää taudinaiheuttajaa, altistuneen immuunipuolustuksen toiminta kuin kaikki huoneilman taudinaiheuttajan pitoisuuteen vaikuttavat tekijät. Sairastuneen taudin vaikeusaste, sen sijainti keuhkoissa (joista taudinaiheuttajaa erittyy), äänenkäyttö, hengitystaajuus ja erilaiset hengitysteihin liittyvät toiminnot, kuten aivastaminen, vaikuttavat yksilön erittämään taudinaiheuttajamäärään.

Jo 1940-luvulla on kuvattu virusten leviämistä ympäristöön hengitysteiden kautta (Duguid, 1945), mutta 2000-luvulla on leviämistä voitu kuvata ja tutkia suurnopeuskameroilla, mitata partikkelien virtausta sekä jopa laskea ja tarkastella erittyviä pisaroita (Liao ym., 2005; Morawska, 2006; Tang ym., 2011). Pisaroiden ja aerosolien tutkiminen ei kuitenkaan suoraan kerro niissä siirtyvien virusten määrää, vaan ihmisten välillä on eroa siinä, miten paljon viruksia erittyy ympäristöön. Ihmisten henkilökohtaisiin tai immuunipuolustukseen liittyviin ominaisuuksiin pystytään osin vaikuttamaan lääketieteen keinoin, mutta ympäristötekijöillä voidaan vähentää viruksen leviämistä ja tarttumista. Nykyisin onkin ehdotettu laskenta- ja tutkintamenetelmiä, joissa otetaan huomioon esimerkiksi viruksen tarttuvuus, ihmisen erittämä virusmäärä, hengitystiheys ja aktiivisuustaso (Buonanno, Stabile, ym., 2020). Eri taudinaiheuttajien tartuntaan tarvittavaa annosta on hyvin vaikea arvioida luotettavasti (Aliabadi ym., 2011).

## 7.1.2 Tartuntariskin laskenta

Tartuntariskin laskentaa on käsitelty laajemmin tässä raportissa jo edellä. Tässä kirjallisuuskatsauksessa käytetyissä tausta-artikkeleissa on sisäympäristössä riskin arvioinnissa käytetty esimerkiksi quanta emission rate -arvoa (ERq, quanta/h; pieni arvo  $<1$  quantum  $h^{-1}$  ja suuri arvo  $> 100$  quantumia  $h^{-1}$ ). Joissain tutkimuksissa taas on käytetty tunnuslukuna TCID<sub>50</sub>-lukua (tissue culture infective dose), joka kertoo sen, kuinka monta virusta tarvitaan aiheuttamaan infektio puolella soluista soluviljelmissä (Ward & Akin, 1984). Laskelmia on voitu tehdä prospektiivisesti, jolloin voidaan ennakoita tulevia mahdollisia tartuntaketjuja, sekä myös retrospektiivisesti, jolloin usein on käytettävissä tartuntalähteen virusmäärä ja riski voidaan laskea yksilöllisemmin (Buonanno, Morawska, ym., 2020). Eri virusten tartuttavuutta on tutkittu paljon eläinkokeilla, mutta nykyisin tiedetään, että nämä tulokset ovat huonosti suoraan sovellettavissa ihmisiin (Karimzadeh ym., 2021).

## 7.1.3 Influenssaviruksen leviäminen

Influenssa A -infektiossa virusmäärä on hengitystie-eritteissä suurimmillaan 2–3 päivää infektion saamisen jälkeen. Nenähuuhtelunäytteessä virusmäärä voi tuolloin olla 10<sup>7</sup> TCID<sub>50</sub>-lukua (Douglas, 1975; Murphy ym., 1973). HID<sub>50</sub>-luku (50 % human infectious dose) on terveillä koehenkilöillä, joilla ei ole todettu vasta-aineita, ollut 0,6–3,0 kertainen TCID<sub>50</sub>-lukuun verrattuna (Alford ym., 1966). Nämä ovat nenäeritteestä mitattuja arvoja eivätkä ole suoraan verrattavissa alahengitysteiden arvoihin, joilla saattaa olla vielä suurempi merkitys tartunnan synnyssä. Influenssalla tiedetään olevan selkeä kausivaihtelu, mutta sen tarkat syyt ovat vielä selvittämättä. Pohjoisemmilla alueilla kylmä ja kuiva ilma talvella myötävaikuttaa influenssaviruksen tarttumiseen,



mutta tämä ei selitä trooppisen alueen kausivaihtelua (Tamerius ym., 2011). Trooppisilla alueilla kohonneen ilmakehän kosteuden on arveltu olevan kausivaihtelun taustalla, päinvastoin siis kuin pohjoisemmilla vyöhykkeillä (Thai ym., 2015).

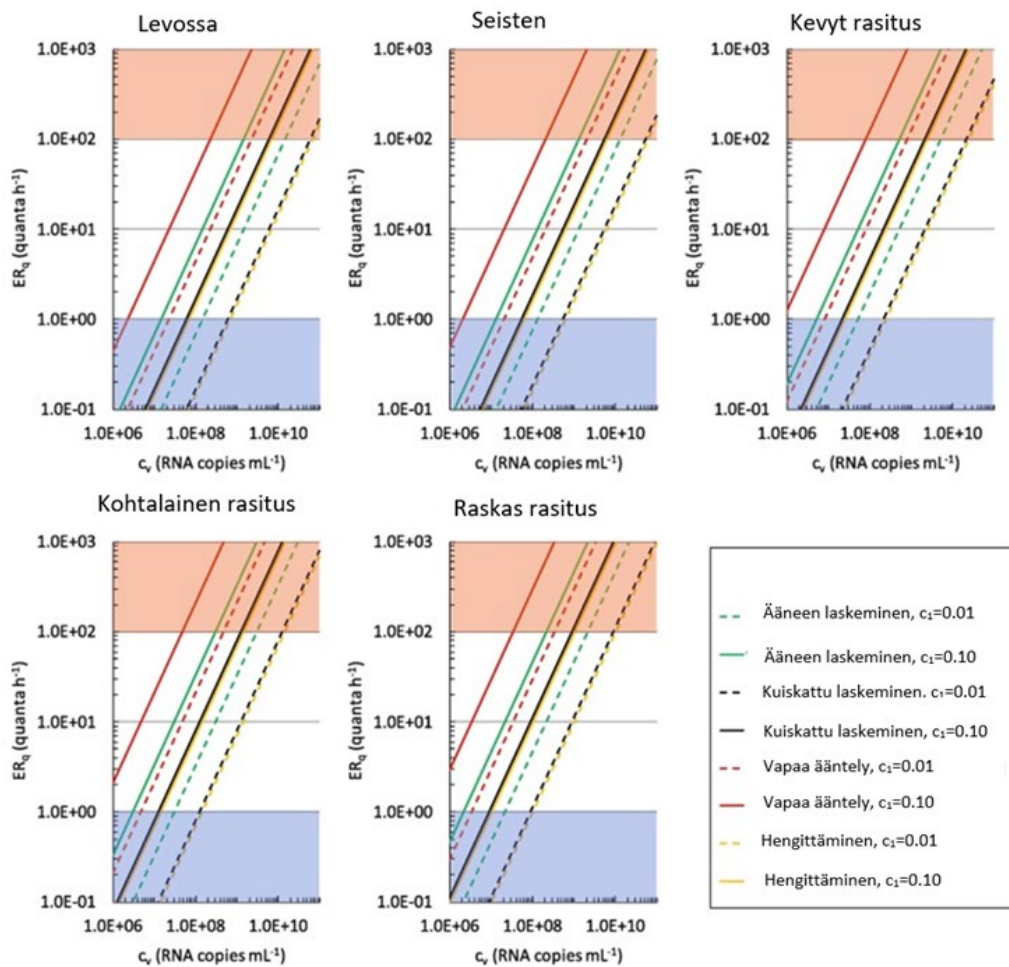
## 7.1.4 Koronaviruksen leviäminen

Tutkimusten mukaan näyttäisi siltä, että koronaviruksen (SARS-CoV-2) suurin viruseritys tapahtuisi ennen oireiden alkamista tai hyvin pian sen jälkeen (Cevik ym., 2021; Zou ym., 2020). Tämä tekee ihmisten oireisiin perustuvan torjunnan haastavaksi ja muut, ympäristöön ja käyttäytymiseen liittyvät torjuntatoimet ovat sen vuoksi tärkeässä asemassa. Erään tutkimuksen mukaan jopa 44 % koronatartunnoista tapahtuu täysin oireettomassa vaiheessa (Cowling ym. 2020). Taudin vaikeusasteesta ja viruskuormasta on saatu ristiriitaisia tuloksia, ja se vaatineekin vielä lisätutkimuksia. Vaikeaan tautiin sairastuneilla on erään tutkimuksen mukaan ollut jopa 60 kertaa suurempi viruskuorma lievemmin sairastuneisiin verrattuna ja lisäksi he tartuttivat kauemmin (Liu ym., 2020). Toinen tutkimus taas tuli siihen tulokseen, että tehohoidossa olleilla potilailla virusmäärät olivat jopa pienempiä kuin muilla osastoilla olleilla (Jacot ym., 2020). Myöskään ihmisen iän vaikutuksesta viruseritykseen ei olla päästy yksimielisyyteen: erään tutkimuksen mukaan viruksen erittyminen ihmisillä on samanlaista iästä riippumatta (Jacot ym., 2020), kun taas toisen tutkimuksen mukaan alle 5-vuotiailla lapsilla viruskuorma oli suurempi kuin aikuisilla (Heald-Sargent ym., 2020).

Koronan torjunnassa on tärkeää ennaltaehkäistä tartuntoja sellaisissa tiloissa, joissa on paljon ihmisiä samaan aikaan. Tuoreessa tutkimuksessa todettiin, että ympäristötekijöillä oli selvä vaikutus siihen, kuinka todennäköisesti tartunta saatiin. Tartuntaa edistäviä tekijöitä olivat esimerkiksi sairastuneen kiivas hengitys ja huono ilmanvaihto (Buonanno, Morawska, ym., 2020).

Koronavirukseen sairastunut kantaa suussaan arviolta  $10^8$ -  $10^{11}$  ml<sup>-1</sup> kopiota virusta (Pan ym., 2020), vaikka tiedetään että yhdenkin ihmisen kohdalla viruksen eritys vaihtelee. Tuoreessa tutkimuksessa on osoitettu miten rauhallisella hengittelyllä voi erittää suurtakin määrä virusta sairastuttamatta toisia, kun taas heti hengityksen syventyessä virusmäärän suuontelossa tulee olla selvästi pienempi, jotta koronavirus ei tartu. Raskaassa liikunnassa jo pienikin määrä virusta hengitysteissä voi tartuttaa hanakasti ympärillä olevat (kuva 7.1). Samassa tutkimuksessa tutkittiin myös sisätilojen ja niiden ilmanvaihdon merkitystä koronaviruksen leviämisessä, ja mekaanisella ilmanvaihdoilla saatiin tartuttavuutta selvästi alenemaan luonnolliseen ilmanvaihtoon verrattuna. Tartunnan kannalta suuririskisin sisätila oli ravintola, jossa yleensä on paljon toisilleen tuntemattomia ihmisiä ja jossa vietetään usein paljon aikaa. (Buonanno, Stabile, ym., 2020).

**Kuva 7.1.** ER<sub>q</sub> (quanta h<sup>-1</sup>) trendit yskösten viruskuorman funktiona (c<sub>v</sub>, RNA kopioita mL<sup>-1</sup>) ja quanta-RNA kopioiden korjattu faktori (c<sub>i</sub>) eri keuhkojen käyttöön liittyvissä tilanteissa (ääneen laskeminen, kuiskaamalla laskeminen, vapaa ääntely, hengittäminen) ja eri aktiviteettitasoilla (levossa, seisten, kevyt rasitus, kohtalainen rasitus ja raskas rasitus). Alueet kuvaavat lievää (<1 quantum h<sup>-1</sup>), sinisellä ja korkeaa (>100 quanta h<sup>-1</sup>) quanta emissioita punaisella värillä. (Kuva mukaellen lähteestä Buonanno, Stabile ym. . Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. Environ Int. 2020.)



## 7.2 Virusmäärän merkitys sairauden vaikeusasteeseen

Ilmasta tarttuvien virusten määrällä tai viruskuormalla voi mahdollisesti olla vaikutusta taudin vakavuuteen tartunnan saaneella henkilöllä. Taudin vakavuuteen vaikuttavat kuitenkin myös muut erilaiset tekijät, ja viruskuorma on vain yksi osa kokonaiskuvaavaa, kuten edellä on mainittu.

Viruskuorma tarkoittaa tartunnan saaneen yksilön kehossa olevan viruksen määrää, yleensä mitattuna virushiukkasten lukumääränä tai viruksen geneettisen materiaalin pitoisuutena. Kun henkilö hengittää sisään ilmajäljkeitä viruksia, viruskuorma voi vaihdella, riippuen esimerkiksi juuri kyseisen viruksen tartuttavuudesta, tartunnan saaneen etäisyydestä viruksen lähteeseen sekä altistumisen kestosta.

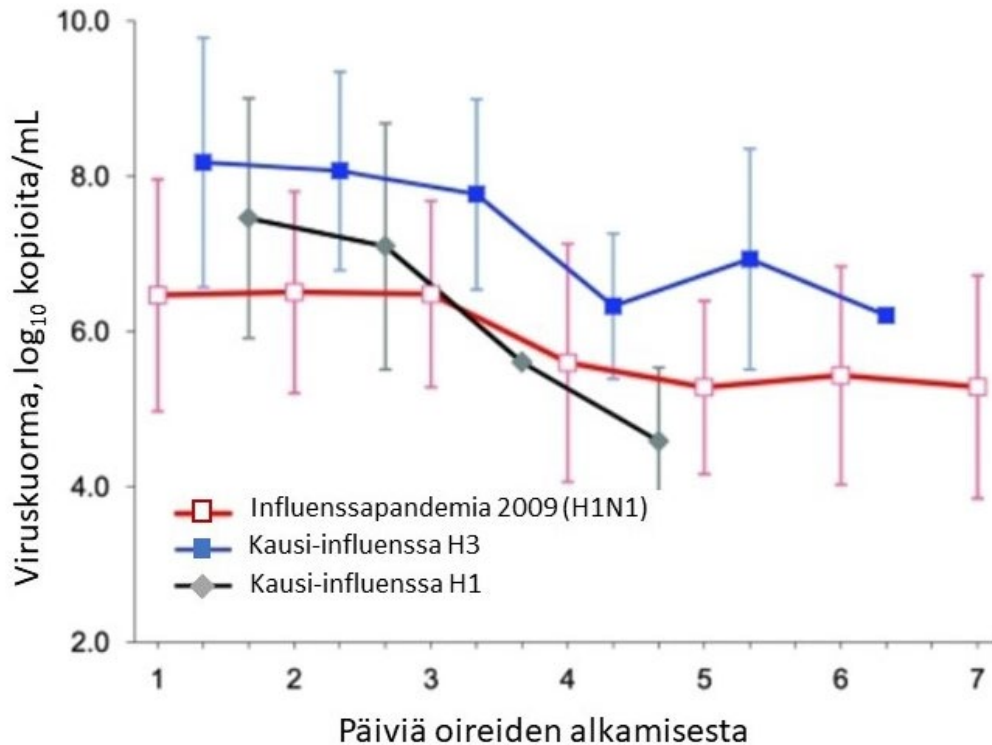
Korkeampi viruspitoisuus ilmassa voi mahdollisesti johtaa korkeampaan alkuperäiseen viruksen annokseen hengityselimissä, kun henkilö saa tartunnan. Korkeampi alkuperäinen virusannos voisi silloin ylittää immuunijärjestelmän puolustuskyvyn, sallien viruksen lisääntymisen nopeammin ja aiheuttaen vakavampaa infektiota. Tämä ilmiö on ainakin osittain havaittu joissakin hengitystieinfektioita aiheuttavissa viruksissa, mukaan lukien uusi koronavirus.

Altistumisen vähentäminen hyvän hygienian, kasvomaskien käytön, fyysisen etäisyyden pitämisen ja ilmanvaihdon parantamisen avulla voi auttaa alentamaan kokonaisviruksen kuormitusta ilmassa. Näillä toimenpiteillä voidaan mahdollisesti vähentää tartuntariskiä ja taudin vakavuutta, jos tartunta kuitenkin tapahtuu.

### 7.2.1 Elimistöön päätyvän virusmäärän merkitys influenssan vaikeusasteeseen

Niin kausi- kuin pandemiainfluenssoissa suurimmat viruskuormat havaitaan yleensä 1–2 päivää oireiden ilmaannuttua, minkä jälkeen viruskuorma tyypillisesti pienenee (kuva 7.2.) (Carrat ym. 2008, Lee ym. 2011, Li ym. 2010, Lu ym. 2010). Kausi-influenssapotilailla elimistön puolustusreaktiota ilmentävä proinflammatoristen sytokiinin lisääntyminen saattaa tietyillä väestöryhmillä korreloida taudin vakavuusasteeseen (Oshansky ym. 2013), mutta on epäselvää, onko viruskuorman ja influenssan kliinisen vakavuusasteen ja/tai etenemisen välillä vastaavaa yhteyttä (Bian ym. 2014, Hagau ym. 2010, Kim ym. 2009, Lee ym. 2009, Tsou ym. 2012).

**Kuva 7.2.** Viruskuorma (RNA copies/mL) H1N1 2009 (NP) sekä kausi-influenssassa (H1 ja H3 (MP) Keskihajonnat  $\pm 1$  SD. NP, nucleoprotein; MP, matrix protein. Mukailtu Lee ym. 2011.



Viruskuorman suuruuteen sekä sen ja taudin vakavuusasteen yhteyteen saattavat vaikuttaa ainakin influenssan tyyppi (Granados ym. 2017, Ip ym. 2017, Lee ym. 2011, Ngaosuwankul ym. 2010, Tsou ym. 2012), näytteenottoon ja näytteen laatuun liittyvät yksityiskohdat (Duchamp ym. 2010, Magnard ym. 1999, Lee ym. 2011, Pereira ym. 2022) potilaan ikä (Franz ym. 2010, Tsou ym. 2012) tai muut sairaudet (Lee ym. 2009, Wang ym. 2017).

Vaikka influenssan viruskuorma ei olisikaan yksiselitteisesti yhteydessä taudin vakavuusasteeseen tai olennainen ennustamaan taudin etenemistä, on sen silti todettu korreloivan kliinisten oireiden ilmentymisen kanssa eri-ikäisillä (Hijano ym. 2019, Lalueza ym. 2019, Lee ym. 2011, McKay ym. 2020, Rodrigues Guimarães Alves ym. 2020, Tsou ym. 2012). Potilaat, jotka erittivät virusta enemmän (esim. yskiessä tai aivastaessa) kokivat myös sairastaneensa vakavamman taudin, joka häytti merkittävästi päivittäistä elämää (Bischoff et al. 2013). Viruskuorman kvantifiointilla ei kuitenkaan välttämättä saada lisätietoa, joka voisi edesauttaa hoidon tai taudin lopputulmaa (Lalueza ym. 2019, McKay ym. 2020). Sairaalahoidon vaativilla influenssapotilailla viruksen lisääntyminen saattaa kuitenkin olla aktiivisempaa ja pitkäkestoisempaa

sekä viruksen poistuminen elimistössä hitaampaa (Lee ym. 2009, Meschi ym. 2011, Wu ym. 2011)

## 7.2.2 Elimistöön päätyvän virusmäärän merkitys koronataudin vaikeusasteeseen

Olemassa olevan tutkimustiedon valossa ei voida luotettavasti vahvistaa tai kumota yhteyttä SARS-CoV2-viruskuorman ja COVID-19-taudin vakavuusasteen välillä. Useissa tutkimuksissa raportoidaan, ettei SARS-CoV2 virusmäärällä ja taudin vakavuusasteella ole yhteyttä (esim. Abdulrahman ym. 2021, Aykac ym. 2021, Le Borgne ym. 2021, Pawar ym. 2022, Trunfio ym. 2021), kun taas joissain tutkimuksissa yhteys on havaittu ainakin tietyin reunaehdoin (esim. Kwon ym. 2021, Maltezou ym. 2021, Silva ym. 2021, Tsukagoshi ym. 2021). Viruskuorman ja taudin vakavuusasteen yhteys vaikuttaisi löytyvän todennäköisimmin iäkkäillä potilailla (Maltezou ym. 2021) sekä syljestä (muttei nenänielusta) mitatulla viruskuormalla (Silva ym. 2021).

SARS-CoV2-viruskuorman ja COVID-19-taudin vakavuusasteen yhteyttä tarkastelleet kaksi systemaattista katsausta esittävät myös osittain toisistaan eriävää tietoa: Siinä, missä Shenoy ym. (2021) totesivat suuren virusmäärän olevan taudin vakavuusasteen ennustaja, eivät Dadras ym. (2022) löytäneet selkeää yleistettävää yhteyttä, vaan totesivat eri tutkimustulosten olevan keskenään ristiriitaisia sekä vaikeasti vertailtavissa.

Tulosten tulkintaa hankaloittaa yksittäisten tutkimusten metodologinen heterogeenisyys toisiinsa nähden, minkä vuoksi aiheesta ei vielä ole voitu tehdä meta-analyysia (Dadras ym. 2022). Lisäksi useat tutkimusjulkaisut ovat retrospektiivisiä raporteja, ts. mahdollisuutta potilaiden toistotestaukseen ei ole ollut. Näin ollen tieto virusmäärän muutoksista ajan ja taudin vaiheen suhteen on vähäistä. Lisäksi tieto taudin kulusta ennen näytteenottoa (oireellisten päivien lukumäärä ja oireiden laatu) ei useimmissa tapauksissa ole tiedossa, mutta olemassa olevan datan perusteella tiedetään näytteissä olevan heterogeenisyyttä taudin vaiheeseen suhteutettuna (Shenoy ym. 2021).

## 7.3 Ilmavälitteisten hengitystieinfektioiden merkitys kansanterveyden kannalta

Ilmavälitteiset hengitystieinfektiot ovat merkittävä kansanterveydellinen huolenaihe. Tärkeimmät ilmavälitteiset hengitystieinfektiot ovat influenssan ja SARS-CoV-2 -koronaviruksen lisäksi RSV (respiratory syncytial virus), parainfluenssavirukset, adenovirukset ja useat rinovirukset.

Ilmavälitteisesti leviävät hengitystieinfektiot ovat erityisen tarttuvia, ja niiden leviäminen voi tapahtua nopeastikin tiiviissä yhteisössä, kuten aiemmin jo on mainittu. Infektiot voivat levitä hyvinkin helposti läheisessä kanssakäymisessä, esimerkiksi kodeissa, kouluissa, työpaikoilla ja terveydenhuollon laitoksissa, jolloin paikalliset epidemiat voivat nopeasti tartuttaa suuren määrän ihmisiä. Erityisesti epidemiat hauraiden henkilöiden yksiköissä (kuten vanhusten hoitolaitokset tai kehitysvammaisten hoitolaitokset) voivat aiheuttaa merkittäviä kansanterveydellisiä vaikutuksia. Epidemiat ja pandemiat voivat aiheuttaa laajoja terveyskriisejä, vaikuttaa yhteiskuntaan myös laajalti ja vaatia suurempia terveydenhuollon resursseja, puhumattakaan kohonneista terveyskustannuksista.

Ilmavälitteiset hengitystieinfektiot voivat aiheuttaa lieviä oireita, kuten yskää, nuhaa, kurkkukipua ja kuumetta, mutta myös vakavia oireita, erityisesti ikääntyneillä, lapsilla ja immuunipuutteisilla henkilöillä. Joissakin tapauksissa ne voivat johtaa sairaalahoitoon, tehohoitoon ja jopa kuolemaan. Koronavirusepidemian aikana myös aiemmin terveet tai nuoret henkilöt saattoivat kärsiä tavanomaista pidempään oireista tai joutua sairaalahoitoon, mikä lisäsi terveydenhuollon kustannuksia.

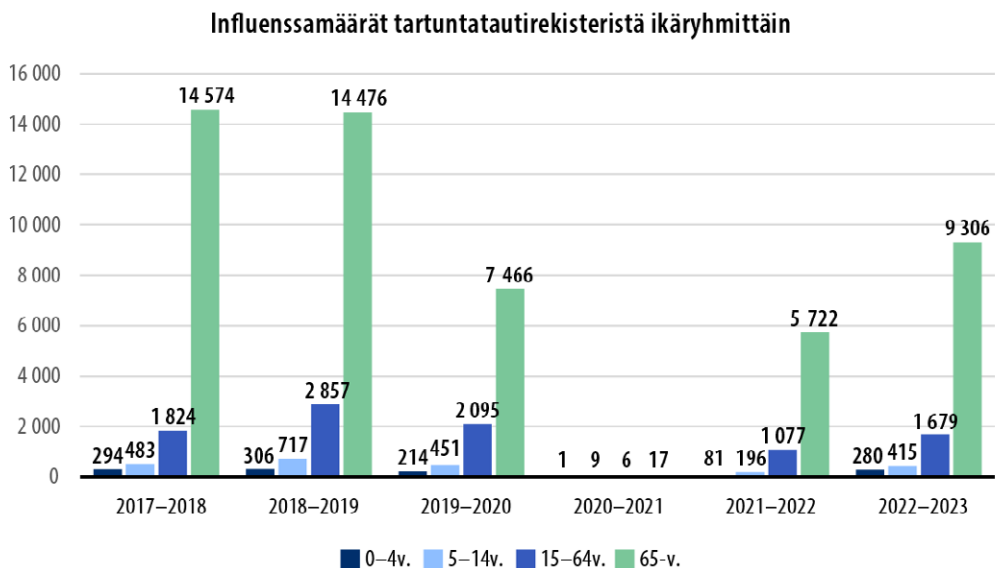
Ilmavälitteisten hengitystieinfektioiden torjunta perustuu ensisijaisesti leviämisen ehkäisyyn ja valvontatoimenpiteisiin. Ilmanvaihdon asianmukaisuus sisätiloissa on tärkeä leviämistä estävä toimi, mutta muita tärkeitä toimenpiteitä ovat rokotukset (kuten influenssassa ja koronassa), hyvä käsihygieniä, yskimis- ja aivastushygieniä, kasvomaskien käyttö tarvittaessa, sairaiden henkilöiden eristäminen sekä väestön terveysvalistus ja jäljitys- ja seurantatoimet. Torjunnalla on merkittävä vaikutus kansanterveyteen. Tehokkaat torjuntatoimenpiteet voivat vähentää tartuntojen leviämistä ja vakavien sairastumisten määrää, pienentää terveydenhuollon kuormitusta ja säästää ihmishenkiä. Siksi on tärkeää, että julkiset terveysviranomaiset ja terveydenhuollon ammattilaiset huomioivat myös ilmavälitteisten hengitystieinfektioiden ennaltaehkäisyyn ja hallintaan.

### 7.3.1 Influenssa

Influenssavirukset esiintyvät vuosittaisina epidemia-aaltoina maailmanlaajuisesti. Vuosittain influenssaan sairastuu arviolta 4–50 miljoonaa eurooppalaista ja influenssa aiheuttaa n. 15–70 000 ennen aikaista kuolemaa vuosittain. Suomeen influenssa-aalto saapuu tavallisesti marras- ja maaliskuun välisenä aikana ja suomalaisista n. 10 % sairastuu siihen vuosittain. Suurin osa sairastuneista ei tarvitse sairaalahoitoa, mutta sairauspoissaolo on yleensä 3–10 päivän pituinen ja aiheuttaa siten yhteiskunnalle lisäkustannuksia. Influenssaepidemioihin on osattu varautua jo pitkään tarjoamalla vuosittaista rokotetta sekä eristämällä sairaalahoitoyhteisöissä influenssa-positiiviset potilaat. Influenssa tarttuu jo 1–2 vuorokautta ennen oireiden alkua, joten tartuntojen estäminen on ollut haastavaa.

Kautena 2019–2020 influenssaepidemia oli lievä, ja tapauksia todettiin n. puolet vähemmän edelliseen vuoteen verrattuna. Epidemian huippu osui helmikuulle 2020, jolloin uusi koronavirus aiheutti huomion siirtymisen pois influenssasta, ja epidemia pysähtyi kokonaan koronarajoitusten tultua voimaan maaliskuussa 2020. Seuraavana kautena 2020–2021 influenssaepidemiaa ei käytännössä ollut, sillä raskaat suojausmenpiteet koronan vuoksi ehkäisivät tehokkaasti myös influenssan leviämistä. Luvut eivät 2021–2022 edelleenkään palanneet koronapandemiaa edeltävälle tasolle, luultavasti väestön korostuneen infektiotason, esim. runsaan käsienpesun ja suu-nenäsuojainten laajan käytön vuoksi. (kuva 7.3.)

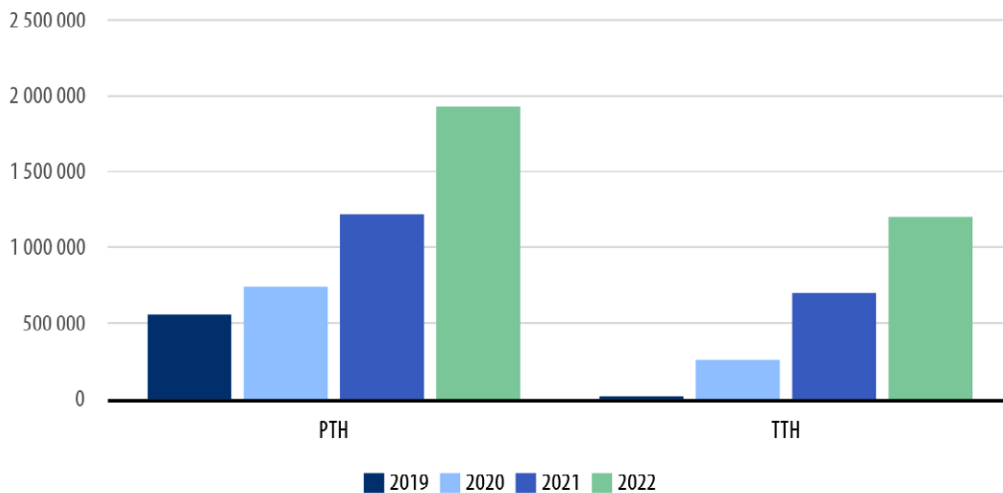
**Kuva 7.3.** Tartuntatautirekisteristä poimitut influenssadiagnoosit eri ikäryhmissä. Ajanjaksot on esitetty influenssakausittain, yleensä marras-maaliskuun väliseltä ajalta. Ikäkaudet 0–4-vuotiaat, 5–14 -vuotiaat, 15–64 -vuotiaat sekä yli 65-vuotiaat. Lähde: tartuntatautirekisteriin ilmoitetut tiedot.



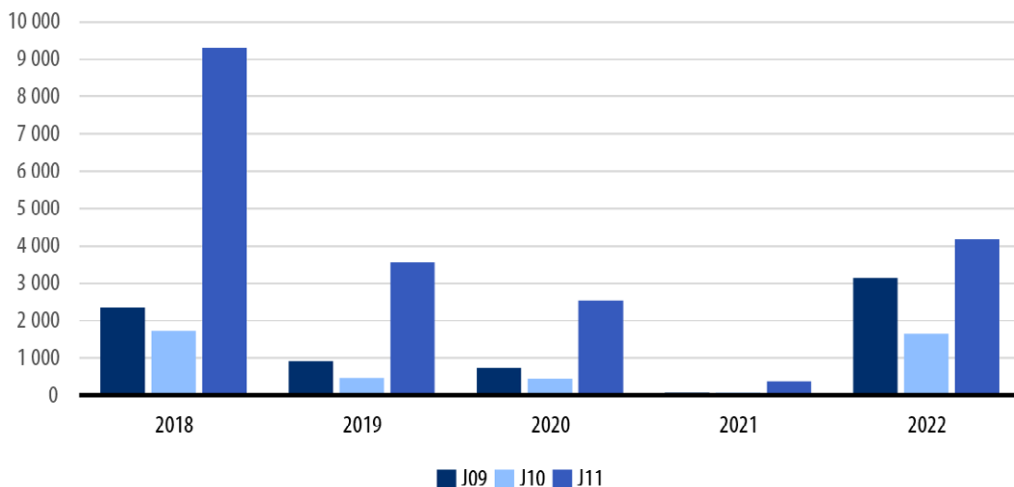
Influenssa on usein lievä, mutta myös kotona sairastavien on usein jäätävä sairauslomalle ja sairastaneet käyttävät terveystalvveluja. Terveystalvvelujen käyttö on esitetty kuvassa 7.4.

**Kuva 7.4.** Avoterveydenhuollon käynnit 2018–2022 AvoHilmoitietojen perusteella. 7.4a: Lääkärin asettamat ICD-10-diagnoosit. PTH=perusterveydenhuolto, TTH= työterveyshuolto. 7.4b: ICD-koodien perusteella influenssaan liittyvät käynnit. J09=influenssa, virus tunnistettu, J10= Muun tunnistetun influenssaviruksen aiheuttama sairaus, J11= influenssa, virusta ei tunnistettu. Lähde: Terveysten- ja hyvinvoinnin laitoksen avoimet datakuutiot.

**a. Käynnit avoterveydenhuollossa hengitystieoireiden vuoksi (ICD-koodit J00–J99)**



**b. Influenssaan liittyvät avoterveydenhuollon käynnit v. 2018–2022**





Vuonna 2017 avoterveydenhuollon käynti hengitystieinfektion vuoksi maksoi keskimäärin n. 63e. Esimerkiksi normaalina influenssakautena v. 2018 avoterveydenhuollon käyntejä hengitystieoireiden vuoksi oli terveyskeskuksissa n. 900 000, ja ne maksoivat yhteiskunnalle noin 56,7 miljoonaa euroa. Influenssakausi 2017–2018 luokiteltiin kohtalaisen lieväksi, joten vaikeampina influenssakausina kustannukset lisääntyvät selvästi.

Sairaalahoitoon influenssan vuoksi joutuu normaalina influenssatilvena keskimäärin n. 23 000 henkilöä. Sairaalapäivän laskennallinen kustannus on perusterveydenhuollossa 308e/vrk. Hengitystieinfektion erikoissairaanhoidon keskimääräinen pituus on 4,4 vuorokautta ja hoitojakson kustannukset keskimäärin 2 522,5 euroa, jolloin influenssan sairaalahoito maksaa yhteiskunnalle n. 58 miljoonaa euroa joka vuosi. Tehohoidossa yksi vuorokausi maksaa yhteiskunnalle 1 815 euroa ja influenssan on laskeutu aiheuttavan n. 700 ylimääräistä tehohoitopäivää vuodessa. Tällöin influenssa aiheuttaa vuosittain 1,3 miljoonan tehohoidon lisäkustannukset vielä muun sairaalahoiton päälle.

Hengityselinsairaudet ovat työterveyslaitoksen aineiston mukaan kaikilla tarkastelluilla aloilla yleisin lyhyen (1–10 päivää) sairauspoissaolon syy (LYHTY-hanke). Yksi sairauspoissaolopäivä maksaa keskimäärin 320 euroa. Vuonna 2017 ylähengitysteiden infektioiden vuoksi sairauspäiviä korvattiin 2 136 000 euroa ja keuhkokuumeen vuoksi 2 550 000 euroa. Keskimääräinen sairauspäiväjakso kesti 15 vuorokautta. Sairaalahoitaiseen influenssatartuntaan liittyy usein jälkitautina kehittynyt keuhkokuume. Kustannukset on koottu taulukkoon 7.1.

**Taulukko 7.1.** Arvioidut influenssan aiheuttamat lisäkustannukset terveydenhuollossa.

	<b>Miljoona euroa</b>
Avoterveydenhuollon käynnit	56,7
Sairaalahoito	58
Tehohoito	1,3
Ylähengitystieinfektio, sairauspoissaolo	2,1
Keuhkokuume, sairauspoissaolo	2,6

## 7.3.2 Korona

Koronaviruksen kansanterveydelliset vaikutukset Suomessa ovat olleet merkittävät. COVID-19-tartuntoja on todettu Suomessa merkittävästi, vaikkakin tartuntojen määrä vaihtelee ajallisesti ja alueellisesti. Tartunnat ovat aiheuttaneet sairaalahoidon tarvetta, ja jotkut potilaat ovat joutuneet tehohoitoon. Tartunnat ovat myös johtaneet kuolemantapauksiin, erityisesti iäkkäämmillä ja riskiryhmiin kuuluvilla henkilöillä. Pandemia on lisäksi asettanut suuren paineen terveydenhuoltojärjestelmälle. Sairaaloissa on hoidettu vakavasti sairaita koronapotilaita, ja tehohoitopaikkoja on jouduttu lisäämään vastaamaan kasvavaa tarvetta. Terveydenhuollon henkilöstö on tehnyt merkittävää työtä pandemian torjumiseksi.

Pandemialla on ollut merkittävä vaikutus myös ihmisten mielenterveyteen. Monet ovat kokeneet ahdistusta, masennusta ja muita mielenterveyshäiriöitä pandemian aiheuttaman epävarmuuden, eristäytymisen ja stressin vuoksi. Lisäksi pandemia ja siihen liittyvät torjuntatoimet ovat vaikuttaneet ihmisten jokapäiväiseen elämään monin tavoin. Rajoitustoimenpiteet, kuten liikkumisrajoitukset, etätyösuositukset ja tapahtumien peruutukset, ovat vaikuttaneet ihmisten sosiaaliseen elämään, vapaa-ajan aktiviteetteihin ja arjen rutiineihin. Tämä on voinut aiheuttaa sosiaalista eristäytymistä, yksinäisyyttä ja vaikutuksia ihmisten hyvinvointiin.

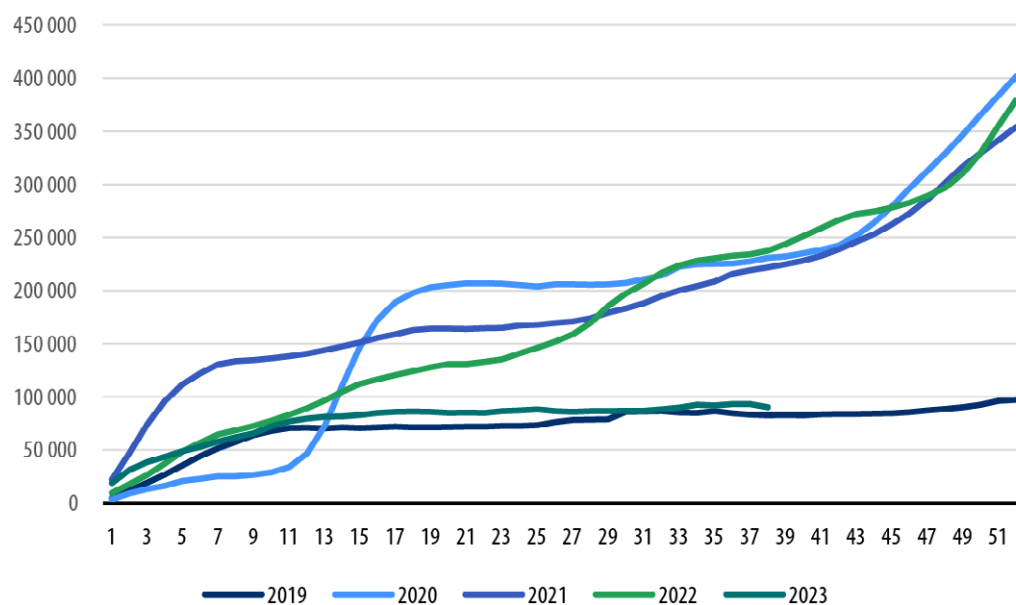
Rokotukset ovat keskeinen osa pandemian torjuntaa. Rokotusohjelma on käynnissä Suomessa, ja rokotukset ovat auttaneet vähentämään vakavia sairastumisia ja kuolemia. Rokotukset ovat myös keskeinen tekijä yhteiskunnan avautumisessa ja rajoitustoimenpiteiden lieventämisessä.

Koronapotilaiden sairaalahoitoon liittyvien kustannusten tarkkaa summaa Suomessa on vaikea määrittää. Sairaalahoitoon liittyvät kulut vaihtelevat potilaiden määrän, hoidon keston, tarvittavien resurssien, hoitoyksiköiden kapasiteetin ja muiden tekijöiden perusteella. Koronapotilaiden sairaalahoito sisältää erilaisia kustannuksia, kuten lääkärin ja hoitohenkilöstön palkat, sairaalavuodepäivämaksut, diagnostiset testit, lääkkeet, tarvittavat laitteet ja muut hoitotoimenpiteet. Lisäksi tehohoitoyksikön tai erityisvarustellun osaston käyttöönotto ja ylläpito voivat aiheuttaa lisäkustannuksia. Suomen valtiovarainministeriön arvion mukaan koronapandemian aiheuttamat kustannukset julkiselle taloudelle olivat noin 5–6 miljardia euroa vuonna 2020. Tämä sisältää myös muita kustannuksia, kuten terveydenhuollon resurssien lisäämistä, testauksen ja jäljityksen kustannuksia sekä rokotusohjelman toteuttamista. Tämä arvio sisältää myös kaikki terveydenhuollon ulkopuoliset pandemian aiheuttamat kustannukset eikä pelkästään koronapotilaiden sairaalahoitoon liittyviä kustannuksia. Kokonaiskustannuksiin vaikuttavat myös muut tekijät, kuten esimerkiksi talouden tukitoimet, yritystuet, työttömyyden vaikutukset ja muut terveydenhuollon tarpeet.

Koronapandemia on aiheuttanut terveydenhuoltojärjestelmälle kuormitusta ja lisännyt sairaalahoitoa tarvitsevien potilaiden määrää. Tämä on voinut johtaa tilapäiseen ylisairastavuuteen, kun terveydenhuollon resurssit joutuivat kohtaamaan suuremman potilasmäärän kuin normaalisti ja resurssit sekä niukka henkilöstö suunnattiin pandemian hoitoon. Tämä on voinut vaikuttaa muiden sairauksien diagnosointiin, hoidon saatavuuteen ja viivästyksiin muissa terveydenhuollon palveluissa.

Lisäksi pandemialla on ollut välillisiä terveysvaikutuksia, kuten mielenterveysongelmien lisääntyminen, liikkumattomuuden ja epäterveellisten elämäntapojen vaikutukset sekä terveyspalveluiden käytön väheneminen tai viivästyminen pelon tai rajoitusten vuoksi. Ylisairastavuuden vaikutus on saattanut vaihdella ajallisesti ja alueellisesti pandemian vaiheiden ja rajoitustoimenpiteiden mukaan. Terveydenhuollon järjestelmän kyky vastata kysyntään, tehokas jäljitys ja tartuntojen hallinta ovat myös voineet vaikuttaa ylisairastavuuden asteeseen. Ylisairastavuuden lisäksi vuonna 2022 Suomessa oli selvää ylikuolleisuutta, jonka ajatellaan ainakin osittain johtuvan koronapandemiasta ja tilanne on ollut samankaltainen koko Euroopassa (kuva 7.5). Vuoden 2021 lopulla, deltavariantin tultua valtavariantiksi, oli ylikuolleisuus 3100 kuolemaa Suomessa. Eurostat raportoi Suomelle vuonna 2022 jopa 16 % ylikuolleisuutta. Tarkkoja syitä tälle ei vielä ole pystytty kertomaan, mutta tutkijat ovat ajatelleet, että osittain tähän vaikuttaisi terveydenhuollon lisääntynyt kuormitus, johon myös pandemia on vaikuttanut, jolloin esim. tutkimuksiin ja leikkauksiin ei ole päässyt ajoissa.

**Kuva 7.5.** Ylikuolleisuus Euroopassa viikoittain vuosina 2019–2023. Vuosi 2023 ei ole täydellinen. Viikot esitetty numeroina x-janalla. Lähde: EuroMOMO (euromomo.eu) 2023.



## 8 Päätelmät

### 8.1 Rakennusten yllämpeneminen

Kaikki aktiivista jäähdytystä vailla olevat esimerkkikohteet, jotka edustavat tyypillisiä suomalaisia rakennuksia, yllämpenevät merkittävästi vuoden 2018 kuuman hellekesän aikana. Yllämpeneminen ei rajoitu pelkästään hellepäiviin tai hellejaksoihin, vaan sitä ilmenee myös niiden ulkopuolella, erityisesti pitkien hellejaksojen jälkeen. Huonelämpötilojen nousunopeus hellejaksojen alussa ja laskunopeus hellejaksojen jälkeen vaihtelevat rakennuskohtaisesti riippuen sääolojen lisäksi myös rakennuksen ja LVI-tekniikan järjestelmien ominaisuuksista, kuten ilmanvaihdon ilmavirtojen mitoituksesta. Rakennusten yllämpeneminen ei myöskään rajoitu pelkkään päiväaikaan, vaan huonelämpötilat voivat olla huomattavan korkeita myös yöllä, erityisesti pitkien hellejaksojen aikana ja niiden jälkeen. Asunnon koko ei suoraan vaikuta yllämpenemisen määrään, mikäli ikkunatuuletusta ei käytetä, vaan yllämpenemiseen vaikuttavat muut tekijät, kuten ikkunoiden määrä ja suuntaus sekä lämpökuormien määrä ja ilmanvaihdon mitoitus.

Esimerkkikohteista vanhaa olemassa olevaa rakennuskantaa edustava vanhainkoti ja kerrostalo sekä uutta rakennuskantaa edustava pientalo yllämpenevät merkittävimmin. Uudisrakennuksia edustavien esimerkkirakennusten joukosta vanhainkotia ja kerrostaloa koskeva rakentamismääräysten kesäaikainen huonelämpötilavaatimus vähentää yllämpenemistä, mutta se ei riitä takaamaan viihtyisiä lämpöoloja äärimmäisen kuumen hellekesän aikana nykyisissä ilmasto-oloissa. Huonelämpötilavaatimuksen täyttäminen edellyttää uudisvanhainkodissa ilmanvaihdon aktiivisen jäähdytyksen käyttöä, eikä asumisterveysasetuksen vanhainkodeille sovellettava toimenpideraja 30 °C tällöin ylity. Rakentamismääräyksen huonelämpötilavaatimuksen täyttävässä uudiskerrostalossa asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ei ylity, mutta kotihoidossa oleville vanhuksille käytettävä toimenpideraja 30 °C ylittyy.

Ilmastonmuutos tulee lisäämään aktiivista jäähdytystä vailla olevien rakennusten yllämpenemisriskiä merkittävästi tulevaisuudessa. Nykymääräysten kesäaikaisen huonelämpötilavaatimuksen täyttävässä uudisvanhainkodissa nykyisen asumisterveysasetuksen toimenpideraja 30 °C ei ylity vuoden 2080 ilmasto-kuvaavan äärimmäisen kuumen hellekesän aikana edes korkeimmalla päästöskenaariolla RCP8.5. Sen sijaan nykyisen huonelämpötilavaatimuksen täyttävässä uudiskerrostalossa nykyisen asumisterveysasetuksen toimenpideraja 32 °C ylittyisi vuonna 2050 jo matalimmallakin päästöskenaarioilla RCP2.6 (Lahdensivu ym. 2023)

Passiivisilla auringonsuojaratkaisuilla ja ilmanvaihdon tehostuksella voidaan vähentää yllämpenemistä, mutta ne eivät yksistään riitä torjumaan yllämpenemistä ja takamaan viihtyisiä lämpöoloja tyypillisiä suomalaisia rakennuksia edustavissa esimerkkirakennuksissa äärimäisen kuuman hellekesän aikana nykyisissä ilmasto-oloissa. Tähän tutkimukseen valitut passiiviset auringonsuojaratkaisut (kaihtimet, ulkoinen aurinkolippa ja auringonsuojalasit) edustavat tyypillisiä Suomessa käytettyjä ratkaisuja. Sen sijaan auringonsuojakalvon asentaminen olemassa oleviin ikkunoihin on vielä nykyään hieman vähemmän tunnettu yllämpenemisen torjuntakeino. Vaikka passiivisilla auringonsuojaratkaisuilla voidaan vähentää yllämpenemistä merkittävästi, on valon saantiin vaikuttavien ratkaisujen, kuten kaihtimien, suunnittelun yhteydessä tärkeää varmistaa riittävä päivänvalon saanti oleskelutiloissa. Tutkimuksessa käytetyt äärimäisen tehokkaalla auringonsuojauksella varustetut auringonsuojaikkunat voivat myös vaikuttaa näkyvän valon määrään ja sävyyn, joka on syytä ottaa huomioon lasitusratkaisun valinnassa. Tutkimuksessa käytettiin äärimmäisen hyvällä auringonsuojauksella varustettuja auringonsuojaikkunoita, koska tavoitteena oli osoittaa auringonsuojaikkunoiden enimmäisvaikutus yllämpenemisen torjuntaan esimerkkikohteissa.

Ilmanvaihdon tehostamisella voidaan myös vähentää rakennusten yllämpenemistä, kun tiloihin puhallettavan ilmanvaihdon tuloilman tai rakennuksen vaipan läpi virtaavan ilmanvaihdon korvausilman lämpötila koneellista poistoilmanvaihtojärjestelmää käytettäessä on matalampi kuin huonelämpötila. Ilmanvaihdon tulo- tai korvausilma on tyypillisesti huoneilmaa matalampi erityisesti yöaikaan myös hellejaksojen aikana, jolloin ilmanvaihdon yöaikainen tehostaminen vähentää yllämpenemistä. Mikäli huonetilat ovat yllämmenneet merkittävästi ja huonelämpötilat ovat jatkuvasti korkeammat kuin ilmanvaihdon tulo- tai korvausilma, vähentää ilmanvaihdon jatkuva tehostaminen yllämpenemistä hieman tehokkaammin kuin pelkkä yöaikainen tehostaminen. Mikäli ilmanvaihdon tuloilmaa jäähdytetään aktiivisesti, on ilmanvaihdon tehostamisella mahdollista torjua yllämpenemistä huomattavasti tehokkaammin kuin aktiivista jäähdytystä vailla olevan ilmanvaihdon tehostamisella.

Tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu ikkunatuuletuksen vaikutusta rakennusten yllämpenemiseen, koska ikkunatuuletuksen vaikutusta esimerkkirakennusten yllämpenemiseen on jo tutkittu aiemmin (Lahdensivu ym. 2023). Kyseinen tutkimus osoittaa, että rakennusten yllämpenemistä voidaan vähentää ikkunatuuletuksen avulla, mutta sen ja passiivisten auringonsuojaratkaisujen käyttö eivät yhdessäkään riitä torjumaan rakennusten yllämpenemistä esimerkiksi hellekesän 2018 aikana. Tässä yhteydessä on syytä korostaa, ettei tuuletusikkunoiden käytöllä pidä heikentää sisäilman laatua tai lisätä huonetilojen melutasoa esimerkiksi vilkkaan kadun varrella olevassa rakennuksessa.

Passiivisia auringonsuojaratkaisuja, ilmanvaihdon tehostamista ja ikkunatuuletusta on suositeltavaa käyttää rakennusten ensisijaisina yllämpenemisen torjuntakeinoina, mikäli niiden käyttö on mahdollista. Tässä tutkimuksessa perusoletuksena on se, että kaikki esimerkkikohteet varustetaan lähtökohtaisesti uloimpaan ikkunaväliin asennetuilla kaihtimilla. Samalla on syytä korostaa, että passiivisten auringonsuojaratkaisujen ja ikkunatuuletuksen käyttö voi vaatia ratkaisusta riippuen asunnon käyttäjältä aktiivisuutta ja toimintakykyä. Lisäksi asukkaalla ei ole mahdollisuutta itse tehostaa ilmanvaihtoa, jos asunnossa ei ole asuntokohtaista ilmanvaihdon säätömahdollisuutta.

Aktiivisen jäähdytyksen käyttö tulee kyseeseen silloin, kun muut yllämpenemisen torjuntatoimenpiteet eivät riitä ylläpitämään viihtyisiä huonelämpötiloja. Passiivinen auringonsuojaus yhdessä aktiivisen jäähdytyksen kanssa mahdollistavat huonelämpötilojen hallinnan kaikissa esimerkkikohteissa äärimmäisen kuumien hellekesien 2018 aikana.

Kun tutkittuja yllämpenemisen torjuntakeinoja tarkastellaan energia- ja investointikustannusten sekä saavutetun hyödyn näkökulmasta, on kaikissa esimerkkirakennuksissa kustannustehokkainta vähentää yllämpenemistä tehostamalla ilmanvaihtoa 30 % kesällä, vaikkakin toimenpiteen vaikutus yllämpenemiseen on hyvin pieni, mikäli ilmanvaihtoa ei ole varustettu aktiivisella jäähdytyksellä. Tutkimuksessa oletettiin, että ilmanvaihdon 30 %:n tehostaminen onnistuu ilman investointeja vaativia toimenpiteitä sekä vanhaa rakennuskantaa edustavissa esimerkkikohteissa että uudisrakennuksissa. Uudisrakennuksissa ilmanvaihdon 30 %:n tehostamismahdollisuus on rakentamismääräysten minimivaatimus. Ilmanvaihdon 60 %:n tehostaminen ei ole kustannustehokas yllämpenemisen torjuntakeino, mikäli se vaatii lisäinvestointeja sekä suurempaan ilmanvaihtokoneeseen sekä väljempään kanavistoon.

Auringonsuojakalvon asentaminen vanhoihin olemassa oleviin ikkunoihin on tutkituista auringonsuojauksen parantamisratkaisuista kustannustehokkain ratkaisu. Sen sijaan vanhojen ikkunoiden korvaaminen uusilla ikkunoilla pelkästään yllämpenemisen torjunnan näkökulmasta ei ole kustannustehokas ratkaisu. Mutta, kun ikkunat on kuntonsa puolesta uusittava, on lisäinvestointi tehokkaalla auringonsuojauksella varustettuihin ikkunoihin kustannustehokas yllämpenemisen torjuntakeino. Lisäinvestointi auringonsuojaikkunoihin uudiskohteissa auringonpuoleisilla julkisivuilla on kustannustehokas yllämpenemisen torjuntakeino.

Aktiivisen jäähdytyksen käytöllä yhdessä passiivisen auringonsuojauksen kanssa on mahdollista hallita huonelämpötiloja ja torjua yllämpenemisen kaikissa esimerkkirakennuksissa ja aktiivisen jäähdytyksen energiakustannukset ovat varsin pienet. Esimerkiksi tutkituissa vanhainkodeissa jäähdytyksen energiakustannukset ovat hellevuoden aikana enimmillään 0,4 €/m<sup>2</sup> (rakennuksen nettoala) ja pientaloissa vastaava

kustannus on enimmillään 0,7 € /m<sup>2</sup>. 70-luvun kerrostalossa jäähdytyksen energiakustannus on noin 1,7 € /m<sup>2</sup> (asunnonpinta-ala) ja uudiskerrostalossa noin 0,8 € /m<sup>2</sup>. Tällöin jäähdytyksen asuntokohtainen energiakustannus äärimmäisen kuuman hellevuoden aikana vaihtelee 70-luvun kerrostalossa noin 60 ja 200 € välillä ja uudiskerrostalossa noin 30 ja 80 € välillä.

Tilojen varustaminen aktiivisella jäähdytyksellä vaatii esimerkkikohteina olleissa vanhainkodeissa mittavia investointeja. Tilojen aktiivisen jäähdytyksen asentaminen 80-luvun vanhainkotiin on kuitenkin suhteellisen kustannustehokas yllämpenemisen torjuntaratkaisu, koska ratkaisu vähentää yllämpenemistä erittäin merkittävästi. Sen sijaan tilojen aktiivisella jäähdytyksellä saavutettava lisähyöty yllämpenemisen torjuntaan on ilmanvaihdon aktiivisella jäähdytyksellä varustetussa uudisvanhainkodissa melko pieni vaadittaviin investointikustannuksiin nähden, joten ratkaisu ei ole kustannustehokas siinä esimerkkikohteessa. Sen sijaan kerrostaloasuntojen ja pientalojen varustaminen ilmalämpöpumpulla on ilmanvaihdon 30 %:n tehostamisen jälkeen kustannustehokkain yllämpenemisen torjuntakeino, koska saavutettava hyöty on suuri ja investointikustannus suhteellisen pieni yksittäistä asuntoa kohti. Esimerkiksi jäähdyttävän ilmalämpöpumpun investointikustannus 80 m<sup>2</sup> asunnossa (3h+k) on tämän tutkimuksen tekoaikana tyypillisesti hieman yli 1 900 €. Vastaavasti jäähdyttävän ja lämmittävän ilmalämpöpumpun asentaminen pientaloon maksaa tyypillisesti noin 2 400 €.

## 8.2 Korkeiden lämpötilojen vaikutus terveyteen

Kesäajan korkeat lämpötilat ovat Suomessa terveysriski erityisesti ikääntyneille (yli 65-vuotiaille) ja pitkäaikaissairaille, ja helleaalloista koituu merkittävä määrä vakavia terveyshaittoja jo nykyilmastossa. Ajanjaksolla 1999–2018 helleaaltopäivistä aiheutui koko Manner-Suomen alueella vuosittain keskimäärin 108 enneaikaista kuolemaa ja 172 sairaalahoitojaksoa. Vaikutuksissa on kuitenkin paljon vuosikohtaista vaihtelua, ja kuumimpina kesinä terveyshaitat ovat huomattavasti keskimääräistä suurempia. Esimerkiksi kesän 2018 ennätysellisistä helteistä aiheutui arviolta 417 enneaikaista kuolemaa ja 704 sairaalan vuodeosastohoitojaksoa. Helleaaltojen terveysvaikutusten kokonaismäärä on selvästi suurin Uudellamaalla. Kun vaikutukset suhteutetaan ikääntyneiden määrään, maakuntien väliset erot terveyshaitoissa kuitenkin pienentyvät.

Tulevaisuudessa helteen vakavat terveyshaitat lisääntyvät huomattavasti, jos ilmaston lämpenemiseen ja väestön haavoittuvuuden lisääntymiseen ikääntymisen myötä ei varauduta ja sopeuduta. Ilmastonmuutoksen voimakkuutta kuvaavassa keskiskenaariossa SSP2-4.5, joka on tällä hetkellä todennäköisin näkymä tulevaisuuden olosuhteista, helle aiheuttaa kuolemia ja sairaalahoitojaksoja vuonna 2050 arviolta 3–4 kertaa nykyistä enemmän, jos sopeutumistoimia ei tehdä lankaan. Terveyshaittojen riskiä

lisää lähivuosikymmeninä voimakkaasti jo pelkästään väestön ikääntyminen. Vuosidadan loppua kohden haitat edelleen kasvavat. Tulevaisuuden vaikutuksiin liittyy kuitenkin huomattavan paljon epävarmuutta, sillä terveyshaittojen suuruuteen vaikuttavat ilmastomuutoksen hillinnän onnistumisen sekä suunnitelmallisen ja luonnostaan tapahtuvan sopeutumisen lisäksi myös aluekohtaiset muutokset väestön määrässä ja ikärakenteessa, terveydentilassa ja sairaanhoidossa, ympäristö- ja asuinolosuhteissa sekä muissa sosioekonomisissa tekijöissä.

Myös tulevaisuudessa terveyshaitat ovat kokonaismäärältään selvästi suurimpia Uudellamaalla. Ikääntyneiden määrään suhteutettuna vaikutukset saattavat kuitenkin olla yhtä suuria ja jopa suurempia monissa muissa maakunnissa. Terveyshaittojen ehkäisyyn ja ilmaston lämpenemiseen sopeutumiseen on siten tärkeää kiinnittää huomiota myös niissä maakunnissa, joissa helteet ovat nykyisin harvinaisempia. Riittävä varautuminen on tärkeää myös siksi, että poikkeuksellisen voimakkaiden ja terveydelle vaarallisten hellejaksojen mahdollisuus lisääntyy jatkuvasti koko Suomessa.

Asuntojen yllämpeneminen on keskeisin helteen terveyshaittojen ilmenemiseen vaikuttava tekijä, sillä ihmiset, ja erityisesti kuumuuden haitoille herkät väestöryhmät (ikäntyneet, pitkäaikaissairaat), viettävät valtaosan ajasta sisätiloissa myös kesäaikana. Arvioinnin perusteella asuntojen yllämpenemisen torjuntatoimien avulla voidaan ehkäistä merkittävä osuus helteen vakavista terveyshaitoista. Jos ilmalämpöpumppu asennettaisiin kaikkien ikääntyneiden asuntoihin, joista se nykyisin puuttuu, voitaisiin helteeseen liittyvistä kuolemista ehkäistä mahdollisesti jopa 55 % ja sairaalan vuodeosastohoitajakoista 95 %. Suurin vaikutus olisi kerrostaloasuntojen jäähdytyksellä, koska näistä vain pienessä osassa on nykyisin ilmalämpöpumppu.

Jo pelkästään passiivisten jäähdytyskeinojen (mm. rakennusten aurinkosuojaus, yöaikaisen tuuletuksen/ilmanvaihdon tehostaminen) avulla voidaan olennaisesti ehkäistä helteen terveyshaittoja. Passiivisia keinoja tulisi käyttää kaikissa rakennuksissa ja lisäksi ohjeistusta tarvitaan siitä, kuinka yllämpenemisen torjunta passiivisten ratkaisujen avulla otetaan aiempaa paremmin huomioon mahdollisimman aikaisessa vaiheessa rakennusten suunnittelua. Passiiviset ratkaisut eivät kuitenkaan useimmissa asunnoissa riitä estämään huoneilman yllämpenemistä pitkittyvän helteen aikana. Ikääntyneiden ja pitkäaikaissairaiden kohdalla helteestä aiheutuvan vakavan terveysriskin torjuminen on siten vaikeaa ilman aktiivista jäähdytystä.

Ikääntyneiden palvelutalojen jäähdytys ehkäisisi melko pienen osan vakavista haitoista, koska palvelutaloissa asuu vain pieni osa ikääntyneistä. Sosiaali- ja terveydenhuollon hoiva- ja hoitolaitokset tulisi kuitenkin pystyä tarvittaessa jäähdyttämään tehokkaasti, koska huoneitilojen yllämpenemisestä aiheutuu asukkaille ja potilaille merkittävä terveysriski, johon he eivät pysty juurikaan vaikuttamaan omalla toiminnallaan. Terveystalouden hoitolaitosten jäähdyttäminen on myös edellytys helteen vakavien



haittojen kattavalle ehkäisylle, koska suuri osa kuolemista tapahtuu erikoissairaanhoidon ja perusterveydenhuollon sairaaloiden vuodeosastoilla ja johtuu pitkälti vuodeosastojen olosuhteista (Kollanus & Lanki 2021).

Helteestä aiheutui sairaalahoitojaksoihin liittyviä suoria taloudellisia kustannuksia kesän 2018 ennätyksellisten helteiden seurauksena noin 2,85 miljoonaa euroa. Jos ilmalämpöpumppu asennettaisiin kaikkiin ikääntyneiden asuntoihin, joista se nykyisin puuttuu, terveydenhuollolle koituvat säästöt olisivat noin 2,70 miljoonaa euroa. Sairaalahoitoon liittyvät taloudelliset vaikutukset eivät siis ole mitättömiä, mutta kuitenkin vähäisiä suhteutettuna ilmalämpöpumppujen asentamiseen ja käyttöön liittyviin kokonaiskustannuksiin. Toisaalta asuntokohtaisesti tarkasteltuna omistajalle koituvat investointi- ja energiakustannukset ovat hyvin maltilliset ja terveysriskien pienenemisen lisäksi asuinviihtyvyys paranee merkittävästi. Nyt lasketut terveyshaittojen kustannukset ovat myös selkeästi aliarvio helteen terveyshaittojen todellisista yhteiskunnallisista kustannuksista, koska mm. enneaikaisiin kuolemiin, lievempiin sairastuvuusvaikutuksiin ja oireiluun, tapaturmiin, toimintakyvyn laskuun ja viihtyisyshaittoihin liittyviä kustannuksia ei voitu ottaa huomioon näiden arviointiin liittyvien suurien epävarmuuksien vuoksi.

Sopeutumiskeinojen vaikuttavuutta ja kustannuksia arvioitiin nykytilanteessa yhden hellekesän vaikutusten osalta. Tulevaisuudessa jäähdytyksen terveyshyödyt suurenevät nykyisestä huomattavasti, sillä helteiden voimistuessa ja pitkittyessä ja väestön haavoittuvuuden lisääntyessä rakennusten yllämpenemiseen liittyvät ongelmat ja terveysriskit tulevat lisääntymään merkittävästi. Ilmalämpöpumppujen valmistus, huolto ja käyttö kuluttavat energiaa, mikä uhkaa entisestään lisätä kasvihuonekaasujen päästöjä. Kesäkaudella huomattava osa jäähdytykseen kuluvasta energiasta on kuitenkin Suomessa käytännössä päästötöntä jo tällä hetkellä.

Tämän hankkeen tavoitteena oli tarkastella helteen vakavien terveyshaittojen suuruusluokkaa ja niistä koituvia kustannuksia. Vakavat haitat kohdistuvat pääasiassa ikääntyneeseen väestöön, joten arvioinnissa keskityttiin vain tähän ikäryhmään. On kuitenkin syytä huomioida, että rakennusten yllämpenemisestä aiheutuu haittoja terveydelle, hyvinvoinnille ja työteholle myös nuoremmassa väestössä, ja näidenkin ehkäisy on tärkeää jo nykyilmastossa ja yhä enenevässä määrin tulevaisuudessa.

## 8.3 Ilmanvaihtojärjestelmien mitoituksen resilienssi hengitystieinfektiota vastaan

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että ilmanvaihdon hyvää mitoituskäytäntöä edustavien referenssikohteiden ilmavirrat olivat opetustiloissa ja kuntosalissa riittäviä hengitystieinfektoriskin hallintaan. Muissa tiloissa ilmavirrat olivat riittäviä vähennetyn henkilömäärän tapauksessa. Esim. tutkitussa avotoimistossa noin 20 %:a pienempi henkilömäärä voidaan nähdä järkevänä ratkaisuna epidemiatilanteessa, eli sen takia suurempaa ilmanvaihtoa ei välttämättä kannata mitoittaa. Näin tavanomaisissa opetus- ja toimistotiloissa tarvitaan S1 luokan lähellä oleva tai joissakin tapauksissa sitä kohtuullisissa määrin ylittävä mitoitus.

Henkilömäärän rajoittamisen lisäksi huonekohtaiset ilmanpuhdistimet ovat laskennallisesti ja tutkitusti tehokas tapa alentaa viruspitoisuuksia ja -tartuntoja. Ilmanpuhdistimilla ei voida korvata, mutta voidaan tehostaa olemassa olevaa ilmanvaihtoa. Niiden soveltuvuus käytettäväksi epidemiatilanteessa on kuitenkin tapauskohtaista, koska sijoittaminen keskeisille paikoille voi olla vaikeata esim. muutenkin ahtaissa luokkahuoneissa. Esim. neuvottelu huoneissa, kuntosaleissa ja avotoimistoissa sijoittaminen voi olla helpompaa ja tarjota käypään ratkaisun epidemiatilanteen infektoriskin hallintaan.

Toteutetut ilmamäärätarkastelut osoittivat, että ympäristöministeriön asetuksen mukaiset ilmavirrat olivat huomattavan alhaisia verrattuna Sisäilmastoluokituksen ja kohteiden ilmavirtoihin. Tartuntapohjaisen mitoituksen ilmavirrat olivat epidemianaikainen vähennetty henkilömäärä huomioon ottaen lähellä tai eivät olennaisesti ylittäneet S1-luokan arvoja. Näin on selvä tarve korottaa asetuksen ilmavirtoja hyvän sisäilmaston laatua vastaavaksi, jolloin tartuntapohjaisen mitoituksen käyttöön ottaminen aistinvaraisen ilman laadun menetelmän rinnalle ei tulisi olennaisesti kasvattamaan mitoitusilmavirtoja.

Tartuntapohjaisessa ilmanvaihdon mitoituksessa on olennainen merkitys ilmanvaihdon tehokkuudella, jolle nykyinen oletus täydellisestä sekoittumisesta ei päde koska tartuntatilanteessa epäpuhtauslähde ei ole tasaisesti jakaantunut vaan on pistemäinen. Pistemäisen lähteen epäpuhtauksien poistotehokkuuden suoritusarvoista ei juurikaan tällä hetkellä löydy tietoja. Tartuntapohjaisen mitoituksen käyttöönotto edellyttää siten teknisen ohjeistuksen kehittämistä, jossa kuvattaisiin epäpuhtauksien poistotehokkuuden mittausta ja annettaisiin ohjeita tyypillisten ilmajakoratkaisujen toiminnasta.

- Opetustiloissa tilan koon kasvattaminen ja henkilötiheyden pienentäminen eivät juurikaan vaikuttaneet taudinaiheuttajien leviämiseen, vaan yhdistetyssä luokkatilassa epäpuhtaudet jäivät pääosin siihen moduliin, jossa sairas oppilas oli.
- Avotoimistossa ilmanpuhdistimilla pystyttiin merkittävästi rajoittamaan taudinaiheuttajien leviämistä, vaikka ne oli mitoitettu selvästi yleistä ohjeistusta pienemmiksi.
- Kuntosalissa taudinaiheuttajat eivät merkittävästi levinneet ihmisten ollessa paikallaan, mutta liikuntasuoritteita tehtäessä pitoisuudet kohosivat käytännössä joka puolella
- Kaikista tiloista voidaan yhteisesti todeta, että tehokkain keino ehkäistä taudinaiheuttajien leviämistä on sijoittaa sairas henkilö poistopisteen välittömään läheisyyteen. Käytännössä tämä on kuitenkin mahdollista ainoastaan sellaisissa tiloissa, joissa tiedetään kuka on sairas (esim. terveydenhoidon asiointipisteet).

## 8.4 Infektioriskin vähentämisen merkitys terveydelle

Ihmiskunta on taistellut viruksia vastaan aikojen alusta, mutta erityisesti populaation kasvaessa ja elintilamme siirryttyä yhä enemmän sisätiloihin, on taudinaiheuttajien torjunnalla kasvava merkitys sekä yksilön että yhteiskunnan kannalta. Tutkimusten perusteella tiedetään, että sisätilojen ilmanvaihdolla on merkitystä ilmavälitteisten virusten leviämisessä, etenkin silloin kun sisätiloissa on useita käyttäjiä.

Huonosti toimivalla ilmanvaihdolla voidaan edistää ilmavälitteisten taudinaiheuttajien leviämistä, mutta ilmanvaihdon avulla ei voida täysin leviämistä estää, vaan lisäksi tarvitaan muitakin keinoja, kuten esimerkiksi henkilömäärän rajoituksia, kasvomaskeja ja turvaetäisyyksiä. Kuten edellä on kuvattu, ilmanpuhdistimen oikealla sijoittelulla sekä ihmismäärän vähentämisellä saatiin viruksen leviämistä vähennettyä tietyissä tiloissa. Tällaiset ulkoiset rajoitus- ja parannustoimenpiteet voivat ehkäistä leviämistä hyvin, mutta täysin ei näilläkään saada leviämistä estettyä. Tutkimuksen kuntosalilla ilmanvaihdolla saatiin riittävä teho silloin kun tilassa ei liikuttu, mutta koska liikuntaan sisältyy syventynyt hengitys, jolloin virusta levitetään tehokkaammin, poistui vaikutus liikkumisen myötä. Aiemmin jo tiedetään, että esimerkiksi laulaminen ja huutaminen tehostavat virusten leviämistä suuremmalle alueelle sairastuneen lähistölle. Pisaroitten ja aerosolien tutkiminen ei suoraan kerro niissä siirtyvien virusten määrää, vaan

ihmisten välillä on eroa siinä, miten paljon viruksia erittyi ympäristöön. Ihmisten henkilökohtaisiin tai immuunipuolustukseen liittyviin ominaisuuksiin pystytään osin vaikuttamaan lääketieteen keinoin, mutta ympäristötekijöillä voidaan vähentää viruksen leviämistä ja tarttumista.

Viruksia on monenlaisia ja niiden optimaaliset lisääntymis- ja leviämisolosuhteet vaihtelevat. Tämän vuoksi esimerkiksi yhtä yksittäistä ilmankosteuspitoisuusarvoa, jolla kaikkien virusten leviäminen ehkäistäisiin ei voida arvioida, vaan epidemiatilanteissa tulisi keskittyä tietyn viruksen ominaisuuksiin ja antaa väliaikaiset ohjeistukset sen mukaan. Tämän lisäksi viruksen leviämiseen vaikuttaa tilassa oleskelevien ihmisten yksilölliset ominaisuudet. Koronapandemian aikana esimerkiksi todettiin, että jotkut yksilöt levittävät virusta erittäin tehokkaasti suojaustoimenpiteistä huolimatta, kun taas toiset eivät tartuttaneet sitä juurikaan eteenpäin. Lisäksi jotkut vaativat suuremman virusaltistuksen, jotta tauti tarttuisi ja toiset taas sairastuivat pienestäkin altistuksesta. Nykyisillä tiedoilla voidaan kuitenkin arvioida keskimääräisesti sitä, millaisilla ilmanvaihdon toimenpiteillä voidaan osa tartunnoista estää, tai ainakin lopettaa tartuntojen edistäminen.

Ilmavälitteisten infektioiden ehkäiseminen kaikin mahdollisin tavoin on kannattavaa sekä yksilön terveyden että yhteiskunnan kannalta. Hengitystieinfektiot ovat yleisin lyhyen poissaolon syy Suomessa ja ne aiheuttavat siten sekä työnantajille että yhteiskunnalle kustannuksia lisääntyneinä terveydenhuollon menoina, suurentuneena kuolleisuutena sekä sairauspoissaoloina. Influenssavirus aiheuttaa vuosittain n. 120 miljoonan euron lisäkustannukset, mutta kausittainen vaihtelu on suurta. Koronapandemian kokonaiskustannuksiksi on arvioitu n. 5–6 miljardia euroa vuonna 2020 ja sen on ajateltu olevan myös yksi suuri vaikuttava tekijä Suomen ylikuolleisuudessa, joka v. 2021 oli n. 3 100 ylimääräistä kuolemaa. Tämä on yksi länsimaiden suurimpia ylikuolleisuusarvoja.

Tarkastelemalla influenssaviruksen esiintyvyyttä sekä tavanomaisina epidemioina että koronapandemioina vuonna 2020–2021, voitiin todeta, että järeillä virusinfektion torjuntamenetelmillä, joita oli käytössä koronan vuoksi, ehkäistiin käytännössä kokonaan influenssaepidemia. Tämä näyttää meille viitteitä siitä, että tehokas viruksen torjunta on mahdollista ja ainakin osa jokavuotisesta 120 miljoonan ylimääräisestä influenssan hoitoon valuvasta rahasta voitaisiin epidemioita ehkäisemällä ohjata muihin tarkoituksiin. Liialliset rajoitustoimenpiteet voivat kuitenkin luoda esimerkiksi ylikuolleisuutta kuten koronapandemian tapauksessa, joten ilmanvaihdon asianmukaisuudella voidaan mahdollisesti kevyemmällä toimilla vähentää virustartuntojen leviämistä ja epidemioiden puhkeamista.

## 8.5 Suosituksia

Suomessa tulisi varautua helteen terveyshaittoihin nykyistä paremmin. Varautuminen on tarpeen jo nykyilmastossa ja tarve edelleen kasvaa tulevaisuudessa väestön ikääntyessä ja kesien lämmitessä ilmastonmuutoksen myötä. Keskeistä varautumisessa on torjua rakennusten huoneilman kesäaikaista yllämpenemistä. Vakavien terveyshaittojen ehkäisy edellyttää yllämpenemisen torjuntaa sekä asunnoissa että sosiaali- ja terveydenhuollon hoiva- ja hoitolaitoksissa. Kaikissa rakennuksissa tulisi hyödyntää passiivisia jäähdytyskeinoja huoneilman yllämpenemisen torjunnassa. Passiiviset keinot eivät kuitenkaan riitä pitkittyvän helteen aikana, jolloin ainoa keino ehkäistä kansanterveydellisesti merkittäviä vakavia terveyshaittoja on suojata haavoittuvia väestöryhmiä aktiivisen jäähdytyksen avulla. Kaikissa sosiaali- ja terveydenhuollon hoiva- ja hoitolaitoksissa tulisi olla mahdollisuus huonetilojen aktiiviseen jäähdytykseen. Yksityisten asuntojen osalta aktiivista jäähdytystä tulisi lisätä ennen kaikkea ikääntyneiden ja pitkäaikaissairauksista kärsivien kodeissa. Passiivisia jäähdytyskeinoja on tärkeää hyödyntää myös aktiivista jäähdytystä käytettäessä. Jäähdytys on tultu toteuttaa energiatehokkaasti, eikä aktiivisella jäähdytyksellä tule laskea huonelämpötilaa liian alas, jotta rakenteisiin ja pintoihin ei muodostu kondenssia.

Suomessa on tarpeen varautua tuleviin mahdollisiin, jopa todennäköisiin, uusiin ilmapölyisiin infektioiden aiheuttajiin. Keinot estää ilmapölyisten virus- ja bakteeritautien tarttuminen on tärkeää arvioida, lisätä näiden keinojen tutkimusta ja tutkimuksen rahoitusta kansallisesti. Koska tällaiset infektiot aiheuttavat niin yksilön kuin yhteiskunnan kannalta erittäin merkittäviä haittoja, on jokainen ehkäisty tautitapaus tärkeä ja myös kustannusvaikuttava. Ilmanvaihdon tehostaminen, oikea kohdentaminen ja muiden tartuntaa ehkäisevien suojakeinojen käyttö on tekemiemme selvitysten mukaan hyödyllistä.

## 8.6 Jatkotutkimustarpeet

Päätöksenteon tueksi tarvitaan lisää tutkimustietoa huoneilman lämpötilan yhteydestä terveyshaittoihin erityisesti ikäihmisillä sekä siitä, kuinka iäkkäiden ja sairaiden ihmisten kokema lämpöviihtyvyys poikkeaa terveiden aikuisten kokemasta lämpöviihtyvyydestä ja miten lämpöviihtyvyys on yhteydessä terveysvaikutuksiin. Lisäksi jatkotutkimuksissa tulisi pyrkiä huomioimaan myös kuolemia ja sairaalakäyntejä lievemmat vaikutukset kuten toimintakyvyn aleneminen ja lisääntynyt avohoidon tarve, joilla on osaltaan merkittävä vaikutus hyvinvointiin.

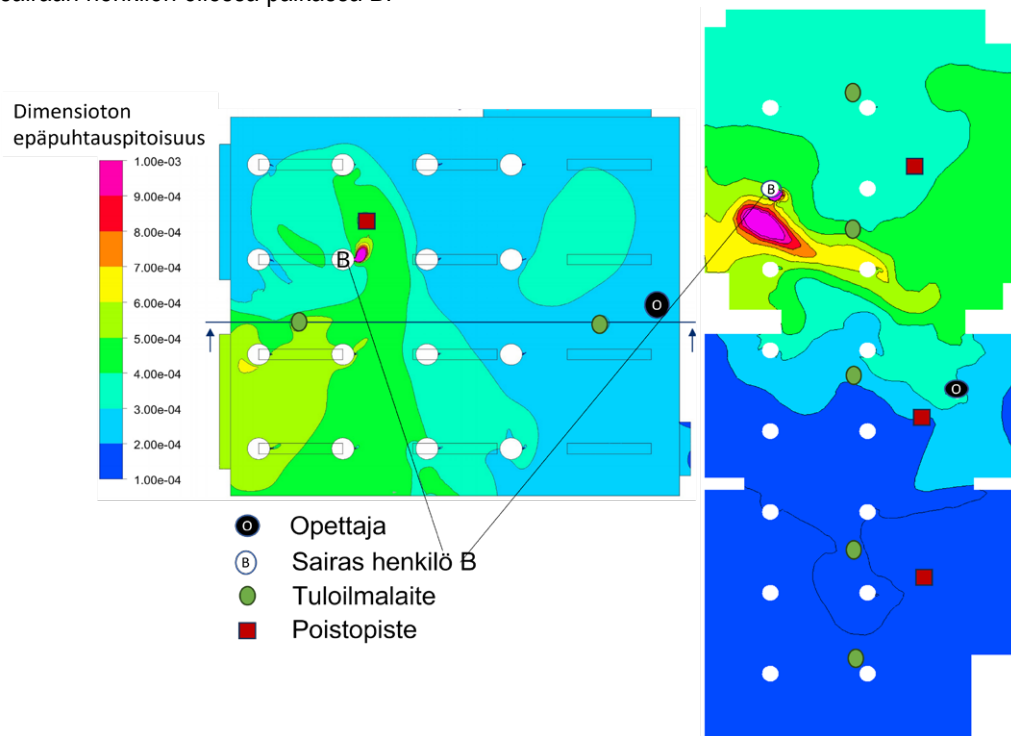
Virusinfektioiden tartuntamekanismeissa ja altistumistilanteeseen liittyvissä muuttujissa on selkeä jatkotutkimustarve. Koronapandemia on lisännyt voimakkaasti tähän

liittyvää tutkimusta, mutta edelleen tarvitaan myös muihin merkittäviin ilmapölyihin virus- ja bakteeritauteihin liittyvää tutkimusta. Suomessa olisi tarpeen tutkia ilmapölyisten infektioiden kustannusvaikuttavuutta ja vaikutusta QALY:hin (quality-adjusted life year) ja DALY:hin (disability-adjusted life years) sekä kuolleisuuteen.

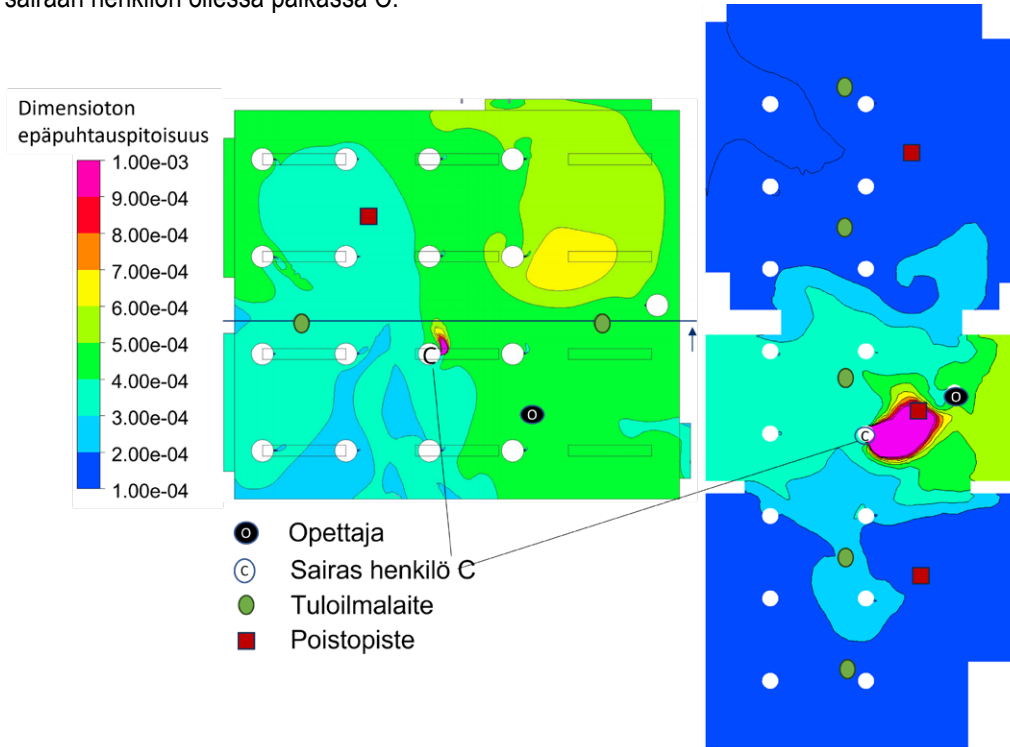
## Liitteet

### Liite 1: Opetustilojen CFD-mallinnustuloksia

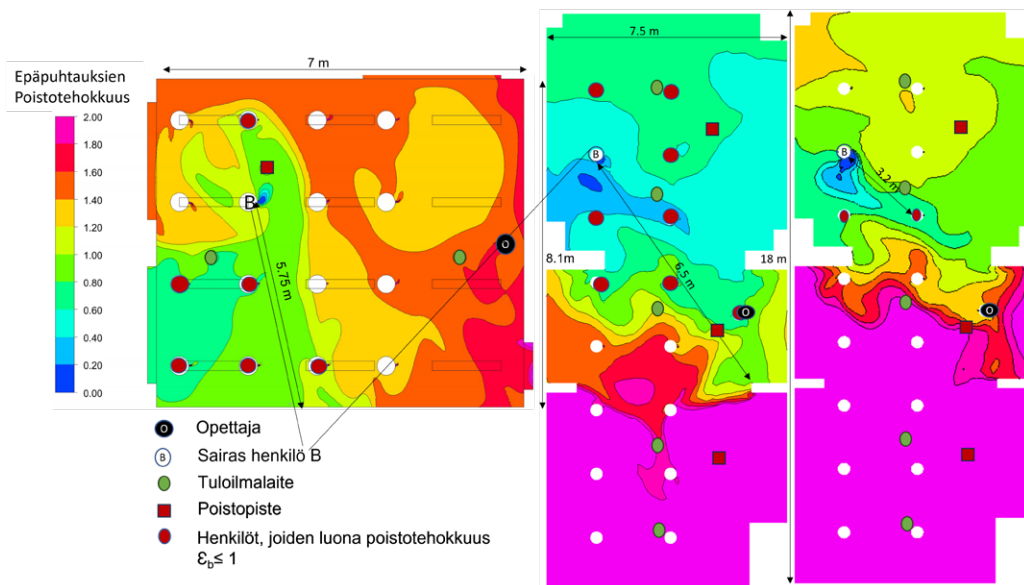
**Liite 1 kuva 1.** Dimensioton epäpuhtauspitoisuus pienessä ja yhdistetyssä opetustilassa sairaan henkilön ollessa paikassa B.



**Liite 1 kuva 2.** Dimensioton epäpuhtauspitoisuus pienessä ja yhdistetyssä opetustilassa sairaan henkilön ollessa paikassa C.

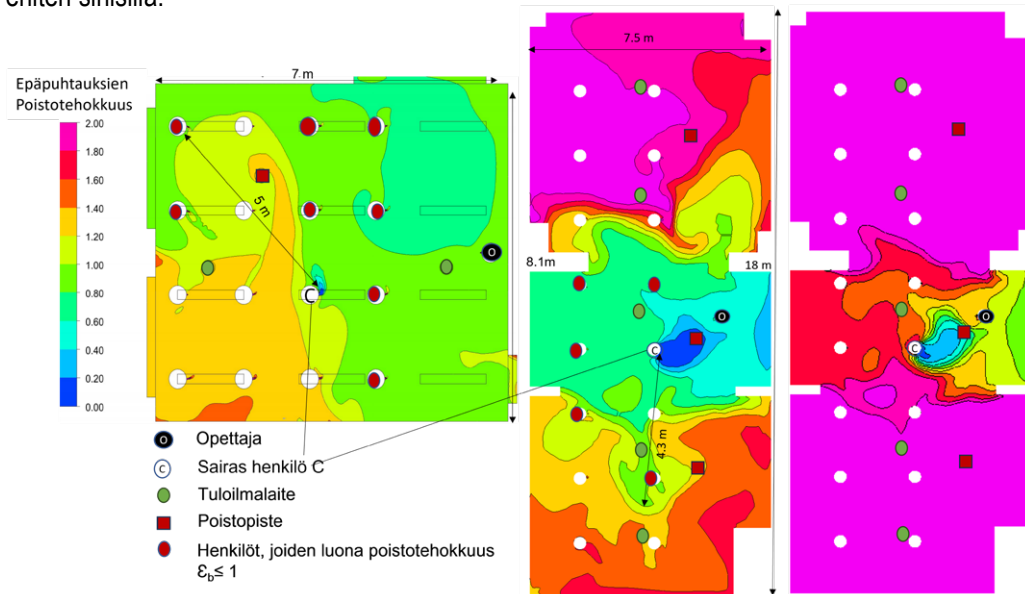


**Liite 1 kuva 3.** Epäpuhtauksien poistotehokkuus pienessä ja yhdistetyssä opetustilassa sairaan henkilön ollessa paikassa B. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



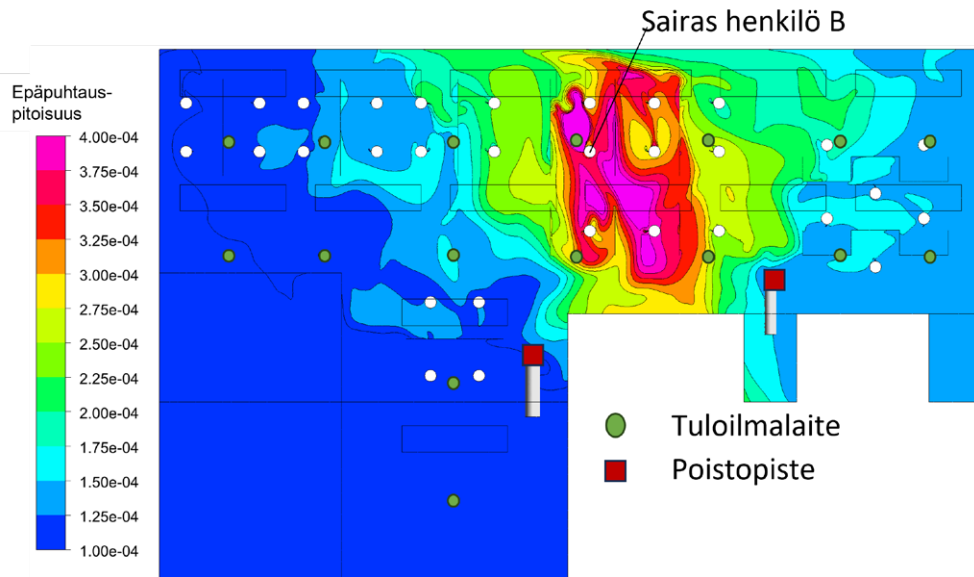


**Liite 1 kuva 4.** Epäpuhtauksien poistotehokkuus pienessä ja yhdistetyssä opetustilassa sairaan henkilön ollessa paikassa C. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.

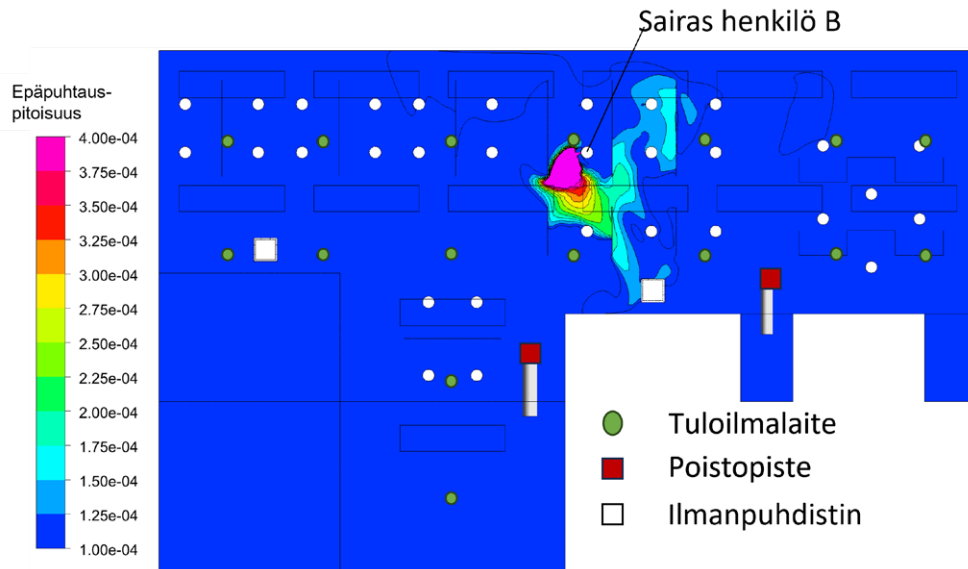


## Liite 2: Avotoimiston CFD-mallinnustuloksia

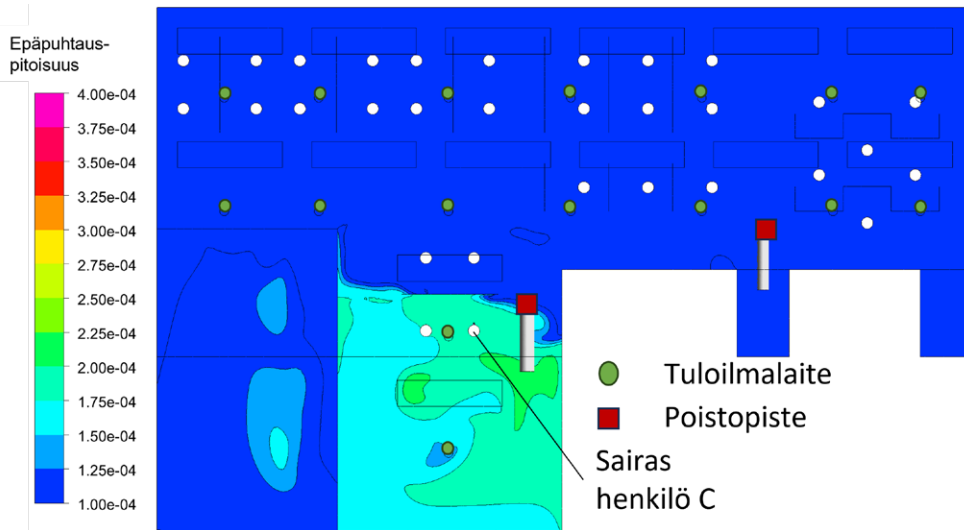
**Liite 2 kuva 1.** Epäpuhtauspitoisuus avotoimistossa perusilmanvaihhdolla sairaan henkilön ollessa paikassa B.



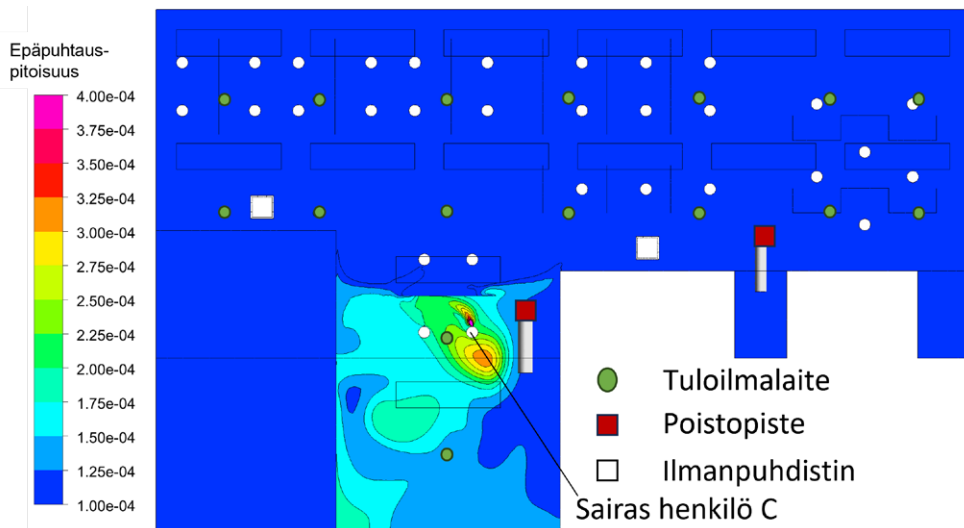
**Liite 2 kuva 2.** Epäpuhtauspitoisuus avotoimistossa ilmanpuhdistimien kanssa sairaan henkilön ollessa paikassa B.



**Liite 2 kuva 3.** Epäpuhtauspitoisuus avotoimistossa perusilmanvaihhdolla sairaan henkilön ollessa paikassa C.

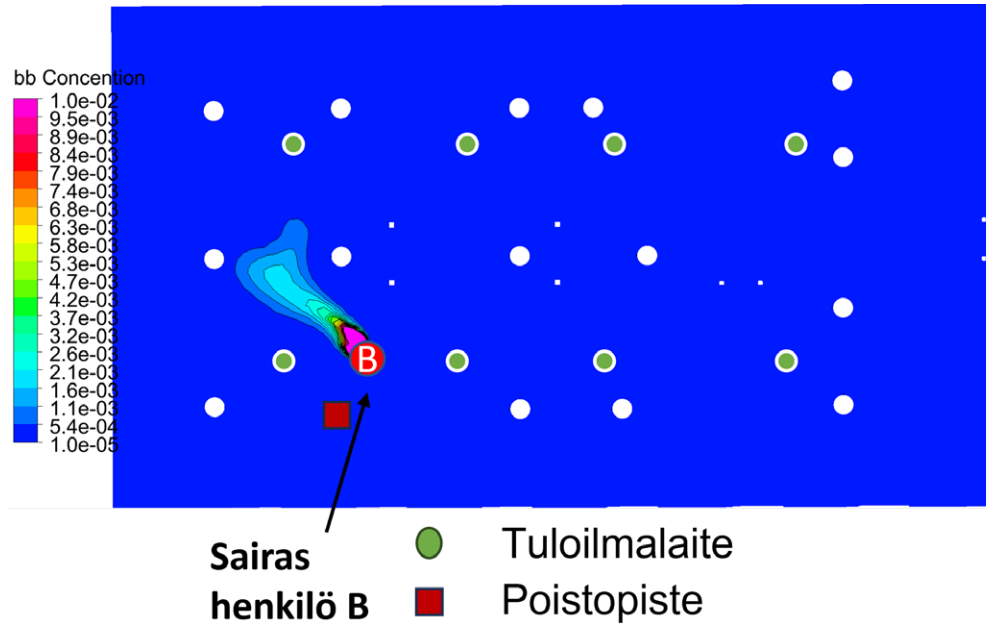


**Liite 2 kuva 4.** Epäpuhtauspitoisuus avotoimistossa ilmanpuhdistimien kanssa sairaan henkilön ollessa paikassa C.

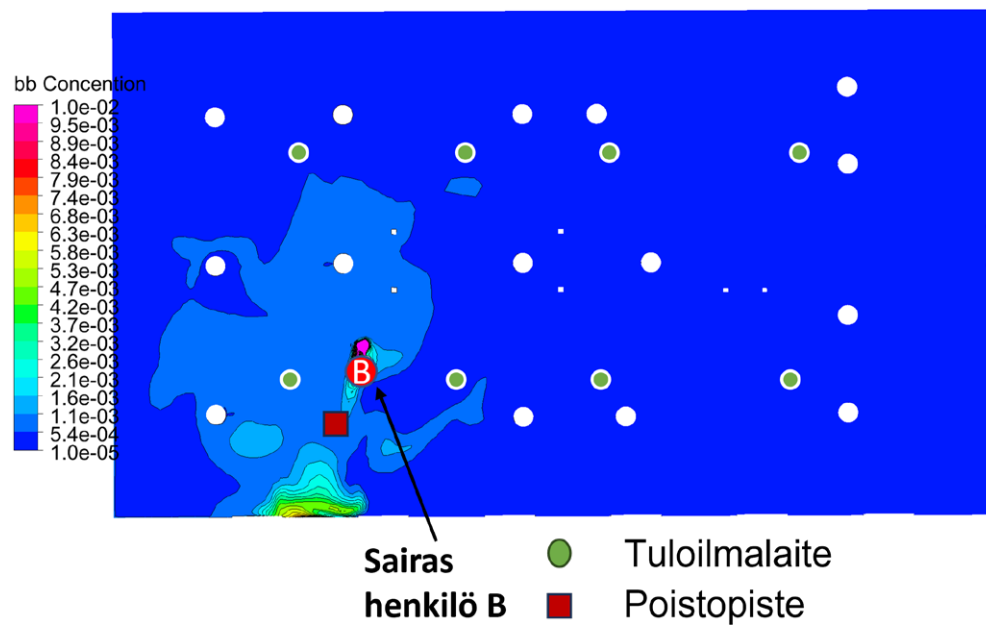


### Liite 3: Kuntosalin CFD-mallinnustuloksia

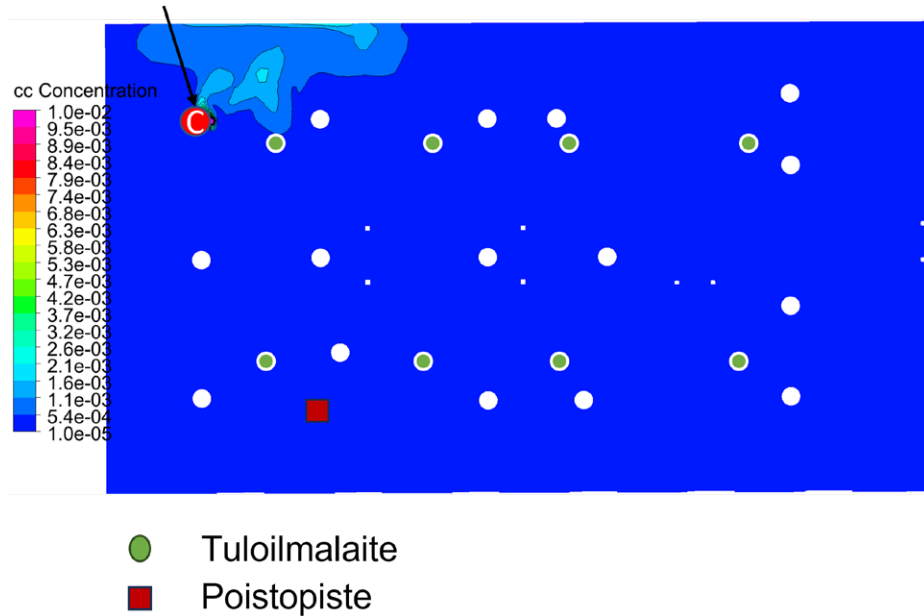
**Liite 3 kuva 1.** Epäpuhtauspitoisuus kuntosalissa ihmisten ollessa paikallaan ja sairaan henkilön ollessa paikassa B.



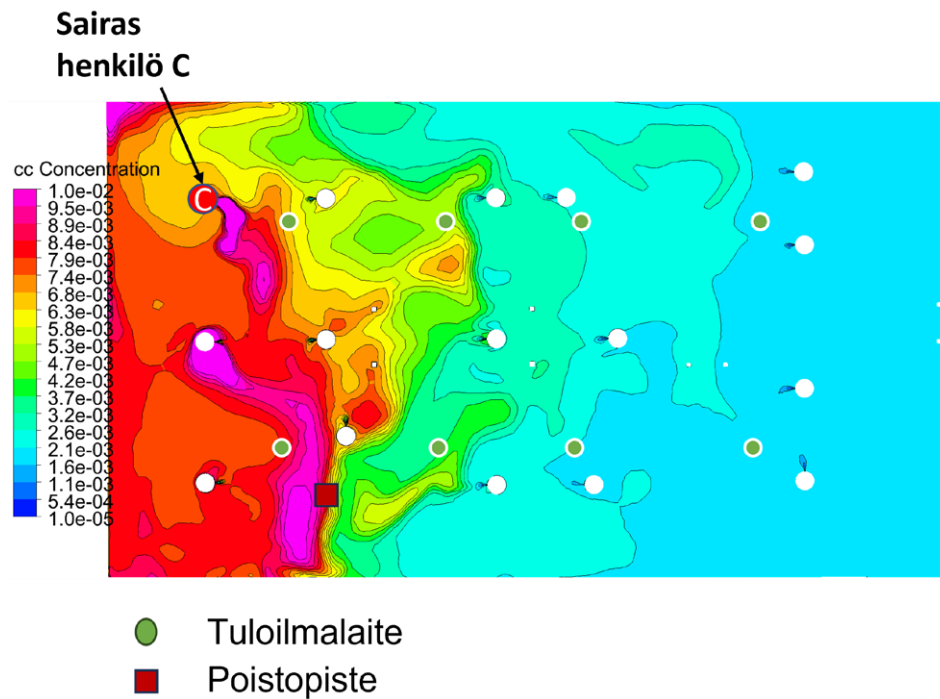
**Liite 3 kuva 2.** Epäpuhtauspitoisuus kuntosalissa ihmisten tehdessä liikuntasuorituksia ja sairaan henkilön ollessa paikassa B.



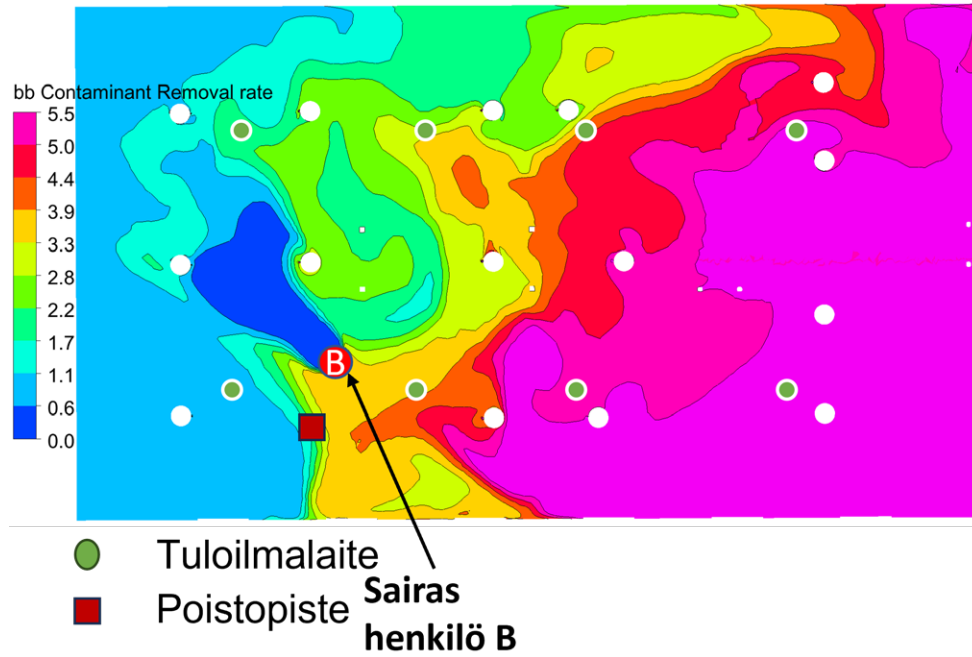
**Liite 3 kuva 3.** Epäpuhtauspitoisuus kuntosalissa ihmisten ollessa paikallaan ja sairaan henkilön ollessa paikassa C.



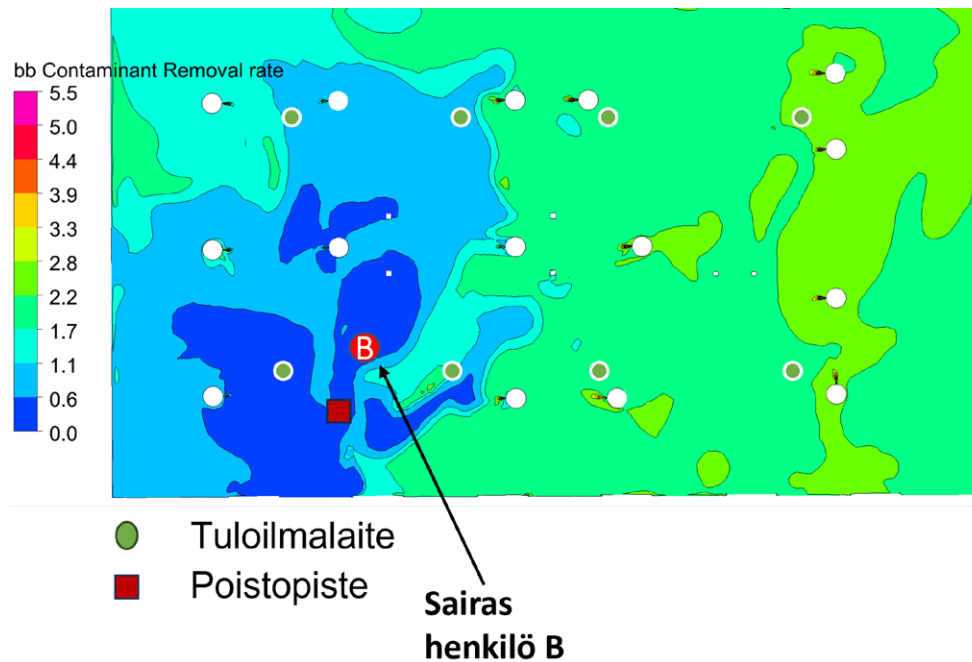
**Liite 3 kuva 4.** Epäpuhtauspitoisuus kuntosalissa ihmisten tehdessä liikuntasuorituksia ja sairaan henkilön ollessa paikassa C.



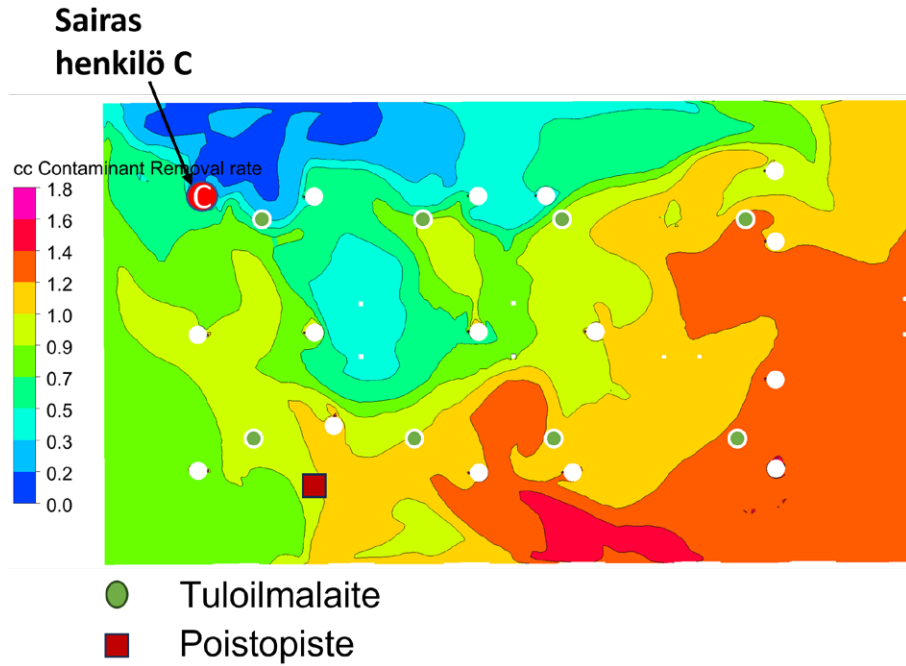
**Liite 3 kuva 5.** Epäpuhtauksien poistotehokkuus kuntosalissa ihmisten ollessa paikallaan ja sairaan henkilön ollessa paikassa B. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



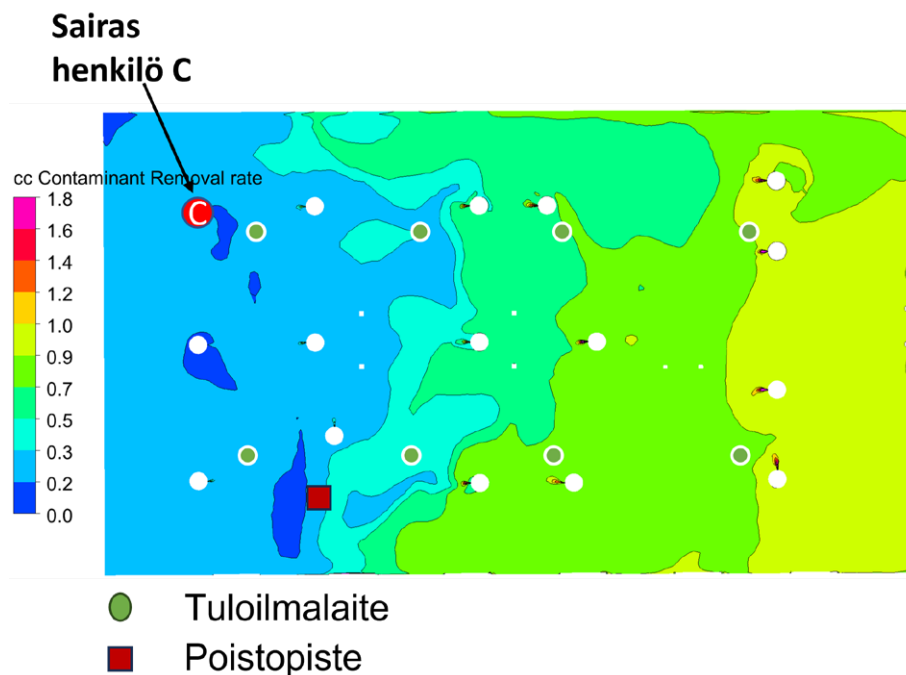
**Liite 3 kuva 6.** Epäpuhtauksien poistotehokkuus kuntosalissa ihmisten tehdessä liikuntasuorituksia ja sairaan henkilön ollessa paikassa B. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



**Liite 3 kuva 7.** Epäpuhtauksien poistotehokkuus kuntosalissa ihmisten ollessa paikallaan ja sairaan henkilön ollessa paikassa C. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



**Liite 3 kuva 8.** Epäpuhtauksien poistotehokkuus kuntosalissa ihmisten tehdessä liikuntasuorituksia ja sairaan henkilön ollessa paikassa C. Epäpuhtauksia on vähiten punaisen sävyisillä alueilla ja eniten sinisillä.



## Lähteet

Abdulrahman, A., Mallah, S.I., Alqahtani, M. (2021). COVID-19 viral load not associated with disease severity: findings from a retrospective cohort study. *BMC Infect Dis* 21, 688.

Ai, Z. T., Melikov, A. K. (2018). Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review. *Indoor Air*, 28(4), 500–524.  
<https://doi.org/10.1111/INA.12465>

Alford, R. H., Kasel, J. A., Gerone, P. J., & Knight, V. (1966). Human influenza resulting from aerosol inhalation. *Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine*. Society for Experimental Biology and Medicine (New York, N.Y.), 122(3), 800–804. <https://doi.org/10.3181/00379727-122-31255>

Aliabadi, A. A., Rogak, S. N., Bartlett, K. H., & Green, S. I. (2011). Preventing Airborne Disease Transmission: Review of Methods for Ventilation Design in Health Care Facilities. *Advances in Preventive Medicine*, 2011, 1–21.  
<https://doi.org/10.4061/2011/124064>

Aykac, K, Cura Yayla, BC, Ozsurekci, Y. (2021). The association of viral load and disease severity in children with COVID-19. *J Med Virol*, 93, 3077– 3083.

Bian JR, Nie W, Zang YS, Fang Z, Xiu QY, Xu XX. (2014). Clinical aspects and cytokine response in adults with seasonal influenza infection. *Int J Clin Exp Med*. 2014, 7(12), 5593-602.

Bischoff WE, Swett K, Leng I, Peters TR. (2013). Exposure to influenza virus aerosols during routine patient care. *J Infect Dis*, 207(7), 1037-46. doi: 10.1093/infdis/jis773.

Brown SJ. Future changes in heatwave severity, duration, and frequency due to climate change for the most populous cities. *Weather Clim Extrem* [Internet]. 2020;30(March):100278. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100278>

Buonanno, G., Morawska, L., & Stabile, L. (2020). Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: Prospective and retrospective applications. *Environment International*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106112>



Buonanno, G., Stabile, L., & Morawska, L. (2020). Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International*, 141. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2020.105794>

Buonanno G, Ricolfi L, Morawska L and Stabile L (2022) Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region. *Front. Public Health* 10:1087087. doi: 10.3389/fpubh.2022.1087087

Carrat F, Vergu E, Ferguson NM, Lemaître M, Cauchemez S, Leach S, Valleron AJ. (2008). Time lines of infection and disease in human influenza: a review of volunteer challenge studies. *Am J Epidemiol*, 167(7), 775-85. doi: 10.1093/aje/kwm375.

CDC 2021 Efficacy of Portable Air Cleaners and Masking for Reducing Indoor Exposure to Simulated Exhaled SARS-CoV-2 Aerosols — United States, 2021 CDC. <https://www.cdc.gov/mmwr/volumes/70/wr/mm7027e1.htm>

Cevik, M., Tate, M., Lloyd, O., Maraolo, A. E., Schafers, J., & Ho, A. (2021). SARS-CoV-2, SARS-CoV, and MERS-CoV viral load dynamics, duration of viral shedding, and infectiousness: a systematic review and meta-analysis. *The Lancet. Microbe*, 2(1), e13–e22. [https://doi.org/10.1016/S2666-5247\(20\)30172-5](https://doi.org/10.1016/S2666-5247(20)30172-5)

Cowling, B. J., Li, F., Leung, G. M., He, X., Lau, E. H. Y., Wu, P., Deng, X., Wang, J., Hao, X., Lau, Y. C., Wong, J. Y., Guan, Y., Tan, X., Mo, X., Chen, Y., Liao, B., Chen, W., Hu, F., Zhang, Q., ... Leung, G. M. (2020). Brief Communication Temporal dynamics in viral shedding and transmissibility of COVID-19. *Nat. Med*, 26, 672–675. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0869-5>

Curtius J, Granzin M & Schrod J (2021) Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2, *Aerosol Science and Technology*, 55:5, 586-599, <https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1877257>

Dadras O, Afsahi AM, Pashaei Z, Mojdeganlou H, Karimi A, Habibi P, Barzegary A, Fakhfour A, Mirzapour P, Janfaza N, Dehghani S, Afroughi F, Dashti M, Khodaei S, Mehraeen E, Voltarelli F, Sabatier JM, SeyedAlinaghi S. (2022). The relationship between COVID-19 viral load and disease severity: A systematic review. *Immun Inflamm Dis*, 10(3), e580. doi: 10.1002/iid3.580.

Douglas, R. (1975). Influenza in man. In Kilbourne ED (Ed.), *The influenza viruses and influenza* (pp. 375–447). Academic Press.

Duchamp MB, Casalegno JS, Gillet Y, Frobert E, Bernard E, Escuret V, Billaud G, Valette M, Javouhey E, Lina B, Floret D, Morfin F. (2010). Pandemic A(H1N1)2009 influenza virus detection by real time RT-PCR: is viral quantification useful? *Clin Microbiol Infect*, 16(4), 317-21. doi: 10.1111/j.1469-0691.2010.03169.x.

Duguid, J. (1945). The numbers and the sites of origin of the droplets expelled during expiratory activities. *Edinburgh Medical Journal*, 11(52), 385–401.

Energiateollisuus ry, 2023. Kaukolämmön hintatilasto. Saatavissa: [https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolammon\\_hintatilasto.html#material-view](https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/kaukolammon_hintatilasto.html#material-view) (viitattu 13.6.2023)

Farahani AV, Jokisalo J, Korhonen N, Jylhä K, Ruosteenoja K, Kosonen R. 2021a. Overheating Risk and Energy Demand of Nordic Old and New Apartment Buildings during Average and Extreme Weather Conditions under a Changing Climate. *Applied Sciences*. 11. 3972.

Farahani AV, Jokisalo J, Korhonen N, Kosonen R. 2021b. Indoor temperature conditions and energy demand of a Finnish detached house in a changing climate. *Proceedings of Cold Climate Conference 2021*.

Farahani AV, Jokisalo J, Korhonen N, Jylhä K, Kosonen R, Lestinen S. Performance assessment of ventilative and radiant cooling systems in office buildings during extreme weather conditions under a changing climate. *Journal of Building Engineering*. 57. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104951>

FINVAC. 2019. Opas asuinrakennusten ilmanvaihdon mitoitukseen. Saatavissa: [https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas\\_asuinrakennusten\\_ilmanvaihdon\\_mitoitukseen\\_2019.pdf](https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas_asuinrakennusten_ilmanvaihdon_mitoitukseen_2019.pdf), (viitattu 10.6.2023)

FINVAC. 2020. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. Saatavissa: [https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas\\_ilmanvaihdon\\_mitoitukseen\\_muissa\\_kuin\\_asuinrakennuksissa\\_2019b.pdf](https://finvac.org/wp-content/uploads/2020/06/Opas_ilmanvaihdon_mitoitukseen_muissa_kuin_asuinrakennuksissa_2019b.pdf), (viitattu 10.6.2023)

Franz A, Adams O, Willems R, Bonzel L, Neuhausen N, Schweizer-Krantz S, Ruggerberg JU, Willers R, Henrich B, Schrotten H, Tenenbaum T. (2010). Correlation of viral load of respiratory pathogens and co-infections with disease severity in children hospitalized for lower respiratory tract infection. *J Clin Virol*, 48(4), 239-45. doi: 10.1016/j.jcv.2010.05.007.

- Goyal, A., Reeves, D. B., Fabian Cardozo-Ojeda, E., Schiffer, J. T., & Mayer, B. T. (2021). Viral load and contact heterogeneity predict SARS-CoV-2 transmission and super-spreading events. *ELife*, 10, 1–63. <https://doi.org/10.7554/ELIFE.63537>
- Geiss, O. Effect of Wearing Face Masks on the Carbon Dioxide Concentration in the Breathing Zone. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020  
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.07.0403>
- Granados A, Peci A, McGeer A, Gubbay JB. (2017). Influenza and rhinovirus viral load and disease severity in upper respiratory tract infections. *J Clin Virol*, 86,14-19. doi: 10.1016/j.jcv.2016.11.008.
- Haahtela Y, Kiiras J. 2015. Talonrakennuksen kustannustieto. Haahtela-kehitys oy.
- Hagau N, Slavcovici A, Gongnanau DN, Oltean S, Dirzu DS, Brezozski ES, Maxim M, Ciuce C, Mlesnite M, Gavrus RL, Laslo C, Hagau R, Petrescu M, Studnicska DM. (2010). Clinical aspects and cytokine response in severe H1N1 influenza A virus infection. *Crit Care*, 14(6), R203. doi: 10.1186/cc9324.
- Heald-Sargent, T., Muller, W. J., Zheng, X., Rippe, J., Patel, A. B., & Kociolek, L. K. (2020). Age-Related Differences in Nasopharyngeal Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) Levels in Patients With Mild to Moderate Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *JAMA Pediatrics*, 174(9), 902–903.  
<https://doi.org/10.1001/JAMAPEDIATRICS.2020.3651>
- Hijano DR, Brazelton de Cardenas J, Maron G, Garner CD, Ferrolino JA, Dallas RH, Gu Z, Hayden RT. (2019) Clinical correlation of influenza and respiratory syncytial virus load measured by digital PCR. *PLoS One*, 14(9), e0220908. doi: 10.1371/journal.pone.0220908.
- Holmgren, H., Ljungström, E., Almstrand, A.-C., Bake, B., & Olin, A.-C. (2010). Size distribution of exhaled particles in the range from 0.01 to 2.0µm. *Journal of Aerosol Science*, 41(5), 439–446. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.02.011>
- Ilmatieteen laitos. Helletilastot. 2023. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/helletilastot> (viitattu 21.8.2023)
- Ip DK, Lau LL, Leung NH, Fang VJ, Chan KH, Chu DK, Leung GM, Peiris JS, Uyeki TM, Cowling BJ. (2017) Viral Shedding and Transmission Potential of Asymptomatic and Paucisymptomatic Influenza Virus Infections in the Community. *Clin Infect Dis*, 64(6), 736-742. doi: 10.1093/cid/ciw841.

Jacot, D., Greub, G., Jaton, K., & Opota, O. (2020). Viral load of SARS-CoV-2 across patients and compared to other respiratory viruses. *Microbes and Infection*, 22(10), 617–621. <https://doi.org/10.1016/J.MICINF.2020.08.004>

Jokisalo J, Pajunen S, Kravchenko I, Kilpeläinen S, Kosonen R, Farahani A and Korhonen N. Toteutuneet kesäaikaiset huonelämpötilat helsinkiläisissä kerrostaloissa. Rakennusfysiikka 2021 Tampere-talo 26-28.10.2021.

Jylhä K, Kalamees T, Tietäväinen H, Ruosteenoja K, Jokisalo J, Hyvönen R, Ilomets S, Saku S, Hutila A, 2011: Rakennusten energialaskennan testivuosi TRY2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Ilmatieteen laitos, Raportteja 2011:6.

Jylhä, Kirsti; Ruosteenoja, Kimmo; Böök, Herman; Lindfors, Anders; Pirinen, Pentti; Laapas, Mikko; Mäkelä, Antti. (2020). Nykyisen ja tulevan ilmaston säätietoja rakennusfysikaalisia laskelmia ja energialaskennan testivuotta 2020 varten. Ilmatieteenlaitos Raportteja - Rapportier - Reports 2020:6 <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/32116>

Karimzadeh, S., Bhopal, R., & Huy, N. T. (2021). Review of infective dose, routes of transmission, and outcome of COVID-19 caused by the SARS-COV-2: comparison with other respiratory viruses. In *Epidemiology and Infection*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S0950268821000790>

Kim YH, Kim JE, Hyun MC.(2011) Cytokine response in pediatric patients with pandemic influenza H1N1 2009 virus infection and pneumonia: comparison with pediatric pneumonia without H1N1 2009 infection. *Pediatr Pulmonol*, 46(12), 1233-9. doi: 10.1002/ppul.21496.

Koljonen T, Soimakallio S, Asikainen A, Lanki T, ym. Energia- ja ilmastostrategian vaikutusarviot: yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 21/2017.

Kollanus V, Lanki T. 2000-luvun pitkittyneiden helleaaltojen kuolleisuusvaikutukset Suomessa. *Duodecim* 2014; 130:983-990.

Kollanus V, Tiittanen P, Lanki T. Mortality risk related to heatwaves in Finland – Factors affecting vulnerability. *Environmental Research* 2021; 201:111503. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111503>

Kollanus V, Lanki T. Helteen terveyshaitat ja niiden ehkäisy Suomessa. *Terveiden ja Hyvinvoinnin laitos (THL). Työpäperi 14/2021. Helsinki 2021.*

Kurnitski J, Kiil M, Wargocki P, Boerstra A, Seppänen O, Olesen B, Morawska L (2021). Respiratory infection risk-based ventilation design method. *Building and Environment*, 206. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108387.

Kwon JS, Kim JY, Kim MC, Park SY, Kim BN, Bae S, Cha HH, Jung J, Kim MJ, Lee MJ, Choi SH, Chung JW, Shin EC, Kim SH. (2020) Factors of Severity in Patients with COVID-19: Cytokine/Chemokine Concentrations, Viral Load, and Antibody Responses. *Am J Trop Med Hyg*, 103(6), 2412-2418. doi: 10.4269/ajtmh.20-1110.

Lahdensivu J, Pakkala T, Pikkuvirta J, Räsänen A, Alastalo S, Karvonen A, Täubel M, Pekkanen J, Juntunen M, Velashjerdi Farahani A, Jokisalo J, Kosonen R, Jylhä K, Lanki T, Leino O, Kollanus V. Rakennusten kosteusvauriot ja yllämpeneminen muuttuvassa ilmastossa – RAIL. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2023:2. Valtioneuvoston kanslia, Helsinki 2023.

Lalueza A, Folgueira D, Muñoz-Gallego I, Trujillo H, Laureiro J, Hernández-Jiménez P, Moral-Jiménez N, Castillo C, Ayuso B, Díaz-Pedroche C, Torres M, Arrieta E, Arévalo-Cañas C, Madrid O, Lumbreras C. (2019) Influence of viral load in the outcome of hospitalized patients with influenza virus infection. *Eur J Clin Microbiol Infect Dis*, 38(4), 667-673. doi: 10.1007/s10096-019-03514-1.

Laukkarinen A, Jokela T, Vinha J, Pakkala T, Lahdensivu J, Lestinen S, Jokisalo J, Kosonen R, Lindfors A, Ruosteenoja K, Jylhä K. Vaipparakenteiden rakennusfysikaalisen toimivuuden ja huonetilojen kesäaikaisen jäähdystystehontarpeen mitoitusolosuhteet. Rakentamisen mitoitusääät (RAMI) -hankkeen loppuraportti. Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka, Tutkimusraportti 3. Tampere 2022.

Le Borgne, P., Solis, M., Severac, F., Merdji, H., Ruch, Y., Alamé Intern, K., Bayle, E., Hansmann, Y., Bilbault, P., Fafi-Kremer, S., Meziani, F. (2021). SARS-CoV-2 viral load in nasopharyngeal swabs in the emergency department does not predict COVID-19 severity and mortality. *Acad Emerg Med*, 28, 306-313.

Lee CK, Lee HK, Loh TP, Lai FY, Tambyah PA, Chiu L, Koay ES, Tang JW. (2011). Comparison of pandemic (H1N1) 2009 and seasonal influenza viral loads, Singapore. *Emerg Infect Dis*, 17(2), 287-291. doi: 10.3201/eid1702.100282.

Lee N, Chan PK, Hui DS, Rainer TH, Wong E, Choi KW, Lui GC, Wong BC, Wong RY, Lam WY, Chu IM, Lai RW, Cockram CS, Sung JJ. (2009). Viral loads and duration of viral shedding in adult patients hospitalized with influenza. *J Infect Dis*, 200(4), 492-500. doi: 10.1086/600383.

Li CC, Wang L, Eng HL, You HL, Chang LS, Tang KS, Lin YJ, Kuo HC, Lee IK, Liu JW, Huang EY, Yang KD. (2010). Correlation of pandemic (H1N1) 2009 viral load with disease severity and prolonged viral shedding in children. *Emerg Infect Dis*, 16(8), 1265-1272. doi: 10.3201/eid1608.091918.

Liao, C. M., Chang, C. F., & Liang, H. M. (2005). A probabilistic transmission dynamic model to assess indoor airborne infection risks. *Risk Analysis*, 25(5), 1097–1107. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2005.00663.x>

Liu, Y., Yan, L.-M., Wan, L., Xiang, T.-X., Le, A., Liu, J.-M., Peiris, M., Poon, L. L. M., & Zhang, W. (2020). Viral dynamics in mild and severe cases of COVID-19. *The Lancet Infectious Diseases*, 20(6), 656–657. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30232-2](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30232-2)

Lu PX, Deng YY, Yang GL, Liu YX, Gan YG, Li GB, Liu WL, Liu Y, Zhang J, Ye RX, Shan WS, Zhou BP. (2010). [The relationship between chest CT findings and viral load in patients with novel influenza A (H1N1)]. *Zhonghua Jie He He Hu Xi Za Zhi*, 33(10), 746-9. Chinese.

Magnard C, Valette M, Aymard M, Lina B. (1999). Comparison of two nested PCR, cell culture, and antigen detection for the diagnosis of upper respiratory tract infections due to influenza viruses. *J Med Virol*, 59(2), 215-20. doi: 10.1002/(sici)1096-9071(199910)59:2<215::aid-jmv15>3.0.co;2-j.

Maltezou HC, Raftopoulos V, Vorou R, Papadima K, Mellou K, Spanakis N, Kossyvakis A, Gioula G, Exindari M, Froukala E, Martinez-Gonzalez B, Panayiotakopoulos G, Papa A, Mentis A, Tsakris A. (2021). Association Between Upper Respiratory Tract Viral Load, Comorbidities, Disease Severity, and Outcome of Patients With SARS-CoV-2 Infection. *J Infect Dis*, 223(7), 1132-1138. doi: 10.1093/infdis/jiaa804.

McKay B, Ebell M, Billings WZ, Dale AP, Shen Y, Handel A. (2020). Associations Between Relative Viral Load at Diagnosis and Influenza A Symptoms and Recovery. *Open Forum Infect Dis*, 16(7), 11. doi: 10.1093/ofid/ofaa494.

Meschi S, Selleri M, Lalle E, Bordi L, Valli MB, Ferraro F, Ippolito G, Petrosillo N, Lauria FN, Capobianchi MR. (2011). Duration of viral shedding in hospitalized patients infected with pandemic H1N1. *BMC Infect Dis*, 23(11), 140. doi: 10.1186/1471-2334-11-140.

Milton DK, Glencross M and Walters M.D. (2000) "Risk of sick leave associated with outdoor air supply rate, humidification, and occupant complaints," *Indoor air*, vol. 10, no. 4, pp. 212–221

Morawska L, Tang JW, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer S, Floto A, Franchimon F, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks G, Marr LC, Mazzarella L, Yao M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, 142, #105832. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105832.

Morawska L, Allen J, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer SJ, Floto A, Franchimon F, Greenhalgh T, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks G, Marr LC, Seppänen O, Yao M. (2021). A paradigm shift to combat indoor respiratory infection Building ventilation systems must get much better. *Science*, 372 (6543), 689–691. DOI: 10.1126/science.abg2025.

Morawska, L. (2006). Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Indoor Air*, 16(5), 335–347. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0668.2006.00432.X>

Murphy, B. R., Nusinoff, S. R., Kasel, J., Chalhub, E. G., & Chanock, R. M. (1973). Temperature-Sensitive Mutants of Influenza Virus. III. Further Characterization of the ts-1[E] Influenza A Recombinant (H3N2) Virus in Man. *The Journal of Infectious Diseases*, 128(4), 479–487. <https://doi.org/10.1093/INFDIS/128.4.479>

Mäklin S, Kokko P. Terveysten- ja sosiaalihuollon yksikkökustannukset Suomessa vuonna 2017. Terveiden ja hyvinvoinninlaitos (THL). Työpäperi 21/2020. Helsinki 2020. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-343-493-6>

Ngaosuwankul N, Noisumdaeng P, Komolsiri P, Pooruk P, Chokephaibulkit K, Chotpi-tayasunondh T, Sangsajja C, Chuchottaworn C, Farrar J, Puthavathana P. (2010). Influenza A viral loads in respiratory samples collected from patients infected with pandemic H1N1, seasonal H1N1 and H3N2 viruses. *Virol J*, 20(7), 75. doi: 10.1186/1743-422X-7-75.

Oshansky CM, Gartland AJ, Wong SS, Jeevan T, Wang D, Roddam PL, Caniza MA, Hertz T, Devincenzo JP, Webby RJ, Thomas PG. (2014). Mucosal immune responses predict clinical outcomes during influenza infection independently of age and viral load. *Am J Respir Crit Care Med*, 189(4), 449-62. doi: 10.1164/rccm.201309-1616OC.

Pan, Y., Zhang, D., Yang, P., Poon, L. L. M., & Wang, Q. (2020). Viral load of SARS-CoV-2 in clinical samples. *The Lancet. Infectious Diseases*, 20(4), 411–412.

[https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30113-4](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30113-4)

Pawar, R.D., Balaji, L., Mehta, S. et al. (2022). Viral load and disease severity in COVID-19. *Intern Emerg Med* 17, 359–367.

Pereira LA, Lapinski BA, Debur MC, Santos JS, Petterle RR, Nogueira MB, Vidal LRR, De Almeida SM, Raboni SM. (2022). Standardization of a high-performance RT-qPCR for viral load absolute quantification of influenza A. *J Virol Methods*. 301:114439. doi: 10.1016/j.jviromet.2021.114439.

Perusterveyden-huollon avohoidon hoitoilmoitus (Avohilmo). <https://thl.fi/fi/tilastot-ja-data/ohjeet-tietojen-toimittamiseen/perusterveydenhuollon-avohoidon-hoitoilmoitus-avohilmo/raportit> Tiedot haettu 16.3.2023.

REHVA COVID-19 guidance document 4.1 (2020) <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-guidance>

REHVA COVID-19 ventilation calculator V2.0 (2021). <https://www.rehva.eu/covid19-ventilation-calculator>

REHVA 2021 Criteria for room air cleaners for particulate matter [https://www.rehva.eu/fileadmin/content/documents/Downloadable\\_documents/REHVA\\_COVID-19\\_Recommendation\\_Criteria\\_for\\_room\\_air\\_cleaners\\_for\\_particulate\\_matter.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/content/documents/Downloadable_documents/REHVA_COVID-19_Recommendation_Criteria_for_room_air_cleaners_for_particulate_matter.pdf)

REHVA 2023 Health-based target ventilation rates and design method for reducing exposure to airborne respiratory infectious diseases. REHVA and Nordic Ventilation Group proposal for post-COVID target ventilation rates. August 2023. <https://www.rehva.eu/activities/post-covid-ventilation>

Riediker, M., Briceno-Ayala, L., Ichihara, G., Albani, D., Poffet, D., Tsai, D. H., Iff, S., & Monn, C. (2022). Higher viral load and infectivity increase risk of aerosol transmission for Delta and Omicron variants of SARS-CoV-2. *Swiss Medical Weekly*, 152, w30133. <https://doi.org/10.4414/smw.2022.w30133>

Ruosteenoja K, Jylhä K. Average and extreme heatwaves in Europe at 0.5–2.0 °C global warming levels in CMIP6 model simulations. *Climate Dynamics* 2023.

<https://doi.org/10.1007/s00382-023-06798-4>



Russo S, Dosio A, Graversen R G, Sillmann J, Carrao H, Dunbar M B, Singleton A, Montagna P, Barbola P, Vogt J V. (2014) Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *J. Geophys. Res.* 119. 2014. doi:10.1002/2014JD022098.

Ruuhela R, Hyvärinen O, Jylhä K. Regional assessment of temperature-related mortality in Finland. *Int. J. Res. Environ. Res. Public. Health* 2018; 15(3):406.

Rodrigues Guimarães Alves V, Perosa AH, de Souza Luna LK, Cruz JS, Conte DD, Bellei N. (2020). Influenza A(H1N1)pdm09 infection and viral load analysis in patients with different clinical presentations. *Mem Inst Oswaldo Cruz*, 115, e200009. doi: 10.1590/0074-02760200009.

Shenoy S. (2021) SARS-CoV-2 (COVID-19), viral load and clinical outcomes; lessons learned one year into the pandemic: A systematic review. *World J Crit Care Med*, 10(4), 132-150. doi: 10.5492/wjccm.v10.i4.132.

Silva J, Lucas C, Sundaram M, Israelow B, Wong P, Klein J, Tokuyama M, Lu P, Venkataraman A, Liu F, Mao T, Oh JE, Park A, Casanovas-Massana A, Vogels CBF, Muenker CM, Zell J, Fournier JB, Campbell M, Chiorazzi M, Ruiz Fuentes E, Petrone M, Kalinich CC, Ott IM, Watkins A, Moore AJ, Nakahata MI, Grubaugh ND, Farhadian S, Dela Cruz C, Ko A, Schulz WL, Ring AM, Ma S, Omer S, Wyllie AL, Iwasaki A. (2021). Saliva viral load is a dynamic unifying correlate of COVID-19 severity and mortality. medRxiv 10:2021.01.04.21249236. doi: 10.1101/2021.01.04.21249236.

Sohail H, Kollanus V, Tiittanen P, Schneider A, Lanki T. Heat, heatwaves and cardiorespiratory hospital admissions in Helsinki, Finland. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2020; 17:7892.

Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskus. Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Asetus 545/2015. Helsinki 2015.

Su W, Yang B, Melikov M, Liang C, Lu Y, Wang F, Li A, Lin Z, Li X, Cao G, Kosonen R. Infection probability under different air distribution patterns, *Building and Environment* (2021), 108555, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108555>

Tamerius, J., Nelson, M. I., Zhou, S. Z., Viboud, C., Miller, M. A., & Alonso, W. J. (2011). Global influenza seasonality: reconciling patterns across temperate and tropical regions. *Environmental Health Perspectives*, 119(4), 439–445. <https://doi.org/10.1289/EHP.1002383>

Tang, J. W., Bahnfleth, W. P., Bluysen, P. M., Buonanno, G., Jimenez, J. L., Kurnitski, J., Li, Y., Miller, S., Sekhar, C., Morawska, L., Marr, L. C., Melikov, A. K., Nazaroff, W. W., Nielsen, P. V., Tellier, R., Wargocki, P., & Dancer, S. J. (2021). Dismantling myths on the airborne transmission of severe acute respiratory syndrome coronavirus-2 (SARS-CoV-2). *The Journal of Hospital Infection*, 110, 89.  
<https://doi.org/10.1016/J.JHIN.2020.12.022>

Tang, J. W., Noakes, C. J., Nielsen, P. V., Eames, I., Nicolle, A., Li, Y., & Settles, G. S. (2011). Observing and quantifying airflows in the infection control of aerosol- and airborne-transmitted diseases: an overview of approaches. *Journal of Hospital Infection*, 77(3), 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.jhin.2010.09.037>

Thai, P. Q., Choisy, M., Duong, T. N., Thiem, V. D., Yen, N. T., Hien, N. T., Weiss, D. J., Boni, M. F., & Horby, P. (2015). Seasonality of absolute humidity explains seasonality of influenza-like illness in Vietnam. *Epidemics*, 13, 65–73.  
<https://doi.org/10.1016/j.epidem.2015.06.002>

THL:n kuutioraportti "Akuuttien hengitystieinfektioiden sairaalahoito Suomessa".  
[https://sampo.thl.fi/pivot/prod/fi/epirapo/respincare/fact\\_epirapo\\_respincare](https://sampo.thl.fi/pivot/prod/fi/epirapo/respincare/fact_epirapo_respincare) Tiedot haettu 28.3.2023.

THL 2023a. Tilasto- ja indikaattoripankki Sotkanet. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. Ikääntyneiden palveluiden indikaattorit 1252, 3347, 3368 ja 3543. Viitattu 8.6.2023.

THL 2023b. Tilasto- ja indikaattoripankki Sotkanet. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. Perusterveydenhuollon vuodeosastohoito, keskimääräinen hoitoaika (ind. 1266). Viitattu 28.8.2023.

Thornton, G. M., Fleck, B. A., Dandnyak, D., Kroeker, E., Zhong, L., & Hartling, L. (2022). The impact of heating, ventilation and air conditioning (HVAC) design features on the transmission of viruses, including the 2019 novel coronavirus (COVID-19): A systematic review of humidity. *PloS One*, 17(10), e0275654.  
<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0275654>

Tilastokeskus 2023a. Suomen virallinen tilasto (SVT): Väestörakenne [verkkojulkaisu]. ISSN=1797-5379. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 17.1.2023]. Saantitapa:  
<http://www.stat.fi/til/vaerak>

Tilastokeskus 2023b. Suomen virallinen tilasto (SVT): Väestöennuste [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-5137. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 17.1.2023]. Saantitapa:  
<https://stat.fi/tilasto/vaenn>

Tilastokeskus 2023c. Suomen virallinen tilasto (SVT): Kuolleet [verkkojulkaisu].  
ISSN=1798-2529. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 6.6.2023]. Saantitapa:  
<https://www.stat.fi/tilasto/kuol>

Tilastokeskus 2023d. Suomen virallinen tilasto (SVT): Kuolemansyyt [verkkojulkaisu].  
ISSN=1799-5051. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 6.6.2023]. Saantitapa:  
<https://www.stat.fi/tilasto/ksyyt>

Tilastokeskus 2023e. Suomen virallinen tilasto (SVT): Asunnot ja asuinolot [verkkojulkaisu].  
ISSN=1798-6745. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 12.7.2023]. Saantitapa:  
<https://stat.fi/tilasto/asas>

Tilastokeskus 2023f. Suomen virallinen tilasto (SVT): Perheet [verkkojulkaisu].  
ISSN=1798-3215. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 12.7.2023]. Saantitapa:  
<https://stat.fi/tilasto/perh>

Tilastokeskus 2023g. Suomen virallinen tilasto (SVT):Energian hinnat [verkkojulkaisu].  
ISSN=1799-7984. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 13.6.2023]. Saantitapa:  
<https://www.stat.fi/tilasto/ehi>

Tilastokeskus 2023h. Suomen virallinen tilasto (SVT): Rakennuskustannusindeksi [verkkojulkaisu].  
ISSN=1795-4282. Helsinki: Tilastokeskus [Viitattu: 28.8.2023]. Saantitapa: <https://www.stat.fi/tilasto/rki>

Trunfio M, Calcagno A, Bonora S, Di Perri G. (2021) Lowering SARS-CoV-2 viral load might affect transmission but not disease severity in secondary cases. *Lancet Infect Dis*, 21(7), 914-915. doi: 10.1016/S1473-3099(21)00205-X.

Tsou TP, Shao PL, Lu CY, Chang LY, Kao CL, Lee PI, Yang PC, Lee CY, Huang LM. (2012) Viral load and clinical features in children infected with seasonal influenza B in 2006/2007. *J Formos Med Assoc*, 111(2), 83-87. doi: 10.1016/j.jfma.2010.10.001.

Tsukagoshi, Hiroyuki, Daisuke Shinoda, Mariko Saito, Kaori Okayama, Mitsuru Sada, Hirokazu Kimura, and Nobuhiro Saruki. (2021). "Relationships between Viral Load and the Clinical Course of COVID-19" *Viruses*, 13(2), 304.

Ueki, H et al., 'Effectiveness of face masks in preventing airborne transmission of SARS-CoV-2', *MSphere*, vol. 5, no. 5, 2020.

Vuorinen V, Alava M, Alopaeus V, Atanasova N, Auvinen M, Balasubramanian N, Bordbar H, Erasto P, Grande R, Hayward N, Hellsten A, Hostikka S, Hokkanen J,

Kaari O, Karvinen A, Kivisto I, Korhonen M, Kosonen R, Kuusela J, Lestinen S, Laurila E, Nieminen J, Peltonen P, Pokki A, Råback P, Salmenjoki H and Sironen T. Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors. *Safety Science* (2020) 130 104866 <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104866>

Ward, R., Akin, E. (1984). Minimum infective dose of animal viruses. *Critical Reviews in Environmental Control*, 14, 297–310.

Wang B, Russell ML, Fonseca K, Earn DJD, Horsman G, Van Caesele P, Chokani K, Vooght M, Babiuk L, Walter SD, Loeb M. (2017). Predictors of influenza a molecular viral shedding in Hutterite communities. *Influenza Other Respir Viruses*, 3, 254-262. doi: 10.1111/irv.12448.

World Health Organization. (2021). Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/339857>. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

Wu UI, Wang JT, Chen YC, Chang SC. (2012). Severity of pandemic H1N1 2009 influenza virus infection may not be directly correlated with initial viral load in upper respiratory tract. *Influenza Other Respir Viruses*, 5, 367-373. doi: 10.1111/j.1750-2659.2011.00300.x.

Ympäristöministeriö, 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energia-  
tehokkuudesta. Asetus 1010/2017. Helsinki.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Helsinki, 2017.

Zou, L., Ruan, F., & Huang, M. (2020). SARS-CoV-2 Viral Load in Upper Respiratory Specimens of Infected Patients. *The New England Journal of Medicine*, 26(5), 672–675. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1911614>

tietokayttoon.fi

---

ISBN PDF 978-952-383-007-3  
ISSN PDF 2342-6799