



Karelia-ammattikorkeakoulu
Talotekniikka (AMK)

Sisäilman laadun selvitys koulu- rakennuksen tiloissa

Eemil Juvonen

Opinnäytetyö, toukokuu 2023

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023
Talotekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä(t)
Eemil Juvonen

Nimeke
Sisäilman laadun selvitys koulurakennuksen tiloissa

Toimeksiantaja
Karelia Digital Twin -hanke

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää sisäilman laatu koulurakennuksen tietyissä tiloissa ja vertailla mittauksiin käytettyjen eri mittareiden tuottamia tuloksia. Opinnäytetyössä käsitellään myös yleisimpiä sisäilmaongelmia ja niiden vaikutusta ihmisen hyvinvointiin. Työ toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun Digital Twin -hankkeen toimeksiannosta.

Työn toiminnallinen osuus toteutettiin suorittamalla sisäilman laadun hetkellinen- ja pidempiaikainen seuranta. Olosuhteiden hetkellinen seuranta toteutettiin yhden päivän aikana. Pidempiaikainen seuranta kesti 9 päivää. Sisäilman laatua selvittäessä tarkasteltiin lämpötilaa, operatiivista lämpötilaa, kosteutta, hiilidioksidia, pienhiukkasia, orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuutta ja ilman liikettä. Mittareiden tuottamaa dataa verrattiin sisäilman laadun asetuksiin ja määräyksiin. Tarkoitus oli selvittää, toteutuvatko tiloissa vaaditut tavoitetasot.

Työn tuloksista pystyttiin havaitsemaan sisäilman laadun tila seurantajakson aikana. Tuloksista kävi ilmi, että osassa tiloista esiintyy puutteita, sillä jokaisen mitatun suureen osalta tavoitetasot eivät täyty. Sisäilman laadun tulosten perusteella voidaan mahdolliset seuraavat jatkotutkimukset keskittää tiettyihin havaittuihin puutteisiin.

Kieli
suomi

Sivuja 70
Liitteet 1
Liitesivumäärä 1

Asiasanat
sisäilma, ilman laatu, sisäilmamittaus



THESIS
May 2023
Degree Programme in Building Services Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Eemil Juvonen

Title
Survey of Indoor Air Quality in the Premises of a School Building

Commissioned by
Karelia Digital Twin project

Abstract

The purpose of the thesis was to find out the indoor air quality in certain rooms of a school building and to compare the results obtained from different measuring instruments used for the measurements. The thesis also discusses the most common indoor air problems and their impact on human well-being. The work was carried out under the commission of Karelia University of Applied Sciences' Digital Twin project.

The functional part of the thesis was carried out by performing instantaneous and long-term indoor air quality monitoring. The instantaneous monitoring of the conditions was carried out during one day. Longer-term monitoring lasted for nine days.

When assessing the indoor air quality, temperature, operational temperature, humidity, carbon dioxide, small particles, the total concentration of organic compounds, and air movement were examined. The data produced by the meters were compared to the indoor air quality settings and regulations. The purpose was to find out whether the required target levels were being met in the facilities.

From the results of the work, it was possible to detect the state of indoor air quality during the monitoring period. The results showed that there are deficiencies in some of the premises, as the target levels are not met for each measured quantity. Based on the indoor air quality results, possible subsequent studies can focus on certain observed deficiencies.

Language
Finnish

Pages 70
Appendices 1
Pages of Appendices 1

Keywords
indoor air, air quality, indoor air measurement

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Rakennuksen sisäilma	6
2.1	Sisäilmastoluokat	7
2.2	Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät	8
2.3	Fysikaaliset tekijät	9
2.3.1	Lämpöolot	9
2.3.2	Suhteellinen kosteus (RH %)	12
2.3.3	Ilmanvaihto ja ilman liike	14
2.4	Kemialliset ja kaasumaiset tekijät	16
2.4.1	Hiilidioksidi	17
3	Ilmanvaihdon tarkastelu	19
3.1	Yleisimmät ilmanvaihtojärjestelmät Suomessa	20
3.2	Koulurakennusten ilmanvaihto	22
3.3	Ilmansuodatus	24
4	Sisäilmaongelmat	24
4.1	Sisäilmaongelmien syyt	25
4.2	Sisäilmaongelmien vaikutukset ihmiseen ja yhteisöön	26
5	Kohteen esittely	27
5.1	Kohteen ilmanvaihto	28
6	Toiminnallinen osuus (mittaukset)	29
6.1	Mittaussuunnitelma	29
6.1.1	Pidempiaikainen olosuhdeseuranta	30
6.1.2	Hetkelliset mittaukset	34
6.2	Laitteiden esittely, tarkkuus ja kalibrointi	35
7	Tiloissa mitatut suureet, mittaustavat ja mittaustulokset	36
7.1	Tila 217	37
7.1.1	Pidempiaikainen seuranta	38
7.1.2	Hetkellinen seuranta	40
7.2	Tila 220	42
7.2.1	Pidempiaikainen seuranta	42
7.2.2	Hetkellinen seuranta	45
7.3	Tila 223c	46
7.3.1	Pidempiaikainen seuranta	46
7.3.2	Hetkellinen seuranta	49
7.4	Tila 227	50
7.4.1	Pidempiaikainen seuranta	50
7.4.2	Hetkellinen seuranta	54
7.5	Tila 228	55
7.5.1	Pidempiaikainen seuranta	55
7.5.2	Hetkellinen seuranta	59
7.6	Tila 229	60
7.6.1	Pidempiaikainen seuranta	60
7.6.2	Hetkellinen seuranta	64
7.7	Yhteenveto mittaustuloksista	65
8	Pohdinta/yhteenveto	67
	Lähteet	69

Liitteet

Liite 1 Halton PRA 200 säätöpellin k-kerroin taulukko

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin sisäilmaston laatu Karelia-ammattikorkeakoulun Wärtsilä-kampuksen kuudessa eri tilassa sekä vertaillaan eri laitevalmistajien mittalaitteilla saatuja tietoja. Sisäilman laatu selvitettiin olosuhteiden seurantaan tarkoitetuilla erilaisilla IoT-sensoreilla sekä ammattikäyttöön soveltuvalla olosuhteiden seurantaan tarkoitettulla monitoimimittarilla. Toimeksiantaja tässä työssä on Karelia-ammattikorkeakoulun Digital Twin -hanke. Opinnäytetyön aihe valikoitui omasta kiinnostuksesta aihetta kohtaan, sillä sisäilmaongelmat ovat pinnalla ja lähipiirissä on henkilöitä, jotka niistä kärsivät.

Työ sisältää toiminnallisen osuuden lisäksi aiheeseen liittyvää teoriaa. Teoriaosuuden eri kappaleissa tarkasteltiin rakennuksen sisäilmaa, siihen vaikuttavia tekijöitä ja ilmanvaihtojärjestelmiä eri määräysten ja standardien pohjalta. Toiminnallisessa osuudessa tutkittaviksi tiloiksi valittiin Wärtsilä-kampuksen toimitilat 217, 223c ja 228 sekä luokkahuoneet 220, 227 ja 229. Tilojen sisäilman olosuhteet selvitettiin reilun viikon mittaisen seurantajakson aikana. Toiminnallisen osuuden kulku on selitetty opinnäytetyön loppuosassa teoriaosuuden jälkeen. Opinnäytetyössä tarkasteltiin lisäksi sisäilmaongelmia yleisesti ja niiden vaikutusta ihmiseen ja yhteisöön.

2 Rakennuksen sisäilma

Ihminen viettää keskimäärin kuluttamastaan ajastaan noin 90–95 % sisätiloissa, joita ovat eri julkiset rakennukset ja asuinrakennukset. Ihmisen tulee hengittää elääkseen ilmaa vuorokaudessa maksimissaan jopa 40 kuutiometriä, josta suurin osa onkin sisäilmaa. (Sisäilmayhdistys ry 2008a.)

Sisäilmasto koostuu sisäilmasta ja sisäilmaan vaikuttavista erinäisistä fysikaalisista tekijöistä. Sisäilmastoksi voidaan kutsua ihmisen terveyteen ja tilassa viihtyvyyteen vaikuttavia ympäristötekijöitä. Tilan lämpö- ja kosteusolosuhteet ovat yhteydessä elimistön lämmönluovutukseen, ja näin ollen ne vaikuttavat ihmisen aineenvaihdunnan tasapainoon. Lämpö- ja kosteusolosuhteisiin kuuluvat muun muassa sisäilman lämpötila, operatiivinen lämpötila, pintojen lämpötilat, sisäilman suhteellinen kosteus (RH %) sekä sisäilman liikenopeus. (Sisäilmayhdistys ry 2008a.)

Sisäilmalla tarkoitetaan rakenteiden rajaamissa sisätiloissa hengitettävää ilmaa, mikä ei sisällä tuotannollisesta tai muusta poikkeavasta toiminnasta johtuvia päästöjä. Tällaisia rakennuksia ovat muun muassa asunnot, koulut, toimistot ja sairaalat. Sisäilma saattaa kuitenkin sisältää kaasumaisia ja hiukkasmaisia epäpuhtauksia, joita syntyy muun muassa tupakoinnista, rakennusmateriaaleista, erilaisten prosesseista tai ulkoilmasta kulkeutumisen seurauksena. Hengitettävän sisäilman kautta nämä haitalliset kaasumaiset ja hiukkasmaiset epäpuhtaudet kulkeutuvat keuhkoihin aiheuttaen erinäisiä oireita ja haittaa terveydelle. (Sisäilmayhdistys ry 2008a.)

Rakennuksen sisäilman voidaan katsoa olevan hyvää silloin, kun suurin osa rakennuksen käyttäjistä on tyytyväisiä sisäilman laatuun eikä siitä aiheudu terveyshaittoja. Sisäilmaston laatua voidaan selvittää esimerkiksi käyttäjille suunnatuilla kyselytutkimuksilla. Jokaiselle hankkeelle luodaan rakennusvaiheessa sisäympäristön tavoitearvot, joihin pyritään pääsemään. Nämä tavoitearvot on luonnollisesti huomioitava koko rakennushankkeen ajan, mikäli tavoitteisiin halutaan päästä. (Sisäilmayhdistys ry 2008a.)

2.1 Sisäilmastoluokat

Sisäilmastoluokitusta käytetään, kun rakennukselle asetetaan tavoitteita sisäilmaston osalta. Sisäilmastotavoitteet koskevat tavallisia työ- ja asuintiloja, mihin kuuluvat toimisto- ja muut julkiset rakennukset, asuin-, koulu-, päiväkotirakennukset. Sisäilmastoluokitus on kohteen käyttäjälle, omistajalle, rakennuttajalle ja suunnittelijoille avuksi sisäilman tavoitetasojen määrittämisessä. Tavoitetasojen avulla määritetään terveyden ja viihtyvyyden kannalta turvalliset olosuhteet, mitkä ovat viranomaismääräyksiä korkealaatuisemmat. (Sisäilmastoluokitus 2018, 5.)

Sisäilmastoluokitus on kolmitasoinen, tilan sisäilman laadun perusteella. Nämä laatuluokat ovat lyhenteeltään S1, S2 ja S3. S1-luokassa on käyttäjätyytyväisyydeltä todennäköisimmin suurempi osuus kuin S2- ja S3-luokissa. S1- tai S2-luokan asetettua tavoitteeksi, rakennuksen sisäilmaston olosuhteilta voidaan vaatia tavanomaista määräystasoa parempaa laatua. Tällaisia S1 tai S2-luokan sisäilmastotavoitteita käytetään ensisijaisesti uudisrakennuskohteissa. Rakennusten suunnittelijoiden tulee toimia luokituksen vaatimalla tavalla, että sisäilmaluokan määäämiin tavoiteisiin päästään. Näin ollen se toimii suunnittelijoille niinsanotuna ohjaustyökaluna. (Sisäilmastoluokitus 2018, 5.)

S1-luokkaa voidaan kutsua yksilölliseksi sisäilmastoksi. Sisäilma tilassa on laadultaan erittäin hyvää eikä tiloissa esiinny aistimalla hajuja. Tilat, jotka ovat yhteydessä sisäilmaan eivät sisällä ilman laatua huonontavia vaurioita tai epäpuhtauksia. Tila on lämpötilaltaan viihtyisä eli tilassa ei havaita vetoa tai yllämpöä. Tilan käyttäjällä mahdollisuus hallita tilan lämpöoloja ja valaistusta yksilöllisesti. Ääniolosuhteet ovat tasoltaan erittäin hyvät. (Sisäilmastoluokitus 2018, 5.)

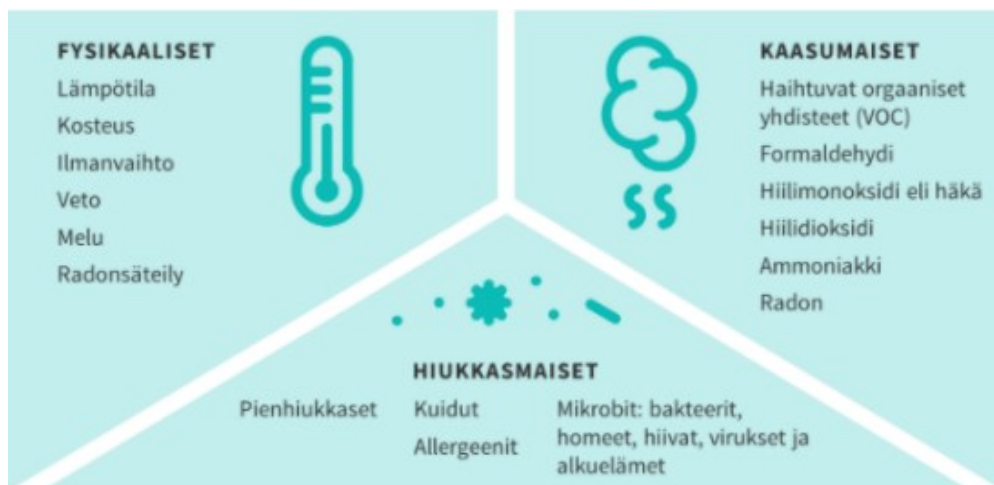
S2-luokkaa voidaan kutsua hyväksi sisäilmastoksi. S2-luokassa tilan sisäilma on laadultaan hyvänveroista eikä tiloissa esiinny aistimalla hajuja. Tilat, jotka ovat yhteydessä sisäilmaan eivät sisällä ilman laatua huonontavia vaurioita tai epäpuhtauksia. Tila on lämpötilaltaan hyvänveroinen, tilassa ei havaita yleensä vetoa, mutta yllämpöä voi esiintyä esimerkiksi lämpiminä kesäpäivinä.

Tilan ääni- ja valaistusolosuhteet ovat laadultaan hyvät. (Sisäilmastoluokitus 2018, 5.)

S3-luokkaa voidaan kutsua tyydyttäväksi sisäilmastoksi. S3-luokassa tilan sisäilma, lämpöolot, ääni- ja valaistusolosuhteet ovat laadultaan maankäyttö- ja rakennuslain myötä annetut säädökset ja terveydensuojelain perusteella asetetut minimivaatimukset täyttäviä. Mikäli asetusten vaatimukset täyttyvät, se ei pakosti velvoita S3-luokan tavoitearvojen käyttämistä vaan ne esitetään pääasiassa vertailun tueksi. Tavoite- ja suunnitteluarvot eri suureille saadaan valita eri laatuluokituksista ja tarpeen tullen kyseessä olevan suureen arvo voidaan määrittellä tapauskohtaisesti. (Sisäilmastoluokitus 2018, 5.)

2.2 Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät

Sisäilman laatuun vaikuttaa useammat eri tekijät. Nämä vaikuttavat tekijät voidaan jakaa kolmeen pääsektoriin, jotka ovat fysikaaliset, kaasumaiset ja hiukkasmaiset tekijät. Havainnollistavasta kuvioista 1 voidaan nähdä eri kategoriaan kuuluvat tekijät (THL, 2019).



Kuvio 1. Sisäilman laatuun vaikuttavat tekijät (THL 2019).

2.3 Fysikaaliset tekijät

2.3.1 Lämpöolot

Lämpöolot, jotka ihminen kokee rakennuksen sisällä vaikuttavat hyvin olennaisesti ihmisten viihtyvyyteen, terveyteen ja tuottavuuteen siellä (Sandberg 2016, 37). Ihminen kokee lämpöviihtyvyyden yksilöllisesti, mutta suurin osuus tyytyväisiä on silloin, kun rakennuksen sisälämpötila on 21–22 °C (Sisäilmayhdistys ry 2008b). Lämpöolot ovat oikeat silloin, kun rakennuksen käyttäjät eivät pysty sanomaan tulisiko lämpötilaa nostaa vaiko laskea (Sandberg 2016, 38).

Ihmisen sukupuoli, koko, ikä, aktiivisuuden taso, käytetty vaatetus ja olosuhteisiin mukautuminen vaikuttavat siihen, millaiseksi lämpötilan kokee. Näistä syistä on lähes mahdotonta saada yksiä samoja lämpöoloja, joihin jokainen käyttäjä olisi tyytyväinen. (Sandberg 2016, 47 & 53).

Liian korkean lämpötilan aiheuttamia ongelmia esiintyy kesällä esimerkiksi suurikokoisten ikkunoiden takia, jonka kautta auringon lämpösäteily pääsee lämmitämään tilaa toivottua enemmän. Talvella korkea sisäilman lämpötila on seurausta ihmisten vetovalituksista, minkä vuoksi koko rakennuksen lämpötilaa nostetaan. (Sandberg 2016, 37.) Liian alhaiseen huonelämpötilaan on usein syynä samat suurikokoiset, läheltä lattian pintaa alkavat ikkunat, jotka aiheuttavat talvella kylmäsäteilyä (Hengityслиitto 2022).

Sopivien lämpöolojen saavuttamiseksi rakennuksissa on oltava muun muassa oikeanlaiset ja oikein toimivat seinät ja katto sekä ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmät. (Sandberg 2016, 37.) Sisälämpötilalla on myös suuri merkitys siihen, että rakennuksen rakenteet kestävät toimintakunnossa. Näin ollen sillä on yhteys myös mahdollisiin terveyshaittoihin, mikäli kosteutta pääsisi tiivistymään pinnoille. (THL, 2019.)

Huonelämpötilalla tarkoitetaan ilman lämpötilaa oleskeluvyöhykkeellä (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 2 §). Terveen koulun tuntomerkkien mukaan huonelämpötilan tulisi olla lämmityskauden aikana 20–22 °C. Tästä lämpötilasta tapahtuvat

poikkeamat huonontavat ihmisen terveyttä ja viihtyvyyttä tilassa. (Sisäilmayhdistys ry 2008d.)

Asumisterveysasetus määrittää eri rakennusten lämpötilojen toimenpiderajat niin lämmityskaudella kuin lämmityskauden ulkopuolellakin. Oppilaitosten huoneilman lämpötilan toimenpiderajat sekä seinä- ja lattiapinnan alimmat keskiarvolämpötilat näkyvät taulukossa 1. (Asumisterveysasetus 545/2015.)

Jos halutaan selvittää mahdollisia terveyshaittoja, tulisi huoneilman lämpötilaa mitata. Huoneilman lämpötilan mittaaminen tulisi tapahtua noin 1,1 metrin korkeudelta lattiapinnasta (Asumisterveysasetus 545/2015).

	<i>Lämpötilojen toimenpiderajat</i>	<i>Lämpötilaindeksi TI</i>
<i>Oppilaitokset</i>		
Huoneilman lämpötila lämmityskaudella	+ 20 °C – + 26 °C	
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella oppilaitoksissa	+ 20 °C – + 32 °C	
Seinäpinnan alin keskiarvolämpötila	+ 16 °C	81
Lattiapinnan alin keskiarvolämpötila	+ 19 °C	92
Alin pistemäinen pintalämpötila	+ 11 °C	61

Taulukko 1. Lämpötilojen toimenpiderajat (Asumisterveysasetus 545/2015).

Asumisterveysasetuksessa kerrotaan, että ”Pintalämpötiloja arvioidaan lämpötilaindeksiä käyttämällä silloin, kun lämpötiloja ei voida mitata – 5 °C ± 1 °C:n ulkolämpötilassa ja + 21 °C ± 1 °C:n sisälämpötilassa. Lämpötilaindeksiä käytettäessä on rakennuksen alipaineisuus otettava huomioon, kun keskimääräinen alipaineisuus ylittää 5 Pa”. (Asumisterveysasetus 545/2015.)

Sisäilmastoluokitus antaa huoneilman lämpötiloille tavoitearvoja eri luokissa. Tavoitearvot ovat erilaiset vuodenajan mukaan, jotka ovat seuraavanlaiset:

- Sisäilmastoluokka S1
 - 21–22 °C talvella
 - 23–24 °C kesällä
- Sisäilmastoluokka S2
 - 20–22 °C talvella
 - 23–26 °C kesällä
- Sisäilmastoluokka S3
 - 20–23 °C talvella
 - 22–27 °C kesällä (Sisäilmaluokitus 2018).

Sisäilmaluokitus antaa myös operatiivisen lämpötilan tavoitearvot eri sisäilmastoluokille. Operatiivisella lämpötilalla tarkoitetaan huoneilman lämpötilasta poikkeavia pintalämpötiloja, jotka vaikuttavat ihmisen lämmöntunteeseen. Operatiivista lämpötilaa suositellaan mitattavaksi, jos pintojen lämpötilat poikkeavat selvästi ilman lämpötilasta (Sisäilmaluokitus 2018). Mittaus suoritetaan pallo-
lämpömittarilla standardin SFS-EN 12599 mukaisesti. Taulukossa 2 on esitetty eri sisäilmastoluokkien antamat operatiivisen lämpötilan raja-arvot. Taulukossa on myös lämpötilan sallitut vaihteluvälit ylöspäin ja alaspäin.

	S1	S2	S3
Operatiivinen lämpötila t_{op} [°C]			21
$t_u \leq 0$ °C	21,5 ¹⁾	21,5	
$0 < t_u \leq 20$ °C	$21,5 + 0,15 \times t_u^{1)}$	$21,5 + 0,2 \times t_u$	
$t_u > 20$ °C	24,5 ¹⁾	25,5	
Lämpötilan sallittu vaihteluväli [°C] poikkeama ylöspäin			
$t_u \leq 0$ °C	< 22,5	< 23	
$0 < t_u \leq 15$ °C	$22,5 + 0,166 \times t_u$	$23 + 0,2 \times t_u$	
$t_u > 15$ °C	< 25	< 26	
poikkeama alaspäin			
$t_u \leq 0$ °C	> 20,5	> 20,5	
$0 < t_u \leq 20$ °C	$20,5 + 0,075 \times t_u$	$20,5 + 0,025 \times t_u$	
$t_u > 20$ °C	> 22	> 21	
Operatiivisen lämpötilan enimmäisarvo [°C]			
$t_u \leq 0$ °C	< 23	< 23	
$0 < t_u \leq 20$ °C	$23 + 0,2 \times t_u$	$23 + 0,2 \times t_u$	
$t_u > 15$ °C	< 27	< 27	
$t_u \leq 10$ °C			< 25 (26) ²⁾
$t_u > 10$ °C			< 27 (32) ²⁾
Operatiivisen lämpötilan vähimmäisarvo [°C]	20	20	20 (18) ²⁾
Olosuhteiden pysyvyys [% käyttöajasta]			
toimi- ja opetustilat	90 %	90 %	
asunnot	90 %	80 %	

Taulukko 2. Operatiivisen lämpötilan tavoitearvot eri luokissa (Sisäilmaluokitus 2018).

2.3.2 Suhteellinen kosteus (RH %)

Ilman kosteus ilmoitetaan yleensä suhteellisena kosteutena (RH %), mikä kuvaa ilmassa olevan vesihöyryn määrän, joka voi olla tietyssä lämpötilassa ilmassa ilman tiivistymistä. Lämpimällä ilmalla on parempi ominaisuus sitoa enemmän kosteutta itseensä kuin kylmällä ilmalla. Kylmää ulkoilmaa tuotaessa sisälle, ilman suhteellinen kosteus laskee. Suomessa ulkoilman kosteus on aina lähes ihanteellinen, eikä siitä aiheudu yleensä sen kummempia haitallisia tuntemuksia. (Sisäilmayhdistys 2008b.)

Asumisterveysasetuksen mukaan: ”Huoneilman kosteus ei saa olla pitkäkestoisesti niin suuri, että siitä aiheutuu rakenteissa, laitteissa taikka niiden pinnoilla mikrobikasvun riskiä” (Asumisterveysasetus 545/2015, 5§). Sisäilman kostuttamista ei pidetä yleensä tarpeellisena toimenpiteenä rakennuksissa, sillä kosteudella voidaan katsoa olevan vain pienehkö yhteys koettuun ilman laatuun, jos aktiviteetti tilassa on lähinnä istumatyötä (SFS-EN 1521, 24).

Asetus ei anna suhteelliselle kosteudelle tarkkoja toimenpiderajoja, vaan enemmin suosittaa. Aiemmin suosituksena on ollut 20–60 % suhteellisen kosteuden arvot, mutta niitäkään ei pidetä välttämättömyytenä terveellisten asuinolosuhteiden täyttymiselle. Suhteellisessa kosteudessa sallitaan siis pienet poikkeamat, mikäli muut terveellisen asumisen edellytykset täyttyvät. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje 11, 2016.)

Sisäilman suhteellinen kosteus on talvella matala eli huoneilma on kuivahkoa. Sopivaksi suhteelliseksi kosteudeksi talvisaikaan voidaan sanoa 20–40 %. Jos kosteus nousee yli 45 %:iin, ilmanvaihdossa voidaan katsoa olevan puutteita tai ihmisen toiminta on aikaansaanut nousun. Tällainen tilanne on riski kosteusvaurion kannalta, sillä kosteus voi tiivistyä kylmien rakenteiden sisään. Kesällä sisäilman suhteellinen kosteus on 50–70 % luokkaa. (Hengityслиitto 2022.)

Ihminen pystyy aistimaan liian korkean tai matalan suhteellisen kosteuden, mikä aiheuttaa erinäisiä tuntemuksia iholla, limakalvoissa tai hengitysteissä. Korkean kosteuden voi huomata esimerkiksi hikoiluna tai hengityksessä. Tilassa voi esiintyä tavallista enemmän pölyjä, sillä pölypunkit lisääntyvät yli 45 % suhteellisessa kosteudessa. Alhainen sisäilman suhteellinen kosteus eli toisin sanoen kuiva sisäilma heikentää hengitysteiden värekarvojen liikettä ja liman poistumista. (Harju 2008, 27 ja 28.)

Jotta voidaan arvioida paremmin sisäilman kosteutta, suositellaan kosteuslisän käyttämistä, mikä tarkoittaa tilassa syntyvää lisäkosteutta ulkoilmaan nähden. Tällaista kosteutta syntyy esimerkiksi hengityksestä, pyykin kuivatuksesta, suihkussa käynnistä ja ruoan laitosta. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje 11, 2016.) Koulurakennuksissa kyseisiä kosteuslisiä (pyykin kuivatuksesta, suihkussa käynnistä tai ruoan laitosta) harvemmin syntyy. Kosteuslisät voisivat syntyä esimerkiksi siivoamisen seurauksena tai ihmisten saapumisesta sateisella säällä rakennukseen. Siivoamisessa käytetyt pesuvedet aiheuttavat rakenteille kosteuslisiä. Sateisella säällä vaatteet ovat kastuneet ja lisäävät kosteutta tilaan.

2.3.3 Ilmanvaihto ja ilman liike

Ilmanvaihdon tulee olla suunniteltu rakennuksen käytön mukaisesti riittäväksi ja laadultaan riittävän puhtaaksi. Ilmanvaihdon on toteutettava sisäilman vaihto koko rakennuksen oleskeluvyöhykkeellä. Sen on toteutettava käyttöajan ulkopuolella sen kaltaiset olosuhteet, missä rakennus- tai sisustusmateriaaleista peräisin olevat epäpuhtaudet eivät pääse aiheuttamaan käyttöaikana tilassa oleskeleville henkilöille terveyshaittoja. (Asumisterveysasetus 545/2015, 8 §.)

Rakennuksen oleskelutiloihin on tuotava vähintään 6 dm³/s henkilöä kohden suuruinen ulkoilmavirta suunniteltuna käytönaikana. (Asetus 1009/2017).

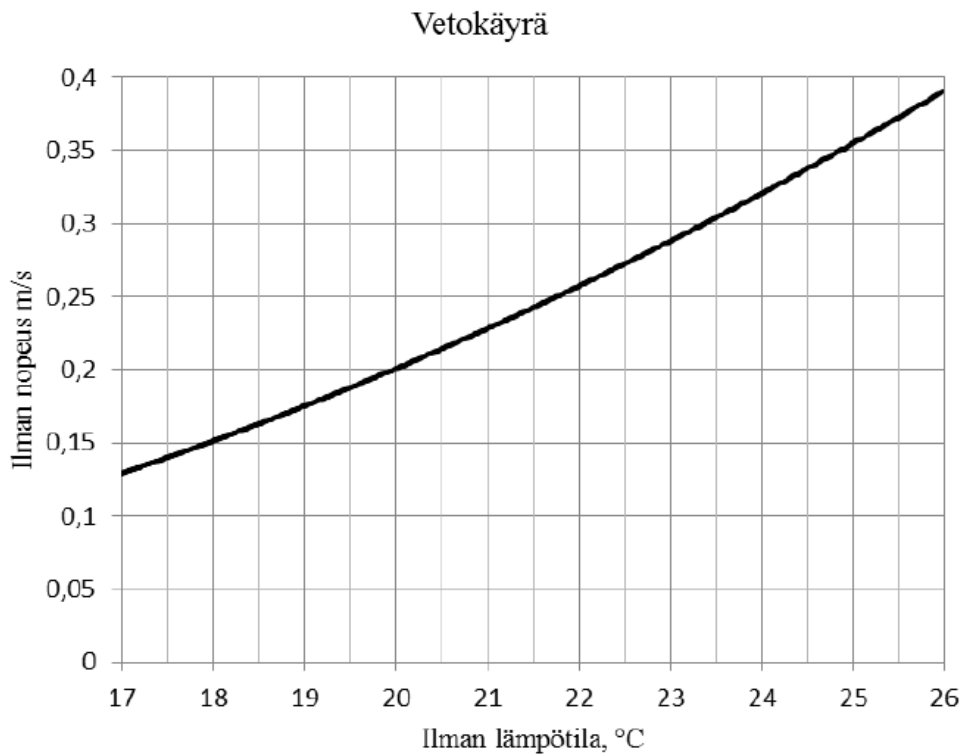
Asumisterveysasetuksen mukainen toimenpideraja rakennuksen ulkoilmavirralle on rakennuksen käytön aikana vähintään 0,35 dm³/s/ m² kohden jokaisessa asuinhuoneessa. (Asumisterveysasetus 545/2015, 9 §). Päiväkodeissa, kouluissa ja muissa vastaavissa tiloissa ulkoilmavirran pitää olla käytön aikana nimissään 6 dm³/s henkilöä kohden. Pieni pudotus sallitaan 4 dm³/s:iin, mikäli varmistutaan siitä, ettei sisäilman lämpötila, epäpuhtauspitoisuudet tai kosteus nouse liian suureksi aiheuttaen terveyshaittaa tai mikrobikasvuston riskiä. (Asumisterveysasetus 545/2015, 10 §.)

Ilmanvaihto, rakennuksen ikkunat tai epätiivis vaippa voi aiheuttaa erinäisissä tilanteissa vedon tunnetta, mikä syntyy siitä, kun lämpö pyrkii siirtymään ihmisen iholta. Siihen vaikuttaa lämpösäteily eli kylmän pinnan läheisyys ja niukka vaatetus. Ihmiset kokevat vedon tunteen eri lailla eli se on yksilöllistä. Veto aiheuttaa kylmemmässä lämpötilassa epämiellyttävää tunnetta iholla, palelua ja toimintakyvyn heikkenemistä, kun taas lämpimässä se saattaa toimia viilennyskeinona. (Sisäilmayhdistys 2008b.) Vedosta aiheutuvat valitukset ovat kaikista yleisimpiä rakennuksissa ilmi tulleista valituksista. Niitä esiintyy eniten myös uuden, modernin ilmastointijärjestelmän kiinteistöissä. (Sandberg 2014, 37.)

Ilman liikereittejä ja rakennuksen vaipan pitävyyttä voidaan arvioida lämpökuvausten avulla. Lämpökuvaus havaitsee mahdolliset lämpövuotokohdat, kyseessä olevan eristyspuutteen, ilmavuodon tai kylmäsillan. Sen avulla voidaan saada selville kosteusvauriot. Sen etuna on myös se, että rakenteita ei tarvitse

purkaa. Rakennuksen lämpökuvausta suorittaakseen henkilöllä tulee olla lämpökuvausten ja rakennustekniikan asiantuntemus, joka on myönnetty esimerkiksi VTT:n myöntämällä lämpökuvaajan sertifiikatilla. (RT 14-11239. 2016. Rakennuksen lämpökuvaus.)

Asumisterveysasetus 545/2015 määrittää ilman virtausnopeudesta sen, että se ei saa ylittää kuviossa 2 esiintyvän vetokäyrän virtausnopeutta.



Kuvio 2. Vetokäyrä (Asumisterveysasetus 545/2015).

Sisäilmastoluokitus antaa raja-arvot ilman liikenopeudelle oleskeluvyöhykkeellä taulukon 3 mukaisesti. Lämpötila t_{ilma} kuvaa liikkuvan ilman lämpötilaa tarkastelupisteessä. Ilman liikenopeudeksi huomioidaan kolmen minuutin keskiarvo työpisteessä ja se tulee mitata suuntariippumattomalla anemometrillä standardin SFS-EN 12599 mukaisesti.

Ilman liikenopeus (m/s)	S1	S2	S3
$t_{ilma} = 21 \text{ °C}$	< 0,15	< 0,15	0,2 (talvi)
$t_{ilma} = 23 \text{ °C}$	< 0,15	< 0,20	

$t_{\text{ilma}} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$	< 0,20	< 0,25	0,3 (kesä)
---	--------	--------	------------

Taulukko 3. Ilman liikenopeuden tavoitearvot (Sisäilmastoluokitus 2018).

2.4 Kemialliset ja kaasumaiset tekijät

Kemialliselle tekijälle on oma määritelmänsä Asumisterveysasetuksen mukaan, joka kuuluu näin:

Kemiallisella tekijällä tarkoitetaan terveydelle haitallisia hiukkasmaisia tai kaasumaisia orgaanisia tai epäorgaanisia aineita tai yhdisteitä, jotka ovat peräisin rakennusmateriaaleista, kosteuden vaurioittamista rakenteista, rakennuksen muista tiloista, läheisistä rakennuksista, maaperästä, sisustusmateriaaleista tai ulkoilmasta. (Asumisterveysasetus 545/2015).

Kemiallisia tekijöitä ovat esimerkiksi rakennus- tai sisustusmateriaaleista haihtuvat yhdisteet (mm. formaldehydi tai VOC-yhdisteet), irttoavat kuidut (mm. mineraalivilla tai asbesti) sekä polttoprosesseissa syntyvät pienhiukkaset (mm. PM10 tai PM2,5). (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje osa I, 2016, 2 §).

Kemiallisten tekijöiden mittaus tulee tapahtua noin 1,1 metrin korkeudesta tilan keskeltä. Mittaus suoritetaan tilasta, jossa uskotaan esiintyvän eniten kyseessä olevaa haitallista yhdistettä. Ilmanvaihto on normaalisti toiminnassa sekä tuuletusreitit oltava suljettuina. (Asumisterveysasetus 545/2015, 14 §.)

”Haihtuvilla orgaanisilla yhdisteillä (VOC) tarkoitetaan orgaanisia yhdisteitä, joiden sulamispiste on huoneilman normaalilämpötilaa alhaisempi ja niiden kiehumispiste on n. 50–260 °C.” (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje osa I, 2016, 2 §). Orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuudesta käytetään kirjainyhdistelmää TVOC. Mikäli TVOC pitoisuus on yli 400 µg/m³ voidaan ilmassa katsoa olevan tavanomaista korkeampi määrä orgaanisia yhdisteitä.

Hengitettävillä hiukkasilla PM10 tarkoitetaan hiukkasia, joiden halkaisija on enintään 10 µm. Tämänkaltaisilla hiukkasilla on mahdollisuus kulkeutua ihmisen ylempiin hengitysteihin, keuhkoputkeen ja saada aikaan keuhkojen vajaatoimintaa. Katupöly kuuluu tähän hiukkasluokkaan. (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje osa I, 2016, 2 § & Eurovent 2020, 7.) Asumisterveysasetus mainitsee

hengitettävistä hiukkasista seuraavasti: ”Hengitettävien hiukkasten (PM10) pitoisuus sisäilmassa 24 tunnin mittauksen aikana saa olla enintään 50 µg/ m³.” (Asumisterveysasetus 545/2015, 19 §).

Pienhiukkasilla PM2,5 tarkoitetaan hiukkasia, joiden halkaisija on enintään 2,5 µm. Hengitysteihin päästessään voivat kulkeutua keuhkorakkuloihin aiheuttaen keuhkojen vaajatoimintaa ja silmä- ja iho-ongelmia. Puu palaessaan synnyttää ilmaan tähän luokkaan kuuluvia hiukkasia (Asumisterveysasetuksen soveltamisohje osa I, 2016, 2 § & Eurovent 2020, 7.) Asumisterveysasetus mainitsee pienhiukkasten pitoisuudesta seuraavasti: ”Pienhiukkasten (PM2,5) pitoisuus sisäilmassa 24 tunnin mittauksen aikana saa olla enintään 25 µg/ m³.” (Asumisterveysasetus 545/2015, 19 §).

Pienhiukkasista kaikkein vaarallisimpia on halkaisijaltaan enintään 1 µm kokoiset PM1 hiukkaset. Niillä on mahdollisuus kulkeutua verenkiertoon aiheuttaen syöpää, sydän- ja verisuonitautia sekä dementiaa. (Eurovent 2020, 7.)

Hiukkaset ovat kooltaan niin pieniä, ettei niitä pysty silmin havaitsemaan. Koko luokkaa voi verrata esimerkiksi ihmisten hiusten keskivertoon paksuuteen, mikä on 70 µm eli 0,07 millimetriä. Hiukkaset ovat siis halkaisijaltaan monin kerroin pienempiä.

2.4.1 Hiilidioksidi

Sisäilmassa esiintyvä hiilidioksidi on peräisin ulkoilmasta sekä ihmisten hengitysilmasta. Ulkoilman hiilidioksidipitoisuutena voidaan pitää noin 720 mg/m³(400 ppm). Sisäilmaan merkittävää hiilidioksidilisää tuo tilassa hengittävät ihmiset, joiden uloshengityksessä vapautuu hiilidioksidia. (Sisäilmayhdistys ry. 2008c.) Hiilidioksidia muodostuu myös kaiken palamisen seurauksena. Sisäilmaan hiilidioksidia voi siis vapautua esimerkiksi kynttilöiden poltosta tai puun poltosta takassa. (Sandberg 2016, 63.) Ihmisen hiilidioksidin tuotto kasvaa sen mukaan, kuinka aktiivinen on fyysisesti. Täydessä levossa hiilidioksidin tuotto on noin 0,2 l/min ja täydessä rasituksessa 2,5–3,0 l/min (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017).

Korkea sisäilman hiilidioksidipitoisuus aistitaan yleensä tunkkaisena ilmaa. Se aiheuttaa väsymystä ja päänsärkyä. Opiskelun ja työskentelyn tehokkuus laskee, keskittyminen heikkenee aiheuttaen rauhattomuutta. Tämä ei ole tietystikään optimitalanne työ- ja koulurakennuksissa. (Harju 2008, 30.)

Hiilidioksidipitoisuutta pidetään ilmanvaihdon riittävyden kannalta oivana mittarina sekä ilmanvaihdon mitoituksen perustana (Sisäilmayhdistys ry. 2008c). Ulkoilmavirran mitoitus suunnitellun käytön hiilidioksidikuormituksen perusteella tulisi tapahtua, mikäli tilan käyttötarkoituksesta aiheutuu lisäilmavirran tarvetta. Näin voidaan varmistaa sisäilman hiilidioksidiarvojen pysyminen tavoitearvoissa. Ihmisen fyysinen aktiivisuus eli aineenvaihdunnan tehon mittari vaikuttaa hiilidioksidituottoon. Ihmisen kokonaislämmönluovutus ja hiilidioksidituotto saadaan laskettua aineenvaihdunnan tehon eli metabolisen ekvivalentin avulla. Ihmiselle on määritetty erilaisia metabolisen ekvivalentin arvoja eri fyysisen aktiivisuuden tilanteissa. Taulukko 4 näyttää eri aktiivisuuden kokonaislämmönluovutuksen ja hiilidioksidin tuoton. (Tilan ulkoilmavirran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella 2018.)

MET	Aktiviteetti, kokonaislämmönluovutus (W) ja hiilidioksidituotto (dm ³ /h)
0,8	nukkuminen, 84 W ja 12,4 dm ³ /h
1,0	rauhallinen istuminen, 104 W ja 15,4 dm ³ /h
1,2	toimistotyö, seisominen, 125 W ja 18,5 dm ³ /h
1,4	opetustyö, 146 W ja 21,6 dm ³ /h
1,6	rauhallinen liikkuminen, 167 W ja 24,7 dm ³ /h
1,8	myymälätyö, 188 W ja 27,8 dm ³ /h
2,0	kävely (3,2 km/h), 209 W ja 30,9 dm ³ /h
6,0	reipas kävely (8,0 km/h), 626 W ja 92,7 dm ³ /h
7,0	squash/koripallo, 731 W ja 108,1 dm ³ /h

Taulukko 4. Eri aktiivisuuden arvot. (Tilan ulkoilmavirran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella 2018).

Asumisterveysasetuksen mukaan sisäilman hiilidioksidin toimenpideraja ylittyy, mikäli pitoisuudeksi mitataan 2100 mg/m³ (1150 ppm) suurempi arvo kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus (Asumisterveysasetus 525/2015).

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta antaa oman näkemyksensä. ”Sisäilman hiilidioksidin hetkellisen pitoisuuden suunnitteluarvo huonetilan suunniteltuna käyttöaikana voi olla enintään $1\,450\text{ mg/m}^3$ (800 ppm) suurempi kuin ulkoilman pitoisuus” (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 5 §). Myös sisäilmaluokitus antaa oman näkemyksensä hiilidioksidipitoisuuksiin eri sisäilmastoluokissa. Sisäilmastoluokituksen perusteella sisäilman hiilidioksidipitoisuuden suurimmat sallitut arvot ovat:

- Sisäilmastoluokka S1 350 ppm + ulkoilman hiilidioksidipitoisuus
- Sisäilmastoluokka S2 550 ppm + ulkoilman hiilidioksidipitoisuus
- Sisäilmastoluokka S3 800 ppm + ulkoilman hiilidioksidipitoisuus. (Sisäilmaluokitus 2018.)

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus haitallisiksi tunnetuista pitoisuuksista käsittelee työpaikan ilman epäpuhtauksille asetettuja arvoja. Tässä asetuksessa annetaan hiilidioksidin 8 tunnin aikapainotetuksi keskiarvorajaksi 5000 ppm, mikä voi kuulostaa varsin korkealta ja on moninkertainen verrattuna muihin asetuksiin (Sosiaali- ja terveysministeriö, HTP-arvot 2020, 36). Asetus antaa myös haitallisemmille aineille raja-arvot 15 minuutin altistuksessa, mitä se ei ole määrittänyt ollenkaan hiilidioksidille. 5000 ppm on raja, millä hiilidioksidin haittavaikutuksia voidaan estää. Muiden asetusten antamat matalammat rajat kertovat lähinnä sen, kuinka hyvin ilmanvaihto toimii. Hiilidioksidin arvot tulisi olla yllä mainittuihin rajoihin nähden moninkertaiset, että ne aiheuttaisivat merkittäviä terveyshaittoja.

3 Ilmanvaihdon tarkastelu

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen uudesta sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta mainitsee rakennuksen ilmanvaihdosta seuraavasti:

Ilmanvaihdon on toteutettava terveellinen, turvallinen ja viihtyisä sisäilman laatu oleskelutiloissa. Ilmanvaihtojärjestelmän on tuotava rakennukseen riittävä ulkoilmavirta ja poistettava sisäilmasta terveydelle haitallisia aineita, liiallista kosteutta, viihtyisyyttä haittaavia

hajuja sekä ihmisistä, rakennustuotteista ja toiminnasta sisäilmaan aiheutuvia epäpuhtauksia.

Ilmanvaihtojärjestelmä on suunniteltava siten, että:

- 1) valitun ilmanvaihtojärjestelmän toiminnan kannalta keskeisiä toimintoja voidaan mitata, ohjata ja seurata;
- 2) oikein käytettynä, huollettuna ja kunnossapidettynä järjestelmä kestää toimintakuntoisena suunnitellun käyttöiän;
- 3) järjestelmän toiminta voidaan kokonaisuudessaan pysäyttää. Koneellisessa järjestelmässä on oltava selvästi merkitty pysäytyskytkin, jonka on oltava helposti saavutettavassa paikassa. Painovoimaisessa järjestelmässä ilmanvaihtoventtiilien on oltava helposti suljettavissa. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 3 luku, 8 §.)

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta mainitsee myös ilmanvaihdon suunnitelluille arvoille sallitut poikkeamat, jotka ovat:

- 1) ilmavirta järjestelmä- ja huoneistokohtaisesti ± 10 prosenttia;
 - 2) ilmavirta huonekohtaisesti ± 20 prosenttia, kuitenkin siten, että poikkeama voi aina olla vähintään $1 \text{ dm}^3/\text{s}$;
 - 3) ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähköteho $+ 10$ prosenttia.
- Hyväksyttävät poikkeamat sisältävät sekä mittaustuloksen poikkeamat että mittausepävarmuuden, joka on esitettävä mittaustulosten yhteydessä. Mittausmenetelmän ja mittauslaitteiden on sovellettava mitattavan ilmavirran mittaukseen. Mittauslaitteiden on oltava kalibroituja, kalibroinnin on oltava voimassa ja mittausarvoa on korjattava kalibroinnin mukaan suljettavissa. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 4 luku, 27 §.)

3.1 Yleisimmät ilmanvaihtojärjestelmät Suomessa

Ilmanvaihto voi olla toteutettu koneellisella poistoilmanvaihdolla, koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla tai painovoimaisella ilmanvaihdolla. Koneellisessa poistoilmanvaihdossa ideana on, että rakennuksen poistoilman vaihto tehdään koneellisesti esimerkiksi huippuimurilla tai poistoilmaventtiin päälle asennetulla puhalltimella. Puhallin voi olla päällä jatkuvasti tai toimia valokatkaisimesta. Ilmanvaihto on tasaisempaa, mitä painovoimaisessa ilmanvaihdossa. Suurin ongelma koneellisessa poistoilmanvaihdossa on tarpeeksi riittävän korvausilman saanti, sillä tuloilma tuodaan sisään korvausilmaventtiileiden kautta. Korvausventtiileitä on usein liian pieni määrä, mikä aiheuttaa sen, että poistoilmanvaihto imaisee sisään tulevan korvausilman rakenteiden liitoksien kautta. Täten

korvausilma tuo mukanaan epäpuhtauksia. Korvausilman tulo sisään voi aiheuttaa vedon tunnetta, sillä ilman jakotapa ei ole välttämättä optimi. (Hengitysliitto 2022.) Kyseinen ilmanvaihtojärjestelmä oli vallitseva vuosina 1965–1980. Järjestelmää on kuitenkin asennettu vielä vuosituhannen vaihteeseen asti. (Sandberg 2016, 115.)

Tänä päivänä suosituin ilmanvaihtojärjestelmä on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto lämmöntalteenotolla, sillä sen avulla pystytään parhaiten huomioimaan energiatehokkuus. Koneellisessa tulo- ja poistoilmanvaihdossa molemmat ilmat (tulo- ja poistoilma) liikutetaan ilmanvaihtokoneen kautta. Ilmamäärä voidaan säätää tarkasti, millä saadaan luotettava ja tasainen ilmanvaihto. Ilmanvaihtokoneeseen asennetaan usein lämmöntalteenotto, jossa ulosmenevä poistoilma toimii lämmittävänä tuloilmalle lämmönsiirtimen avulla. Suodattimien käyttö on myös yksi tulo- ja poistoilmanvaihdon merkittävä etu. Suodattimet estävät ulkoa tulevien pölyjen pääsyn rakennuksen sisään. (Hengitysliitto 2022.) Koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmää alettiin käyttää eniten 1980-luvulta eteenpäin (Sandberg 2016, 118).

Painovoimainen ilmanvaihto toteutetaan ulko- ja sisäilman lämpötilaerojen ja tuulen aiheuttaman paine-eron avulla. Korvausilmaventtiileiden kautta sisälle oleskelutiloihin tuleva ulkoilma poistuu paine-eron ansiosta likaisten tilojen poistoilmaventtiileistä poistoilmahormeihin, jotka jatkuvat vesikaton yläpuolelle. Ongelmana tässä ilmanvaihtojärjestelmässä on sään vaikutus toimivuuteen. Lämpimällä ja tuulettomalla säällä järjestelmä toimii varsin huonosti, kun taas kylmällä ja tuulisella säällä ihan hyvin. Energiantehokkuus on heikkoa verrattuna koneelliseen tulo- ja poistoilmanvaihtoon, sillä poistoilman lämpöenergiaa ei saada hyödynnettyä. Korvausilmaventtiileiden lähellä saattaa esiintyä vedon tunnetta, mikä on tämän järjestelmän heikkous. Painovoimaista ilmanvaihtoa on käytetty melkein pelkästään 1960-luvulle asti. (Hengitysliitto 2022.)

3.2 Koulurakennusten ilmanvaihto

Koulurakennuksissa käytetään nykyisin koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtoa. Tuloilma tuodaan venttiileiden kautta ”puhtaisiin tiloihin” ja poistoilma poistetaan ”likaisista tiloista”. Poistoilman vaativia tiloja kutsutaan usein myös hygieniati-loiksi. Puhtaita tiloja ovat käytävät, aulat, työ- ja luokkahuoneet. Hygieniatiloja ovat WC-, varasto- sekä taide- ja taitoainetilat. Tulo- ja poistoilmavirrat suunnitellaan yleensä yhtä suuriksi esimerkiksi luokkatiloissa. Käytäviin voidaan tuoda enemmän tuloilmaa, sillä tavalla, että käytävistä johdetaan siirtoilmaa WC- ja varastotiloihin, mistä pelkästään poistetaan ilmaa. Täten rakennuksen tulo- ja poistoilmavirrat saadaan tasapainoon. (Sandberg 2016, 97).

Koulurakennuksien ilmanvaihdossa tulee varautua vaihteleviin ihmismääriin tilan eri osissa, sillä tilat tehdään nykyään aiempaa monikäyttöisemmäksi. Jokaiselle alueelle tulee kuitenkin minimissään johtaa 0,35 dm³/s, m² suuruinen ulkoilmavirta. (FINVAC ry. 2019. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa.) Koulurakennuksille pätee samat laatuvaatimukset ilmanvaihdon ja sisäilmaston osalta kuin muihinkin asunto-, toimisto- ja päiväkotitiloihin.

Käyttöaikana koulujen ilmanvaihtojärjestelmän tulisi olla mitoitettu minimissään 6 dm³/s henkilöä kohden. Käyttöaika opetustiloissa on yleensä klo 08:00-16:00, mutta todellinen käyttöaika on tarkistettava. Käyttöajan ulkopuolella ilmanvaihdon tulee olla minimissään 0,15–0,2 dm³/s neliometriä kohden. Kaksi tuntia ennen käyttöajan alkamista ilmanvaihdon tulee olla normaalilla teholla. (Sisäilma-luokitus 2018.) Sisäilmastoluokitus antaa myös taulukossa 5 koulutilojen ulkoilmavirroille normaalin käyttötilanteen eri mitoitusarvot eri sisäilmaluokkien mukaan, jotka ovat seuraavanlaiset:

Tila	Lattia- ala (m ² /hlö)	S1- luokka (dm ³ /s, hlö)	dm ³ /s, m ²	S2- luokka (dm ³ /s, hlö)	dm ³ /s, m ²	S3- luokka, (dm ³ /s, hlö)	dm ³ /s, m ²
Opetustila	2	11	5,5	8	4,0	6	3,0

Luento- sali		10		8		6	
-----------------	--	----	--	---	--	---	--

Taulukko 5. Ulkoilmavirtojen mitoitusarvot (Sisäilmaluokitus 2018).

Hygieniatilat tulisi mitoittaa käytön ja käyttäjämäärien mukaan. WC- ja suihkutilat mitoitetaan yleensä WC-istuinten ja suihkujen lukumäärän perusteella. Mitoitusarvot taulukossa 6:

Tila/käyttötarkoitus	Ulkoilmavirta dm ³ /s, m ²	Poistoilmavirta dm ³ /s, m ²	
WC		20 dm ³ /s, istuin	
Suihkutilat		16 dm ³ /s, suihku	
Henkilökunnan pukuhuoneet		4 dm ³ /s, hlö	
Porrashuone	0,5 1/h	0,5 1/h	

Taulukko 6. Poistoilmavirtojen mitoitusarvot (FINVAC ry 2019).

Poistoilmoille on asetettu erilaiset vaatimukset täyttävät poistoilmaluokat. Näitä luokkia on neljä eri tasoista vaativuuden mukaan. Asetuksen 1009/2017 mukaan poistoilmaluokat ovat:

- Luokka 1: poistoilma sisältää vain vähän epäpuhtauksia ja epäpuhtaudet ovat pääasiallisesti lähtöisin ihmisistä ja rakenteista
- Luokka 2: poistoilma sisältää jonkin verran epäpuhtauksia
- Luokka 3: poistoilma sisältää epäpuhtauksia, kosteutta, kemikaaleja tai hajuja, jotka oleellisesti huonontavat poistoilman laatua
- Luokka 4: poistoilma sisältää huomattavasti pahanhajuisia tai epäterveellisiä epäpuhtauksia tai kemikaaleja. (Asetus 1009/2017, 3 luku, 13 §.)

Koulurakennuksen tiloista esimerkiksi opetustilojen tulisi kuulua vaativimpaan luokkaan 1. Pukuhuoneille, ruokailutiloille ja varastoille on vaatimuksena luokka 2. WC- ja peseytymistilat ja ulkoiluvälinevarastot kuuluvat luokkaan 3. Koulun laboratoriotyötiloissa voi olla esimerkiksi vetokaappeja tai kemikaalien

säilytyskaappeja, jotka kuuluvat 4. luokkaan. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017, 13 §; Talotekniikkainfo 2018).

3.3 Ilmansuodatus

Ilmanvaihdon suodattimet huolehtivat siitä, ettei sisäilmaan pääse ulkoa tulevia epäpuhtauksia muun muassa katu- tai siitepölyä sekä pienhiukkasia. Ilmanvaihdon suodattimet tulee vaihtaa tietyn ajan välein, yleensä vaihtovälinä suositellaan kaksi kertaa vuodessa. Likainen, tukossa oleva suodatin ei ole tehokas ja voi aiheuttaa muiden ilmanvaihtojärjestelmän osien vioittumista. Tästä voi syntyä riskiä paloturvallisuuden näkökulmasta. (Hengityслиitto 2022.)

Suodattimien tulee olla tyypiltään oikeaan paikkaan suunnitellut. Eri tilaan tulee erilaiset suodattimet. Kumottu standardi SFS-EN 799 vastasi vuoteen 2018 asti eri suodatinluokituksista. Standardi määritteli hiukkassuodatuksen tehokkuuden 0,4 µm hiukkasille. Tämän standardin pohjalta on todennäköisesti päätetty koulun suodatintyypeistä. Suodattimet voidaan jakaa pääsääntöisesti karkeasuodattimiin (G1-G4), perussuodattimiin (M5 ja M6) sekä hienosuodattimiin (F7-F9) (Sandberg 2014, 212 ja 213). Hienosuodattimet pystyvät nimensä mukaisesti estämään kaikista pienimpien hiukkasten pääsyn läpi. Ilmansuodatusstandardi SFS-EN 16890 ohjaa nykyisin suodatintyyppin valinnassa. Standardi poikkeaa aiemmasta sillä tavoin, että se määrittelee hiukkassuodatuksen tehokkuuden kaikille kolmelle eri kokoluokille: PM10, PM2,5 ja PM1. (Eurovent 2018).

4 Sisäilmaongelmat

Sisäilmaongelmat ja niiden selvitys on haastavaa työtä. Koulujen sisäilman laatuakaan, kun ei voi aina välttämättä luotettavasti arvioida oppilaiden oireilun perusteella, sillä oireilun ja huonojen olosuhteiden yhteys on usein varsin heikko (THL 2020). Sisäilmaongelmat ovat olleet paljon pinnalla viime aikoina, niinpä

niihin onkin toivottua tehdä selvitystä. Hengitysliiton mukaan työikäisistä ihmisistä melkein 0,5 miljoonaa on kärsinyt sisäilmaongelmista vuoden 2019 aikana (Hengitysliitto 2022b).

4.1 Sisäilmaongelmien syyt

Sisäilmaongelmiin ei voi sanoa yhtä yleistä syytä. Ongelmien syntyyn voi vaikuttaa moni tekijä suunnittelu-, rakennus- tai korjausvaiheessa sekä käytössä olevassa rakennuksessa. Rakennus- tai korjaamisvaiheen valvonta on todella tärkeässä roolissa ongelmien syntymisen kannalta, sillä sen tehtävänä on huolehtia, että suunnittelu ja työ toteutetaan määräysten ja ohjeiden mukaan. (Hengitysliitto 2020.) Rakennusvaiheessa rakennuksen säältä suojaaminen, riittävät aikataulut, oikeanlaiset rakennustavat ja käytettävät rakennusmateriaalit ovat merkittävässä roolissa siihen, että rakennuksesta saadaan terveellisesti laadukas (Homepakolaiset ry).

Kosteus- ja mikrobiongelmat muodostuvat usein sen seurauksena, kun rakenteet ja materiaalit eivät kestä niihin kohdistuvaa kosteusrasitusta. Rakennuksen sijainti maaperän kannalta on myös tarkasti mietittävä asia kosteus- ja mikrobiongelmiin estossa. (Raksystems 2022.) Rakennusta tulee huoltaa ja ylläpitää asianmukaisella tavalla. Siivoaminen, puhtaanapito ja teknisten järjestelmien oikeanlainen käyttö on avainasemassa. Rakennusmateriaaleista tai sisustustavaroista voi syntyä kemikaali- tai pölypäästöjä, jotka altistavat oireille. (Hengitysliitto 2020.)

Yleisimmin ongelmien taustalla on puutteellisesti toimiva ilmanvaihto. Haitallisen suuret paine-erot ilmanvaihtojärjestelmässä ovat erityisesti huomioon otettava tekijä epäpuhtauksien kulkeutumisessa rakennukseen. Liian suuri alipaineisuus voi imeä rakenteista epäpuhtauksia sisätilaan. (Raksystems 2022.) Rakennuksen vaipan tulisi olla pitävä, ettei siitä pääse irtoamaan epäpuhtauksia. Ilmanvaihdon toiminnan edellytys on se, että suodattimet vaihdetaan ja kanavat puhdistetaan aika ajoin. Oppilaitosten sisäilmaongelmat voivat johtua puhtaasti siitä, että ilmanvaihto on mitoitettu väärin. Luokkakoot voivat olla

todellisuudessa säästämisen takia suurempia kuin mitä ilmanvaihdon mitoituksessa käytetyt ihmismäärät. (Harju 2008, 37.)

4.2 Sisäilmaongelmien vaikutukset ihmiseen ja yhteisöön

Sisäilmaongelmilla ei ole pelkästään seurauksia ihmisen omalle terveydelle. Ongelmat voivat ulottua taloudellisiin vaikeuksiin asti riippuen siitä, missä rakennuksessa sisäilmaongelmat esiintyvät. Mikäli sisäilmaongelmia havaitaan omassa kodissa voi seurauksena olla nimenomaan taloudellisia vaikeuksia tai masennusta, kun ongelmia lähdetään korjaamaan. (Hengitysliitto 2022b.) Työpaikan, koulun tai muun vapaa-ajanviettopaikan sisäilmaongelmat voivat johtaa siihen, että oireileva henkilö ei pysty olemaan tilassa. Tämä voi johtaa erinäisiin järjestelyihin, esimerkiksi etätyöskentelyyn tai pahimmassa tapauksessa työpaikan tai koulun vaihtamiseen, jos oireet eivät hellitä.

Huono sisäilma voi aiheuttaa hyvin moninaisia terveysvaivoja ja oireita. Näihin on syynä usein kosteus- ja homeongelmat. Tunkkainen tai kuiva ilma, vähäinen ilmanvaihto, vetoisuus ja epämiellyttävät hajut ovat yleisimpiä olosuhdehaittoja, jotka huomataan aistein. Oireina näistä voi olla esimerkiksi hengitysteiden ärsytystä, päänsärkyä sekä väsymystä. Yleensä esiintyy silmien, nenän ja kurkun ärsytysoireita. (Hengitysliitto 2022b.) Kouluissa todetuilla sisäilmaongelmilla on vaikutusta keskittymiseen, muistiin ja kognitiivisen kyvyn heikkenemiseen. Haastavaksi arvioinnissa tekee sen, että tämänkaltaiset oireet voivat johtua paljon muustakin. (Homepakolaiset ry.) Rakennuksen kosteusvaurioilla voidaan katsoa olevan kohtalainen yhteys astmaa sairastavien oireisiin ylähengitysteissä, astman puhkeamiseen, yskään, hengityksen ahdistukseen ja vinkumiseen. Tälle on todistettavasti lääketieteellistä näyttöä. (Hengitysliitto 2022b.)

Sisäilman laaduttomuuden takia oppilaan sairastumista voidaan pitää syrjäytymisuhkana. Syrjäytyminen ja sairaanhoitokustannuksista tulee iso hintalappu yhteiskunnalle. Myös opettajien ja muun henkilökunnan sairauspoissaolot ovat suuri kuluerä kunnalle. Äänen käyttöön liittyviä ongelmia voi esiintyä erityisesti opettajilla, sillä he joutuvat olemaan paljon äänessä työpäivän aikana. Ääni voi

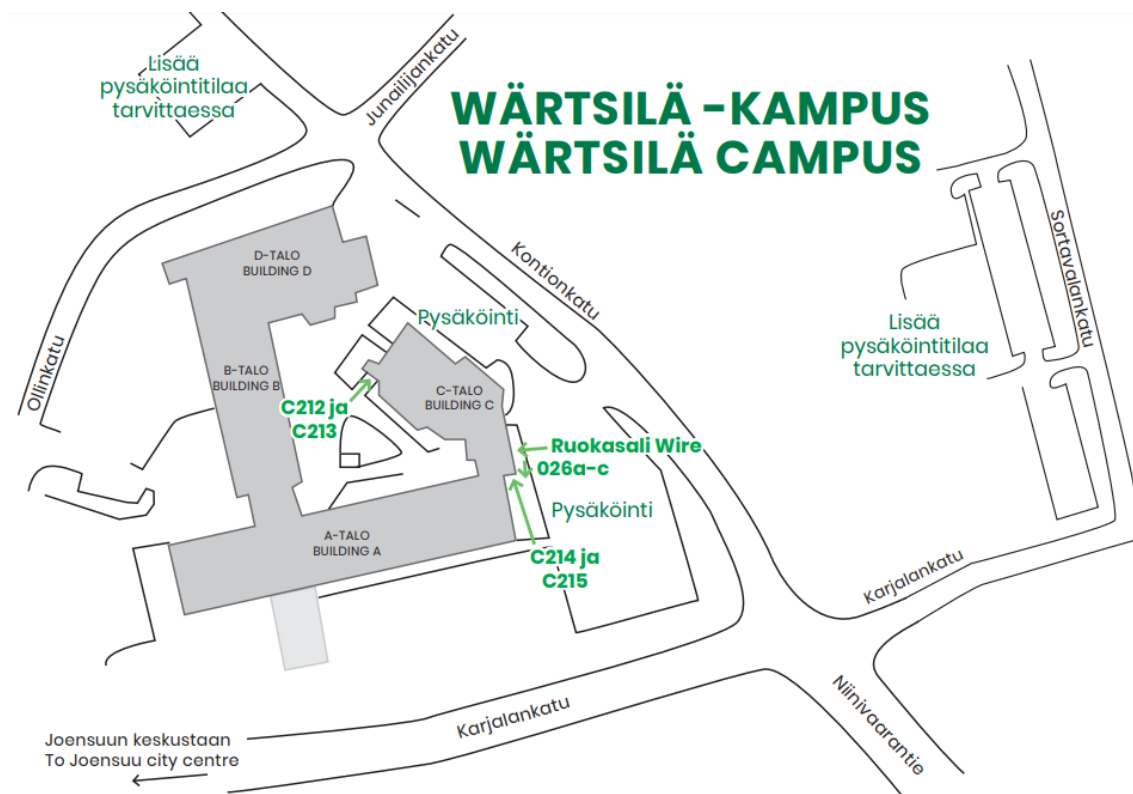
olla käheää. OAJ:n ja Turun yliopiston teettämän kyselyn mukaan joka kolmannella opettajalla esiintyy kyseisiä vaivoja. (OAJ 2017. Koulutus-, kasvatus- ja tutkimusalan Sisäilmatutkimus.) Ihmiselle voi myös toisaalta kehittyä pitkäaikainen oireiluerkkyys eri kemikaaleille eli ympäristöherkkyys, vaikka sisäilman laadussa ei olisi todettuja puutteita (Pekkanen 2019).

5 Kohteen esittely

Karelia-ammattikorkeakoulun Wärtsilä-kampus on Joensuussa sijaitsevan ammattikorkeakoulun toinen kampusrakennus. Rakennus sijaitsee osoitteessa Karjalankatu 3. Wärtsilä-talo on pinta-alaltaan noin 8 700 m² jakautuen kolmeen eri kerrokseen. Pohjakerros on noin 2700 m², 1. kerros noin 3300 m² ja 2. kerros noin 2100 m². Rakennus jakautuu A-, B-, C- ja D-taloihin. A-, B- ja D-taloissa on lähinnä opetustiloja ja henkilökunnan tiloja. D-talossa sijaitsee kampuksen ravintola- ja keittiötilat. Wärtsilä-talo on alun perin rakennettu vuonna 1961. Vanhimmat osat eli A- ja B-talot on peruskorjattu 15 vuotta sitten. C-siipi on rakennettu vuonna 1986.

Wärtsilä-kampuksella opiskelee noin 1800 opiskelijaa muun muassa liiketalouden, tekniikan, matkailun ja luonnonvara-alan koulutuksissa. Kuvassa 1 on havainnollistava esitys kampusalueesta. (Pohjoiskarjala.net 2021).

Wärtsilän-kampuksen A-talo, jossa sisäilman laadun mittauksia suoritetaan, voidaan luokitella rakennusvuoden mukaan 1950–1960-lukujen tiiliverhoiluksi betonirakennukseksi. Rakenteina kantavassa rungossa on tyypillisesti paikallavallettu pilaripalkki-runko sekä betonimateriaaliset välipohjarakenteet. Julkisivuna on tiilimuuri, jossa seinän sisäpuolella on lämmöneristeet ja tiili- tai betonimateriaalin sisäkuori. Alapohjarakenteet ovat yleensä maanvastaisia, betonisia alapohjarakenteita tai ryömintätilaisia alapohjarakenteita. (Valtioneuvoston kanslia 2023a).



Kuva 1. Wärtsilä-kampus kartalla (Karelia 2021).

5.1 Kohteen ilmanvaihto

Kohteen ilmanvaihto on luultavasti alun perin toiminut koneellisena poistona huippuimurein. Ilmanvaihtoa on uusittu ajan kuluessa nykyaikaisempaan suuntaan. Kampuksen ilmanvaihto on nykyisin toteutettu koneellisella tulo- ja poistoilman vaihdolla. Ilmanvaihto perustuu usein vakioilmavirtaan eli niin sanottuun CAV-järjestelmään (Constant Air Volume System). Yleensä ilmanvaihtokoneissa on myös lämmöntalteenotto (LTO). 2000-luvun puolella ilmamääräsäätimet (IMS) ovat yleistyneet. Kohteen märissä tiloissa on huippuimurit. Rakennuksen ilmanvaihtokoneet on sijoitettu kohteessa sijaitsevaan IV-konehuoneeseen. Ilmanvaihtokanavat ovat materiaaliltaan peltisiä kierresaumakanavia. (Valtioneuvoston kanslia 2023b.)

Tarkasteltavien tilojen ilmanvaihto on toteutettu ns. sekoittavaa ilmanvaihtoperiaatetta käyttäen, missä tuloilma tuodaan läheltä kattoa melko suurella nopeudella.

6 Toiminnallinen osuus (mittaukset)

Toiminnallisen osuuden tarkoituksena on kertoa sekä suorittaa kyseessä oleva tutkimus. Sisäilman mittaukset suoritetaan selvittääksemme, toteutuuko kohteessa vaaditut tavoitetasot ja vaatimukset. Mittaukset paljastavat mahdolliset ongelmakohdat. (Sandberg 2016, 69.)

6.1 Mittaussuunnitelma

Sisäilman laatua arvioitaessa suoritettiin olosuhteiden pidempiaikainen sekä hetkellinen seuranta. Pidempiaikaisen seurannan kestoksi päätettiin vähintään 9 päivää. Mittarit asennettiin tiloihin 14.3 illalla. Siitä hetkestä alkaen mittarit lähettävät tietoa. Tilojen hetkelliset olosuhteet mitattiin yhden päivän aikana 31.3. Mittaukset suoritetaan kuudesta eri luokkatilasta, jotka sijaitsevat Wärtsilä-kampuksen A-talon 2. kerroksessa. Tilat ovat toimistotilat 217, 223c, 228, tietokoneluokat 227 ja 220 sekä teorialuokka 229. Mitattavat tilat esiintyvät punaisella rajattuna kuvassa 2.



Kuva 2. Wäertsilä-kampuksen A-talon 2.kerros.

Oheisessa taulukossa 7 on eritelty tutkittavat tilat sekä niiden pinta-alat ja tilavuudet. Tilojen pinta-alat otettiin ilmanvaihtosuunnitelmista ja tilavuus laskettiin 3,3 metrin huonekorkeudella, mikä otettiin suunnitelmista.

<i>Tila</i>	<i>Pinta-ala (m²)</i>	<i>Tilavuus (m³)</i>
217	49	166
220	42,5	144,5
223c	20,6	70
227	85	289
228	42	143
229	85	289

Taulukko 7. Mitattavat tilat.

6.1.1 Pidempiaikainen olosuhdeseuranta

Jokaiseen tilaan asennettiin mahdollisuuksien mukaan kahdeksan eri langatonta IoT-sensoria, jotka esitetty taulukossa 8. Taulukossa 8 esitetty

mittarin valmistaja, malli, tyyppi, tiedonsiirtotapa, suureet jotka mittarilla mahdollista mitata, käyttölämpötila, mittausalue ja -tarkkuus, IP-luokitus sekä mittausdatan sijainti. Connected Finlandin mittareiden tiedon tallennus- ja lähetysväli on oletuksena 30 minuuttia. 10 minuutin tiedon tallennusväliä käytettiin Celsicomin ja Ruuvi Technologiesin laitteissa.

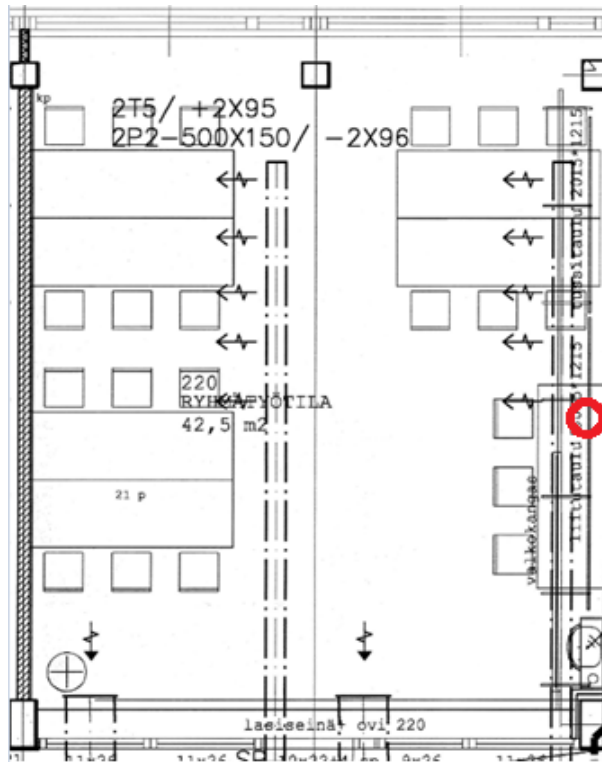
Laitevalmistaja	Malli	Tyyppi	Tiedonsiirto	Mitattavat suureet	Käyttölämpötila	Mittausalue	Mittaustarkeys	IP-luokitus	Näyttö	Lisätietoja
Ruuvi Technologies	RuuviTAG	Paristokäyttöinen Langaton	Bluetooth Low Energy	Lämpötila Ilmankosteus Ilmanpaine Liike	-20 .. 70 °C	-20 °C .. +70 °C 0 .. 100 RH% 300 -1200 hPa	±0,2 °C @ 5..60 °C ±2 RH%, 120...80 %, 25 °C ±1 hPa	IP67	Ei	Vaatii Ruuvi Gatewayn tai kännykkäsovelluksen
Connected Finland	Airwits CO2 Plus	Paristokäyttöinen Langaton	Sigfox	Lämpötila Ilmankosteus CO ₂	10 .. 50 °C	0 .. 50 °C 0 .. 95 RH% 0 .. 5000 ppm	±0,2 °C ±2 RH% ±3 RH%	IP20	On	Datat Karelian Azure pilvipalvelussa
Connected Finland	Airwits IAQ	Paristokäyttöinen Langaton	Sigfox	Lämpötila Ilmankosteus TVOC	0 .. 60 °C	0 .. 60 °C 10 .. 95 RH% 0 .. 60 000 ppb	±0,2 °C ±2 RH% ±15 RH%	IP20	Ei	Datat Karelian Azure pilvipalvelussa
Connected Finland	Airwits PM	Paristokäyttöinen Langaton	Sigfox	Lämpötila Ilmankosteus PM1 PM2,5 PM10	-10 .. 60 °C	-10 .. 60 °C 0 .. 95 RH% 0 .. 1000 µg/m ³	±0,2 °C ±2 RH% ±10µg/m ³ (0 .. 100µg/m ³) ±10% (100 .. 1000 µg/m ³)	IP20	Ei	Datat Karelian Azure pilvipalvelussa
Connected Finland	Airwits	Paristokäyttöinen Langaton	Sigfox	Lämpötila Ilmankosteus	-40 .. 90 °C	-40 .. 90 °C 0 .. 100 RH%	±0,2 °C ±2 RH%	IP20	Ei	Datat Karelian Azure pilvipalvelussa
Connected Finland	PressGuard	Paristokäyttöinen Langaton	Sigfox	Lämpötila Paine-ero	-20 .. 85 °C	-20 .. 85 °C -500 .. 500 Pa	±2 °C ±0.1 Pa or 3% of reading	IP20	Ei	Datat Karelian Azure pilvipalvelussa
Kontakt.io	Portal Beam	Paristokäyttöinen Langaton	Bluetooth	Lämpötila Ilmankosteus Valoisuus Liike CO ₂ e Ilmanlaatu Paine	-40 .. 85 °C	-40 .. 85 °C 0 .. 100 RH% 1 .. 100 % N/A 0 .. 1000 ppm 0 .. 255 (index) 300 .. 1100 hPa	±1 °C	IP20	Ei	Datat Kontakt.io-portaalissa
Celsicom	Easy Connect TH600	Paristokäyttöinen Langaton	NB-IoT	Lämpötila Ilmankosteus	-30 .. 70 °C	-30 .. 70 °C 0 .. 100 RH%	±0,5 °C ±3 RH%	IP43	Ei	Datat Celsicom-portaalissa
Celsicom	Easy Connect TH601B	Paristokäyttöinen Langaton	NB-IoT	Lämpötila Ilmankosteus	-30 .. 70 °C	-30 .. 70 °C 0 .. 100 RH%	±0,5 °C ±3 RH%	IP53	Ei	Datat Celsicom-portaalissa

Taulukko 8. Tutkimuksessa käytetyt mittarit.

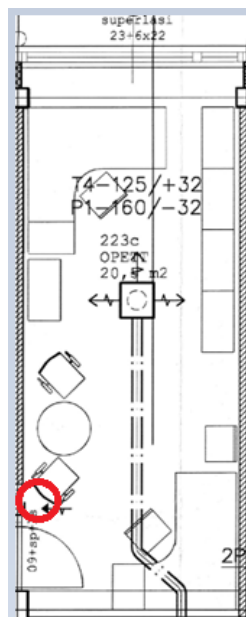
Sisäilman laadun tutkimuksessa seurattiin tilojen lämpötila-, kosteus-, hiilidioksidi-, VOC-, PM- ja ilmanvaihdon paine-ero-arvojen käyttäytymistä useamman päivän aikana. Saatuja tuloksia vertailtiin keskenään ja erinäisten oppaiden/standardien määräyksiin.

Kuvissa 3–7 esiintyy tarkasteltavien tilojen ilmanvaihto suunnitelmat, mistä näkee kanavien ja päätelaitteiden sijainnin tiloissa. Kuvissa esiintyvät kalusteet eivät vastaa nykytilannetta. Tilasta 217 ei saatu haltuun pohjakuvaa, minkä takia sitä ei esiinny kuvissa. Sisäilman olosuhteita seuraavat langattomat IoT-mittarit asennettiin kuvissa esiintyvän punaisen ympyrän kohdalle pääsääntöisesti tiloissa olevan kaapin ulkoseinälle noin 1,5 metrin korkeuteen, niin etteivät ne aiheuttaisi haittaa tilan seinäpinnoille eikä niihin aiheutuisi häiriötä esimerkiksi pattereista tai suorasta auringonvalosta. Kaikki muut taulukossa 7 esiintyvistä mittareista asennettiin kaapin seinäpintaan, paitsi Kontakt.io:n Portal Beam

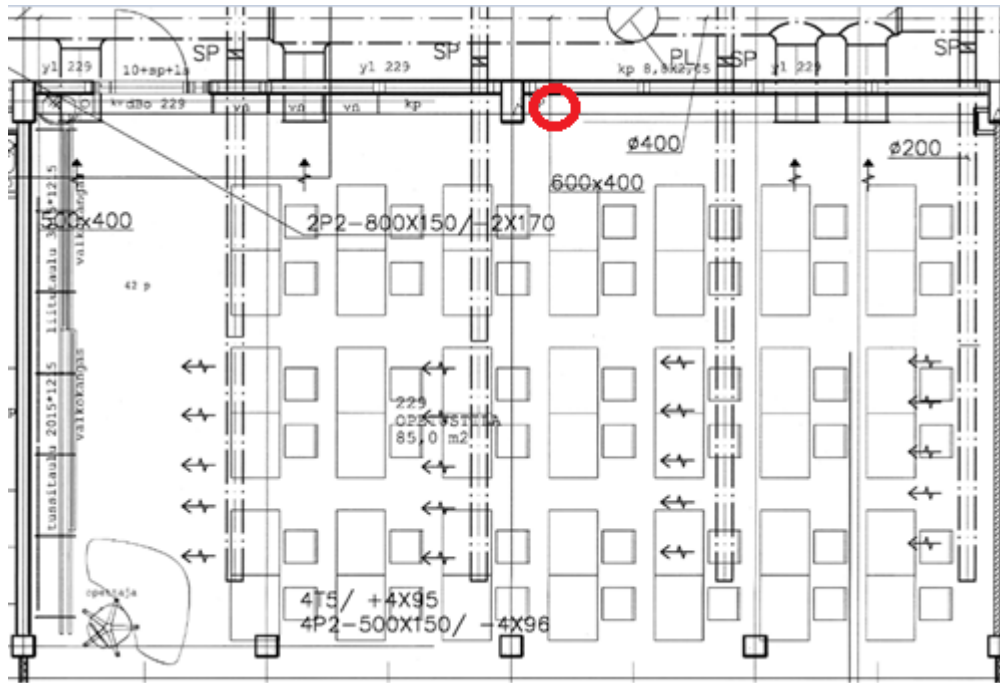
mittari asennettiin kaapin päälle, sillä kyseessä on varsin kookas laite mitä ei seinäpinnalle voi asentaa.



Kuva 3. Tilan 220 Ilmanvaihtosuunnitelma ja mittareiden paikka.



Kuva 4. Tilan 223c Ilmanvaihtosuunnitelma ja mittareiden paikka.



Kuva 7. Tilan 229 Ilmanvaihtosuunnitelma ja mittareiden paikka.

6.1.2 Hetkelliset mittaukset

Mittaukset suoritettiin standardin SFS-EN 12599 mukaisesti. Testo 440 -mittarilla mitattiin hetkellisiä arvoja ilman lämpötilasta, ilman liikenopeudesta, hiilidioksidista ja suhteellisesta kosteudesta. Ilman liikenopeuden mittaamiseen Testo 440 -mittariin kiinnitetään siipipyöräänemometri, joka alkaa pyöriä ilmanvirtauksen ansiosta. Mittari näyttää keskimääräisen ilman nopeuden siipipyörän alalta.

Tilojen mittaukset pyrittiin suorittamaan normaalin käytön mukaan käyttäjien ollessa paikalla tai heti käyttäjien poistuttua tilasta, että saataisiin vertailukelpoisia arvoja. Mittaukset tehtiin huonetilan oleskeluvyöhykkeeltä, mikä ulottuu 0,1 metriä lattiasta 1,8 metriä ylöspäin ja 0,6 metrin päähän seinistä. Mittari asetettiin noin 1,1 metrin korkeuteen lattiasta, mikä on Asumisterveysasetuksessa 545/2015 suositettu korkeus. Operatiivisen lämpötilan mittaamiseen käytettiin pallolämpömittaria, jolla lämpötilaa mitataan tilan keskeltä tai tietyltä työpisteeltä.

Mikäli hetkellinen ja pidempiaikainen olosuhdeseuranta kielii ilmanvaihdon puutteellisuudesta ja antaa näin ollen aihetta ilmavirtojen mittaamiseen, se

suoritetaan. Ilmanvaihdon ilmamäärät voitiin myös laskea säätöpellin mittausyhteisiin asennetun paine-eroanturin mittaamasta paine-erosta.

6.2 Laitteiden esittely, tarkkuus ja kalibrointi

Pidemppään aikavälin mittauksia suoritettiin langattomilla IoT-sensoreilla. Ruuvi Technologiesin RuuviTAG-anturilla saatiin tiedot puhelinsovellukseen bluetooth kantaman päässä olevalla puhelimella.

Connected Finlandin Airwits Plus, Airwits CO2 Plus, Airwits IAQ, Airwits PM ja Airwits PressGuard -sensorit käyttävät Sigfox-verkkoteknologiaa, minkä avulla tulokset lähetettiin Karelian Azure pilvipalveluun. Airwits CO2 Plus kalibroi itsensä automaattisesti puhtaan ilman tasoon verrattuna.

Celsicomin Easyconnect TH600 ja TH601 käyttävät NB-IoT-verkkoteknologiaa, jonka avulla sensorit lähettävät datan Celsicomin omaan pilvipalveluun.

Kontakt i.o:n Portal Beam laitteen mittaama data lähetettiin valmistajan omaan Kio Cloud-palveluun bluetoothin ja asennetun gateway:n avulla.

Kaikkien yhdeksän eri sensorin tarkkuudet ja esittelyt löytyvät taulukosta 8.

Tilojen hetkelliset mittaukset toteutettiin Karelia-ammattikorkeakoulun omistamalla mittarilla. Testo 440 on ammattikäyttöön soveltuva olosuhteiden seurantaan tarkoitettu monitoimimittari. Kalibroidulla Testo 440 mittarilla suoritettiin hetkelliset sisäilman laadun mittaukset. Laitteella mitattiin tilojen ilman lämpötila, operatiivinen lämpötila, ilman liikenopeus, hiilidioksidipitoisuus sekä suhteellinen kosteus (RH %).

Laitteen lämpötilan (NTC) mittausalue on $-40\text{ °C} - +150\text{ °C}$ ja tarkkuutena voidaan pitää

- $\pm 0.4\text{ °C}$ ($-40\text{ °C} - -25.1\text{ °C}$ lämpötiloissa)
- $\pm 0.2\text{ °C}$ ($-25\text{ °C} - +74.9\text{ °C}$ lämpötiloissa)
- $\pm 0.4\text{ °C}$ ($+75\text{ °C} - +99.9\text{ °C}$ lämpötiloissa)
- $\pm 0.5\%$ lukemasta (muu mittausalue).

Lämpötilan (TC) mittausalue on $-200\text{ °C} - +1370\text{ °C}$ ja tarkkuus (± 1 digitaali) $\pm (0.3\text{ °C} + 0.1\%$ lukemasta).

Laitteen hiilidioksidin ja kosteuden tarkkuutena voidaan pitää:

- ± 50 ppm + 3 % lukemasta (0–5000 ppm välillä)
- ± 100 ppm + 5 lukemasta (5001–10000 ppm välillä)
- ± 3 % RH (10–35 % RH välillä)
- ± 2 % RH (35–65 % RH välillä)
- ± 3 % RH (65–90 % RH välillä)
- ± 5 % RH (muu mittausalue) ± 0.5 °C

Ilman liikenopeuden tarkkuutena voidaan pitää ± 0.1 m/s + 1.5 % lukemasta.



Kuva 8. Testo 440 monitoimimittari.

7 Tiloissa mitatut suureet, mittaustavat ja mittaustulokset

Tilojen pidempiaikaiset mittaukset toteutettiin oheisin taulukon 9 mukaisesti. Taulukoon eroteltiin jokainen mittari, millä mitattu tiettyä suuretta. Poikkeuksena tähän taulukkoon ilmanvaihdon paine-eroa ei mitattu toimistohuoneista 217 ja 223c, sillä niissä ei ollut helposti saatavilla mittaussyhteitä, mihin paine-eroanturi olisi voitu liittää. Kontakt.io:n Portal Beam laitteita oli yhteensä viisi kappaletta, joten 220 tilaan tätä kyseistä laitetta ei tullut.

Lämpötila	Kosteus	Hiilidioksidi	TVOC	PM10, PM2,5, PM1,5	IV:n paine-ero
Ruuvi Technologies Ruuvitag	Ruuvi Technologies Ruuvitag	Connected Finland Airwits CO2 Plus	Connected Finland Airwits IAQ	Connected Finland Airwits PM	Pressguard
Connected Finland Airwits CO2 Plus	Connected Finland Airwits CO2 Plus				
Connected Finland Airwits PM	Connected Finland Airwits PM				
Connected Finland Airwits IAQ	Connected Finland Airwits IAQ				
Connected Finland Airwits Plus	Connected Finland Airwits Plus				
Celsicom TH600/TH601B	Celsicom TH600/TH601B				
Kontakt.io Portal Beam	Kontakt.io Portal Beam				

Taulukko 9. Mitatut suureet ja mittarit eriteltynä

Työssä analysoitiin ja vertailtiin lämpötilan ja kosteuden osalta RuuviTAG, Airwits Plus, TH600/TH601B ja Portal Beam -antureiden tuloksia. Muut sensorit on tarkoitettu mittaamaan pääasiassa muita suureita.

Kuvioissa 3–36 esiintyvissä graafeissa lämpötila on sinisellä, kosteus oranssilla, hiilidioksidi vihreällä, TVOC-arvot punaisella ja PM-arvot ruskealla. Graafeissa on merkittynä maksimi- ja minimiarvot seurantajakson aikana sekä kyseessä olevan laitteen nimi. Mittarit asennettiin alun perin tiloihin 14.3 illalla, mutta tulosten tarkastelun ajaksi päätettiin reilun viikon jakso 27.3-5.4.2023.

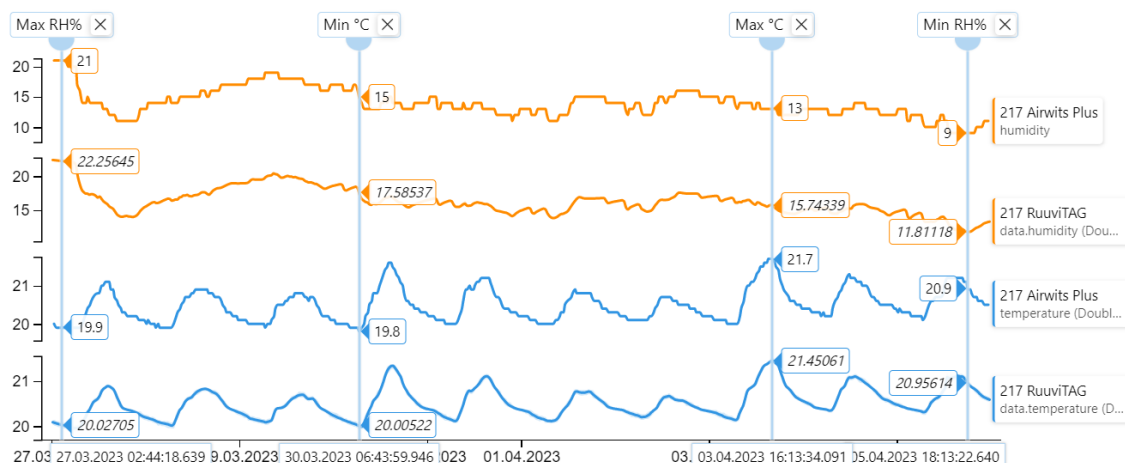
Hetkelliset mittaukset toteutettiin 31.3.2023. Luokkahuoneisiin mentiin 15–30 minuuttia ennen luennon päättymistä niin, että tuloksissa näkyisi maksimiarvot. Toimistohuoneissa mittaukset suoritettiin sen hetkisten käyttäjien ollessa paikalla. Mittarin antureiden tuli tasaantua vallitseviin olosuhteisiin edellä mainitun 15–30 minuutin verran ennen mittauksen aloitusta.

Mittauspisteitä valittiin jokaisesta tilasta muutama. Hiilidioksidin, lämpötilan ja kosteuden mittauspisteet olivat tilan oleskeluvyöhykkeellä, leveyssuunnassa keskellä noin 1,1 metrin korkeudessa, niin ettei anturiin päässyt suorasti uloshengitysilmaa. Ilman liikenopeus mitattiin samasta kohdasta, mutta 1,7 metrin korkeudelta. Mittaukset suoritettiin tilan molemmista päistä oleskeluvyöhykkeeltä, millä pyrittiin katsomaan olosuhteiden tasaisuus ja ilmanvaihdon pääte-laitteiden sijainnin vaikutus saatuihin tuloksiin. Operatiivinen lämpötila mitattiin pallolämpömittarilla tietyltä työpisteeltä noin 1,1 metrin istumakorkeudesta ja noin 60 senttimetrin päästä ikkunasta. Ulkolämpötila otettiin ilmatieteenlaitok-selta.

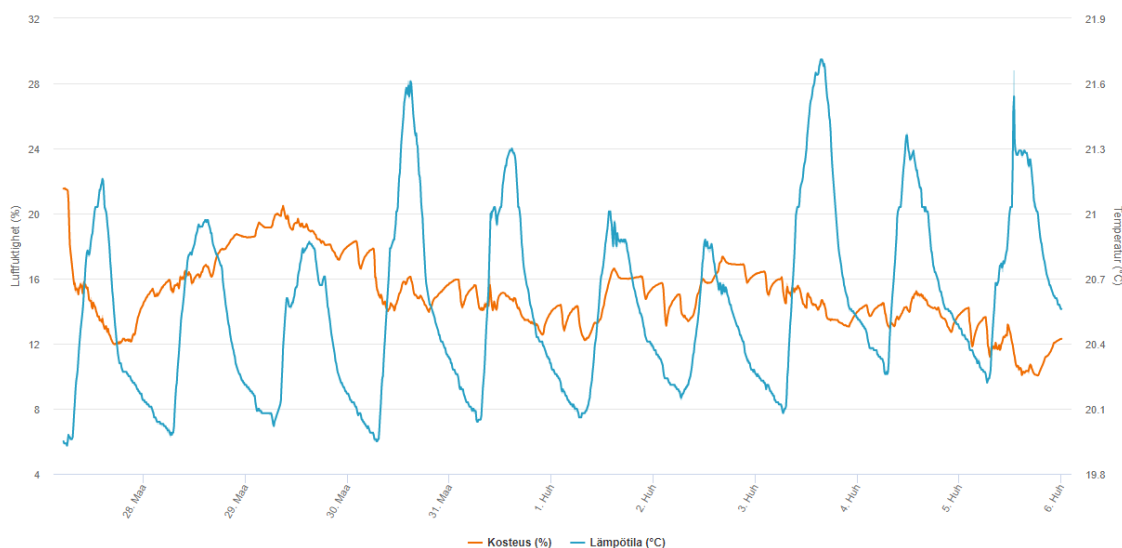
7.1 Tila 217

7.1.1 Pidempiaikainen seuranta

Kuvioissa 3 ja 4 sekä taulukoissa 10 ja 11 esiintyvät tilan lämpötilan ja kosteuden mittaustulokset. Tuloksista voi huomata ilman olevan kuivaa RH % jäädessä melkein koko seuranta-ajalta alle suosituksen, mikä olisi talvisaikaan n. 20–40 %. Lämpötila on käynyt seurantajakson aikana muutaman kerran toimenpiderajan (20 °C) alapuolella, mikä koetaan viihtymishaittana. Lämpötilan keskiarvo on kuitenkin pysynyt rajojen sisäpuolella. Eri sensoreiden saamat tulokset poikkeavat kosteuden osalta enimmillään useampien prosenttiyksiköiden verran. Lämpötilan osalta poikkeamat sensoreiden välillä on muutamien desimaalien verran.



Kuvio 3. Airwits Plus ja RuuviTAG (lämpötila ja kosteus) kuvaajat tilassa 217.



Kuvio 4. TH601B kuvaaja tilassa 217.

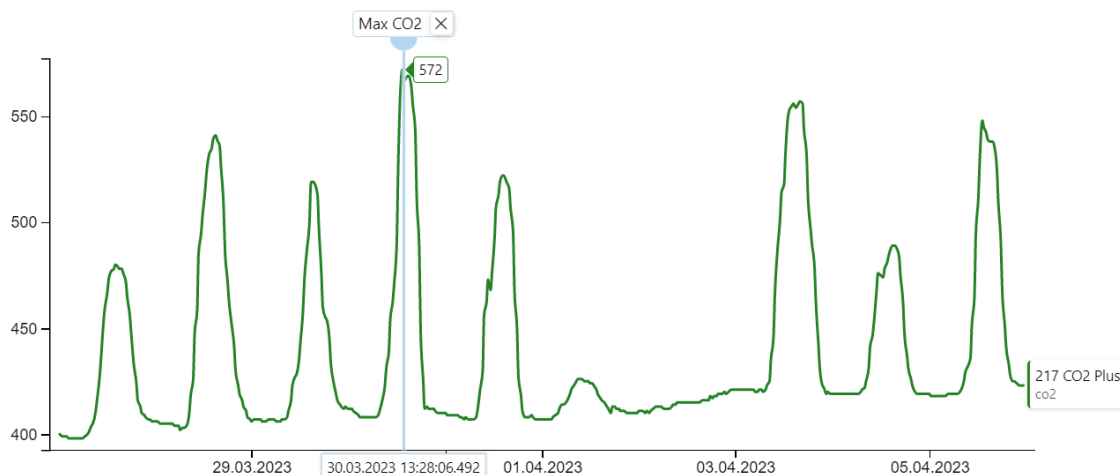
	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	15,20	20,60
Max	22,00	21,70
Min	10,10	19,90

Taulukko 10. TH601B tulokset tilassa 217.

	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	13,05	20,60
Max	20,62	21,66
Min	6,91	20,12

Taulukko 11. Portal Beam tulokset tilassa 217.

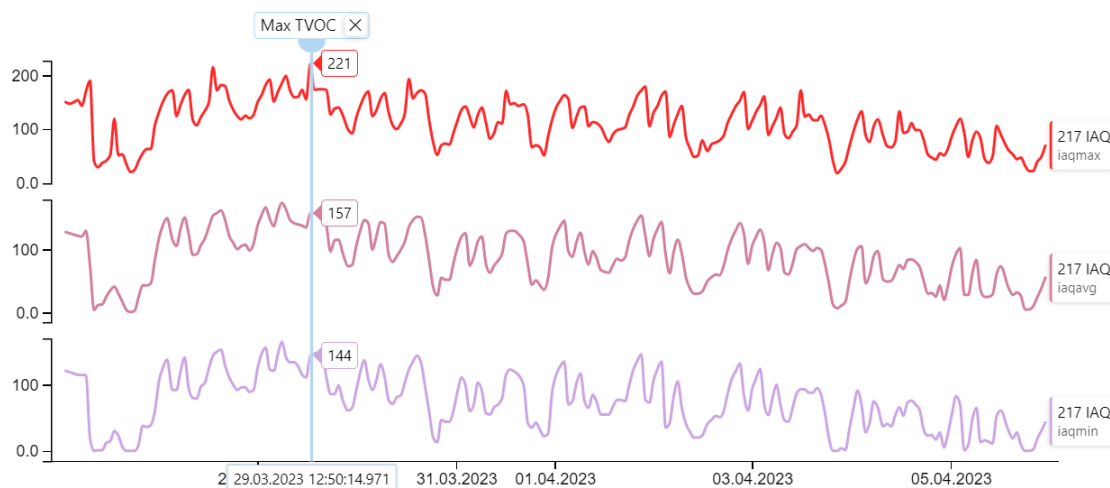
Viivadiagrammiin kuvioon 5 on merkattu hiilidioksidipitoisuus seurantajaksolla ja maksimipitoisuus. Hiilidioksidin osalta tila kestää selvästi asumisterveysasetuksen raja-arvoissa, sillä maksimipitoisuus on ollut 572 ppm.



Kuvio 5. Airwits CO2 Plus kuvaaja tilassa 217.

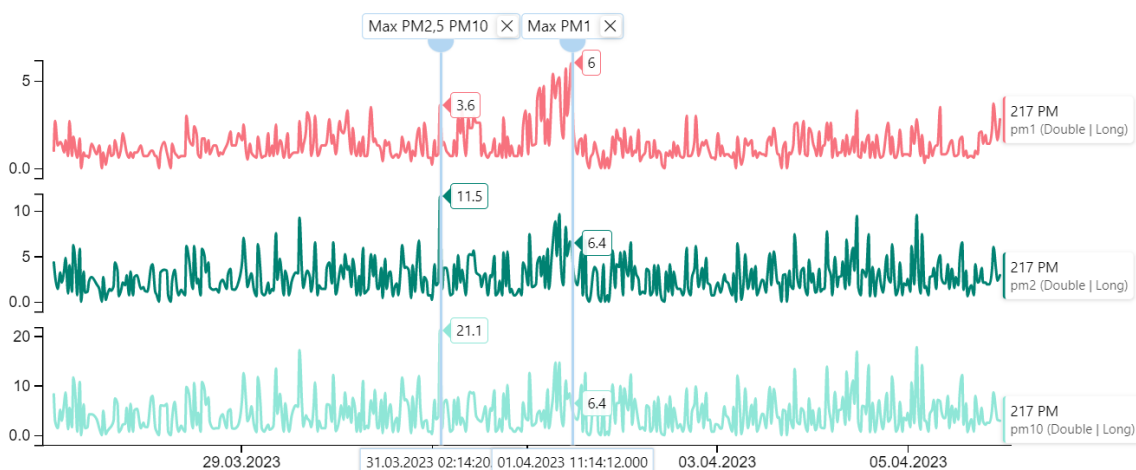
Viivadiagrammiin kuvioon 6 on merkattu TVOC-pitoisuudet seurantajaksolla ja niiden maksimipitoisuus. Pitoisuuksien keskiarvo on ollut seurantajaksolta 88 ppb. Maksimipitoisuus oli 221 ppb, mikä ei ole korkea verrattuna muiden tilojen pitoisuuksiin. TVOC-pitoisuus laskee useampana päivänä käyttöajan ulkopuolella n. klo 18–19 aikaan alimpaan arvoonsa. Se ei kestä siellä kuitenkaan koko

käyttöajan ulkopuolista aikaa. Vaikea arvioida tuleeko yhdisteitä käyttäjistä vai rakennus- ja sisutusmateriaaleista. Todenn koisesti kaikista näistä.



Kuvio 6. Airwits IAQ kuvaajat tilassa 217.

Viivadiagrammiin kuvioon 7 on merkattu eri kokoisten hiukkasten pitoisuudet seurantajaksolla ja niiden maksimiarvot. Saadut tulokset kestävät selvästi raja-arvojen sisällä koko seurantajakson ajan.



Kuvio 7. Airwits PM kuvaajat tilassa 217.

7.1.2 Hetkellinen seuranta

Tilan 217 hetkellinen seuranta toteutettiin kahden henkilön ja mittaajan ollessa paikalla. Ulkolämpötila ollut mittaushetkellä -8,8 °C. 1. mittaus suoritettiin 31.3.2023 klo 09:24 ja 2. mittaus klo 09:29. Mittauksen kesto oli molemmissa tapauksissa 2 minuuttia. Taulukossa 12 esitetty lähempänä tuloilman kattohajottajaa suoritettut mittaukset ja taulukossa 13 huoneen toisesta päästä, tuloilmapäätelaitteesta kauempana, mutta lähempänä poistoilmaventtiilejä suoritettut mittaukset. Tulokset ovat vasemmalta oikealle järjestyksessä sarakkeittain: hiili-dioksidi, kosteus ja lämpötila.

			ppm CO2	%rH [453]	°C [453]
Mean			448	14,1	21,3
Max			451	14,2	21,4
Min			445	14	21,3

Taulukko 12. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot 1. mittauspiste.

			ppm CO2	%rH [453]	°C [453]
Mean			469	15,7	21,5
Max			479	15,8	21,5
Min			458	15,6	21,5

Taulukko 13. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot 2. mittauspiste.

Ilman liikenopeutta mitattiin samoista mittauspisteistä kuin aikaisemmat mittaukset noin 1,7 metrin korkeudesta. Kummassakaan tapauksessa mittari ei värähtänyt eli liikenopeus oli 0 m/s.

Operatiivinen lämpötila mitattiin työpisteeltä, joka sijaitsi kaukaisimpana kattohajottajasta. Mittauksen aloitus klo 09:33 ja kesto oli 1 minuutin. Taulukossa 14 operatiivisen lämpötilan mittaustulokset.

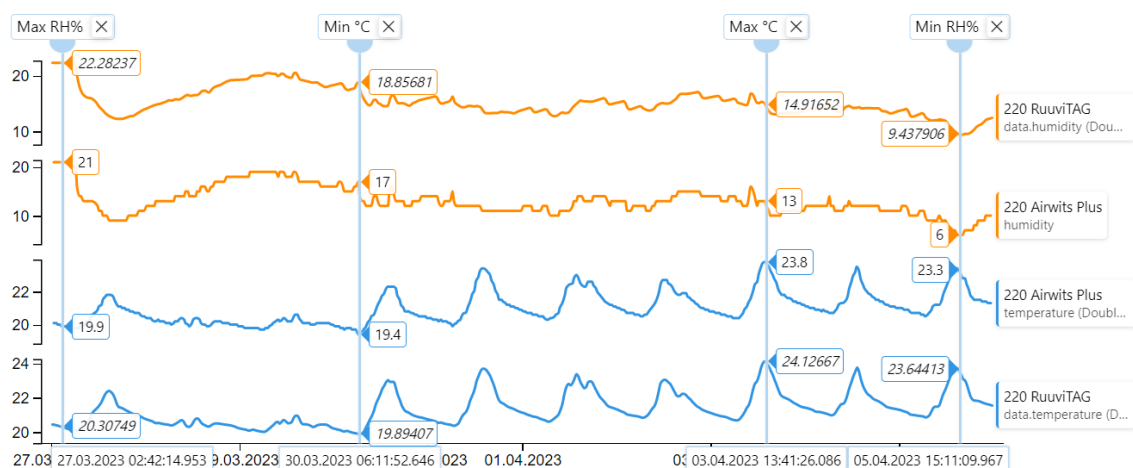
			°C TC [005]
Mean			22,7
Max			22,8
Min			22,7

Taulukko 14. Operatiivinen lämpötila.

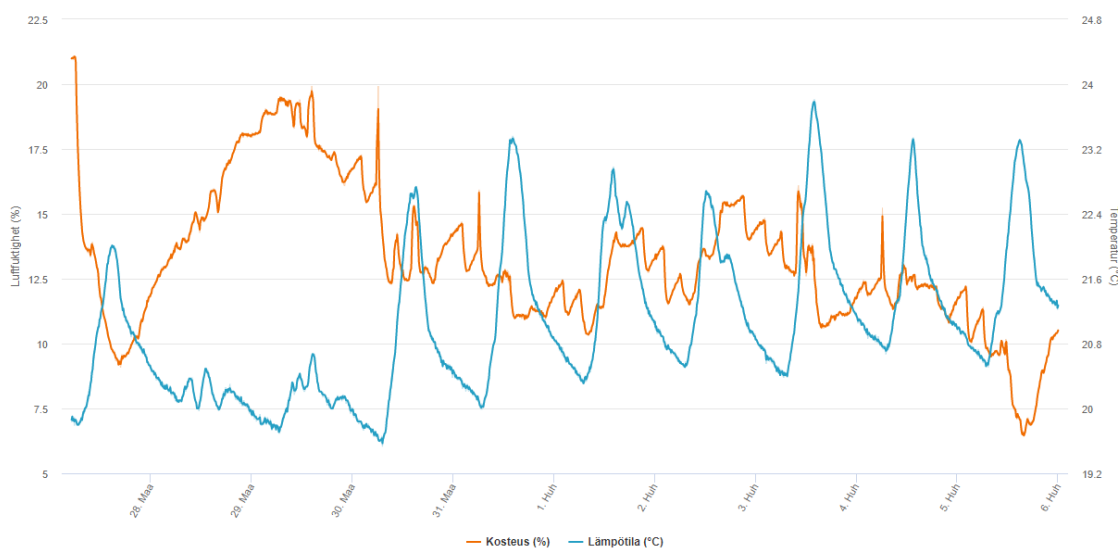
7.2 Tila 220

7.2.1 Pidempiaikainen seuranta

Kuvioissa 8 ja 9 sekä taulukossa 15 esiintyvät tilan lämpötilan ja kosteuden mitaustulokset. Tuloksista voi huomata ilman olevan kuivaa. Lämpötila käy muutamassa tapauksessa alle 20 °C ja paikoitellen myös korkeampana jopa 24 °C, mikä voidaan kokea viihtymishaittana. Lämpötilojen erot ovat eri sensoreiden välillä muutamien desimaalien verran. Kosteudessa erot taas maksimissaan yli 3 %.



Kuvio 8. Airwits Plus ja RuuviTAG (lämpötila ja kosteus) kuvaajat tilassa 220.

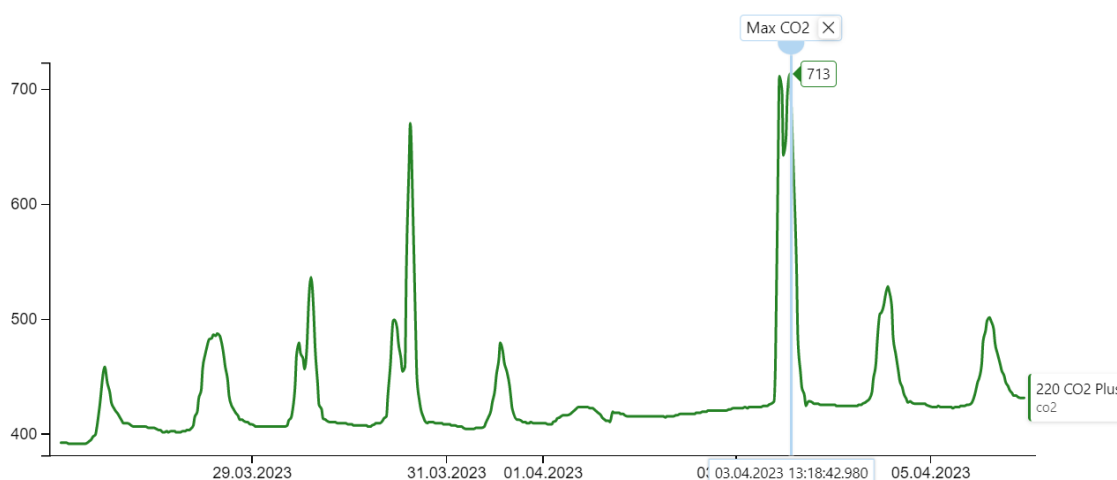


Kuvio 9. TH600 anturin tulokset tilassa 220.

	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	13,40	21,03
Max	21,20	23,78
Min	6,50	19,57

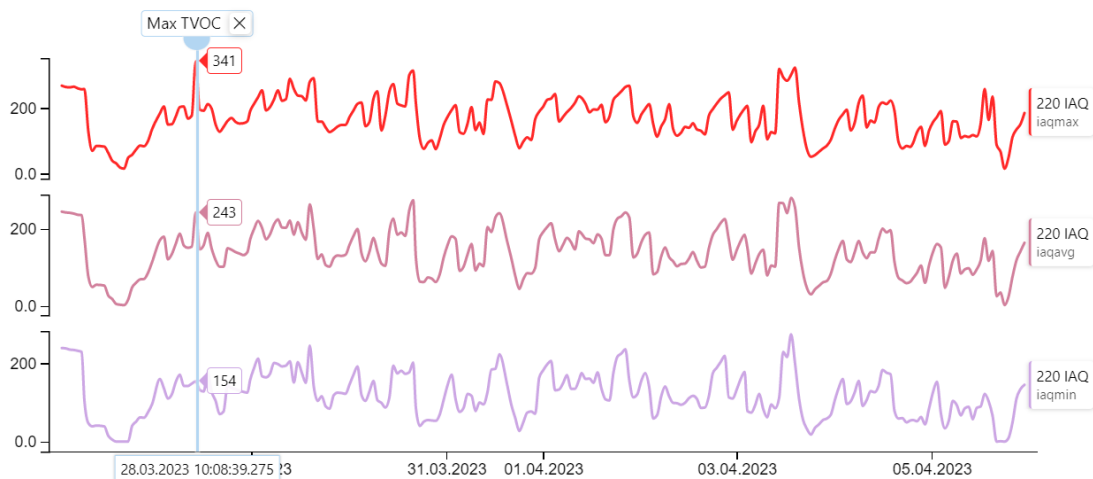
Taulukko 15. TH600 anturin keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot tilassa 220.

Viivadiagrammiin kuvioon 10 on merkattu hiilidioksidipitoisuus seurantajaksolla ja maksimipitoisuus. Hiilidioksidipitoisuuksien osalta tila kestää asumisterveysasetuksen raja-arvoissa, sillä maksimipitoisuus on ollut 713 ppm.



Kuvio 10. Airwits CO2 Plus kuvaaja tilassa 220.

Kuvioon 11 on merkattu TVOC-pitoisuudet ja niiden maksimipitoisuudet seurantajaksen aikana. Pitoisuuksien keskiarvo seurantajaksolta on ollut 140 ppb. Maksimipitoisuus oli 341 ppb. TVOC-pitoisuudet kohoavat käyttöaikana korkeampiin arvoihinsa. Käyttöajan ulkopuolella pitoisuudet ovat pääsääntöisesti vähän alempana ja useampana päivänä alimmat pitoisuudet esiintyvät klo 19:00 aikoihin. Selvää johdonmukaisuutta vuorokauden ajan mukaan on vaikea havaita.



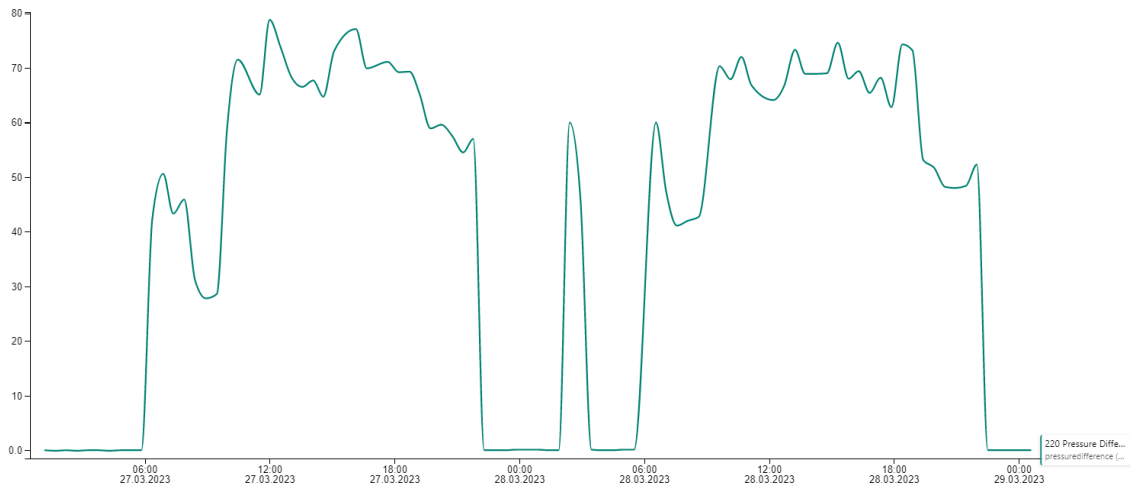
Kuvio 11. Airwits IAQ kuvaajat tilassa 220.

Viivadiagrammiin kuvioon 12 on merkattu eri kokoisten hiukkasten pitoisuudet seurantajaksolla ja niiden maksimiarvot. Saadut tulokset kestävät selvästi raja-arvojen sisällä koko seurantajakson ajan.



Kuvio 12. Airwits PM kuvaajat tilassa 220.

Säätöpellin mittausyhteistä mitattu paine-ero oli käyttöajalla koneen ollessa normaaliteholla noin 70 Pa, mikä käy ilmi kuviosta 13.



Kuvio 13. Säätopellin paine-ero kahden vuorokauden aikana tilassa 220.

7.2.2 Hetkellinen seuranta

Tilan 220 hetkellinen seuranta toteutettiin kahden henkilön ja mittaajan ollessa paikalla. Ulkolämpötila ollut mittaushetkellä $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. 1. mittaus suoritettiin 31.3.2023 klo 12:05 ja 2. mittaus klo 12:09. Mittauksen kesto oli molemmissa tapauksissa 3 minuuttia. Mittaukset suoritettiin huoneen molemmista päistä oleskeluvyöhykkeeltä, ikkunan puolelta sekä käytävän ja tilan jakavan lasiseinän puolelta. Taulukossa 16 esitetty lähempänä ikkunaa suoritettut mittaukset ja taulukossa 17 huoneen toiselta puolelta vastapäätä suoritettut mittaukset. Tulokset ovat vasemmalta oikealle järjestyksessä sarakkeittain: hiilidioksidi, kosteus ja lämpötila.

			ppm CO2 [453]	%rH [453]	$^{\circ}\text{C}$ [453]
Mean			445	13	23,5
Max			446	13,6	23,7
Min			442	12,8	23,4

Taulukko 16. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot.

			ppm CO2 [%rH [453]	°C [453]
Mean			454	13,7	23,6
Max			456	13,9	23,8
Min			452	13,6	23,5

Taulukko 17. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot.

Tilan sälekaihtimet on ollut auki, mikä vaikuttaa korkeampaan sisälämpötilaan. Ulkona varsin aurinkoinen sää.

Ilman liikenopeutta mitattiin samoista mittauspisteistä ja useammasta kohtaa tilan oleskeluvyöhykkeen molemmilta puolilta noin 1,7 metrin korkeudesta. Missäkään tapauksessa mittari ei värähtänyt eli liikenopeus oli 0 m/s.

Operatiivinen lämpötila mitattiin opettajan työpisteeltä, joka sijaitti ovelta katsottuna oikealla ikkunan vieressä. Mittauksen aloitus klo 12:14 ja kesto oli 2 minuuttia. Taulukossa 18 operatiivisen lämpötilan tulokset.

			°C TC [005]
Mean			25,1
Max			25,4
Min			24,7

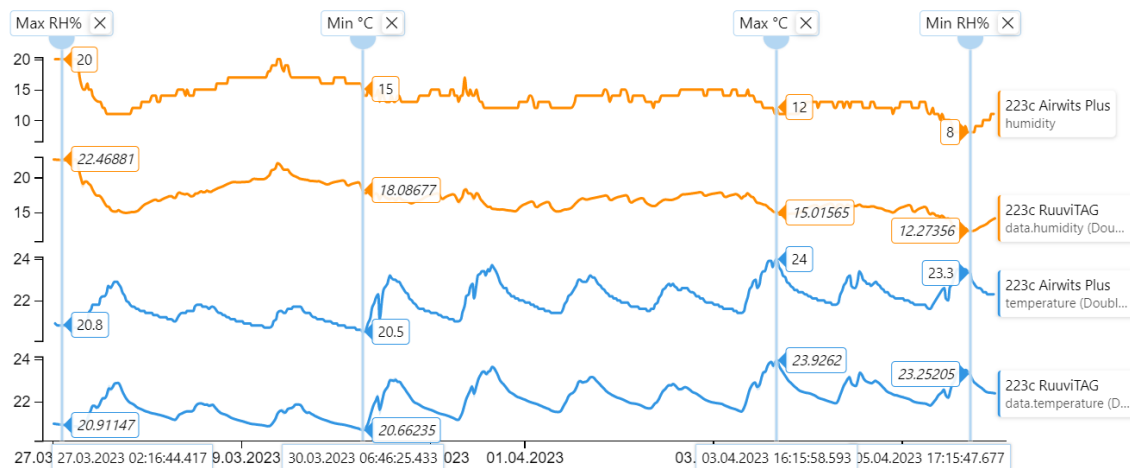
Taulukko 18. Operatiivinen lämpötila.

7.3 Tila 223c

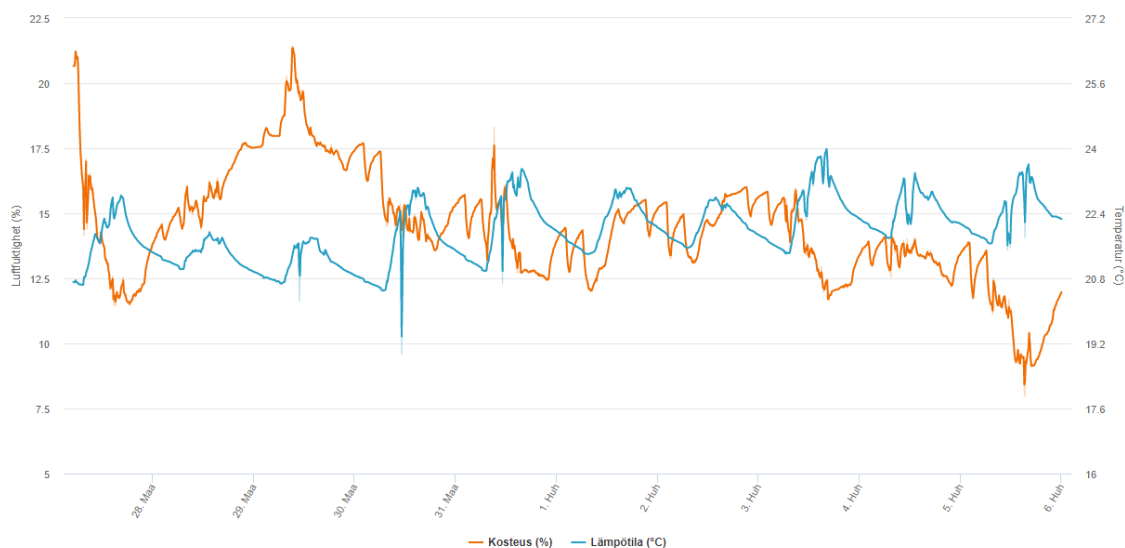
7.3.1 Pidempiaikainen seuranta

Kuvioissa 14 ja 15 sekä taulukoissa 19 ja 20 esiintyvät tilan lämpötilan ja kosteuden mittauks tulokset. Tässäkin tilassa ilma on varsin kuivaa. Lämpötilat kestävät Asumisterveysasetuksen raja-arvossa yli 20 °C. Poikkeuksena TH601B on mitannut alimmillaan 19,4 °C lämpötilan, mikä näkyy piikkinä kuvion 15 kuvajasssa. Kyseessä on voinut olla virhe. Lämpötilat nousevat käytön aikana, ihmisten ollessa tilassa paikoin varsin korkeiksi, maksimissaan 24 °C, mikä koetaan

viihtymishaittana. Tila täyttää S3-luokan vaatimukset lämpötilan osalta. Eri sensoreiden tulokset lämpötilasta poikkeavat n. 0,1 °C verran, kosteudessa poikkeamat Airwits Plus ja RuuviTAG välillä ovat jopa n. 4 yksikköä.



Kuvio 14. Airwits Plus ja RuuviTAG (lämpötila ja kosteus) kuvaajat tilassa 223c.



Kuva 15. TH601B sensorin tulokset tilassa 223c.

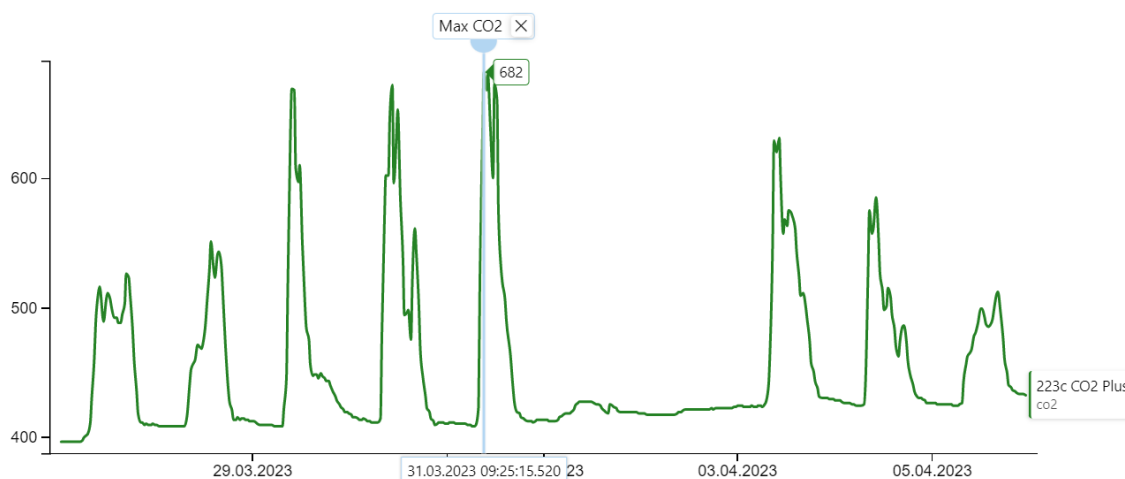
	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	14,60	22,30
Max	21,40	24,00
Min	8,40	19,40

Taulukko 19. TH601B sensorin keskiarvo, maksimi ja minimi tilassa 223c.

	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	12,55	22,49
Max	20,00	24,65
Min	7,39	20,66

Taulukko 20. Portal Beam sensorin tulokset tilassa 223c.

Kuviossa 16 on merkattu tilan hiilidioksidipitoisuus ja sen maksimiarvo seurantajakson aikana. Tila kestää asumisterveysasetuksen raja-arvoissa, sillä maksimi hiilidioksidipitoisuus on ollut 682 ppm.



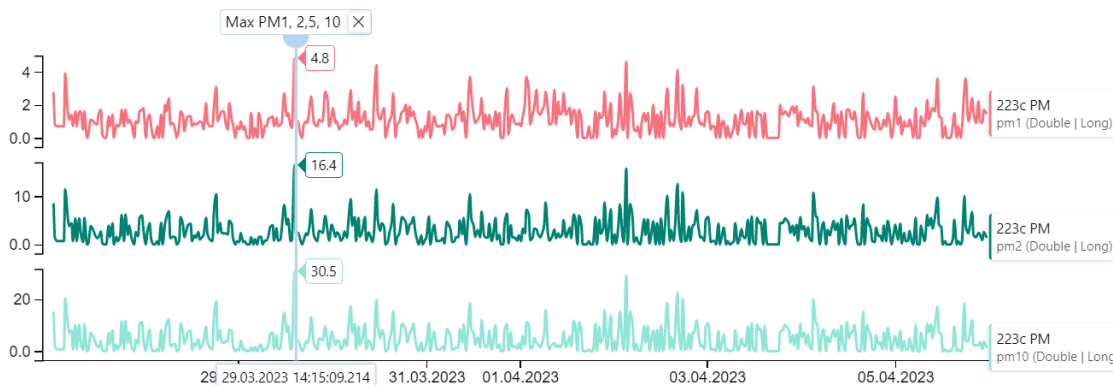
Kuvio 16. Airwits CO2 Plus kuvaaja tilassa 223c.

Kuvioon 17 on merkattu TVOC-pitoisuudet ja niiden maksimipitoisuudet seurantajakson aikana. Pitoisuuksien keskiarvo seurantajaksolta on ollut 117 ppb. Maksimipitoisuus oli 1437 ppb. TVOC-pitoisuudet kohoavat käyttöaikana korkeampiin arvoihinsa. TVOC-pitoisuuksista voi havaita muutaman piikin, missä pitoisuudet ovat käyneet normaalia korkeammalla.



Kuvio 17. Airwits IAQ kuvaajat tilassa 223c.

Viivadiagrammiin kuvioon 18 on merkattu eri kokoisten hiukkasten pitoisuudet seurantajaksolla ja niiden maksimiarvot. Hiukkaspitoisuudet eivät kohoa yli raja-arvojen.



Kuvio 18. Airwits PM kuvaajat tilassa 223c.

7.3.2 Hetkellinen seuranta

Tilan 223c hetkellinen seuranta toteutettiin yhden henkilön ja mittaajan ollessa paikalla. Ulkolämpötila ollut mittaushetkellä $-10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mittaus suoritettiin 31.3.2023 klo 08:40. Mittauksen kesto oli 2 minuuttia. Mittauspaikka oli tilan keskellä oleskeluvyöhykkeellä noin 1,1 metrin korkeudessa,

tuloilmapäätelaitteen alta noin 1 metri tilan ovelle päin. Taulukossa 21 on esitetty saadut hiilidioksidin, kosteuden ja lämpötilan arvot.

			ppm CO2	%rH [453]	°C [453]
Mean			649	17,2	21,6
Max			654	17,3	21,7
Min			644	17,2	21,4

Taulukko 21. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot.

Ilman liikenopeutta mitattiin kahdesta kohtaa kattohajottajan molemmilta puoliilta noin 1,7 metrin korkeudesta oleskeluvyöhykkeeltä. Kummassakaan tapauksessa mittari ei värähtänyt eli liikenopeus oli 0 m/s.

Operatiivinen lämpötila mitattiin ikkunan läheltä olevalta työpisteeltä. Mittauksen aloitus klo 08:57 ja kesto oli 2 minuuttia. Taulukossa 22 operatiivisen lämpötilan tulokset.

Korkeampaan lämpötilaan vaikuttanut auringon paiste, työpiste ei ole optimipaikalla. Usein on liian kylmä tai kuuma.

			°C TC [005]
Mean			23,6
Max			24,2
Min			23

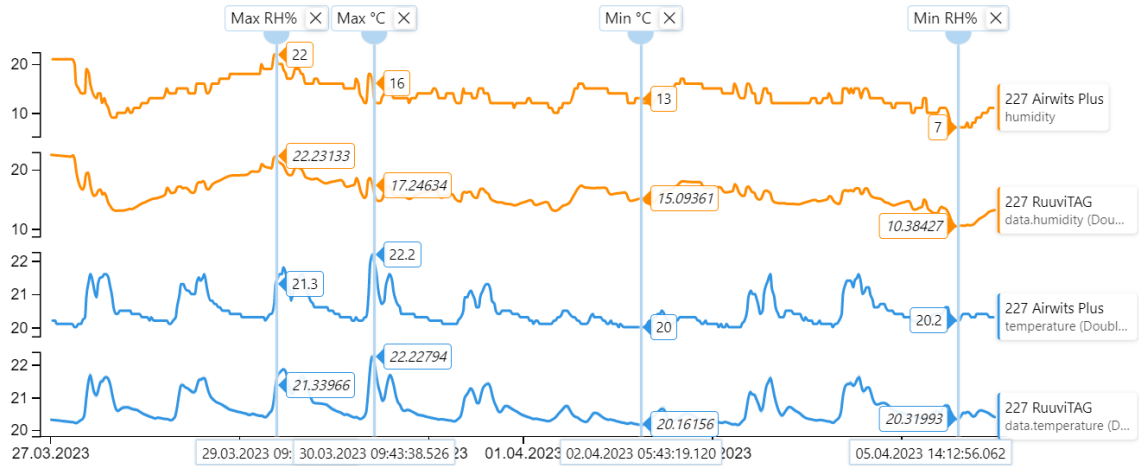
Taulukko 22. Operatiivinen lämpötila.

7.4 Tila 227

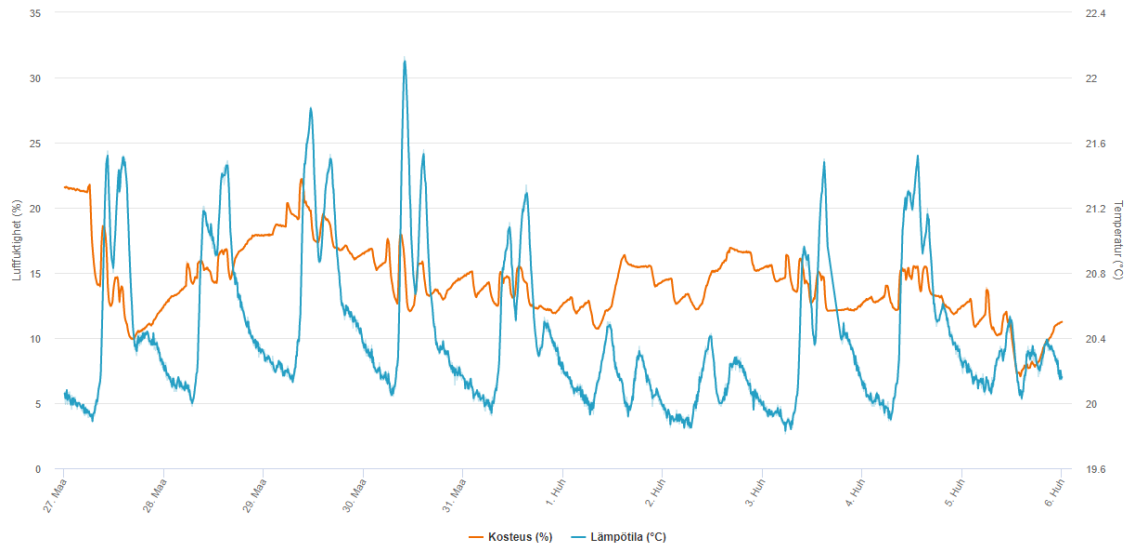
7.4.1 Pidempiaikainen seuranta

Kuvioissa 19 ja 20 sekä taulukoissa 23 ja 24 esiintyvät tilan lämpötilan ja kosteuden mittaustulokset. Ilma on kuivaa. Lämpötilat kestävät raja-arvojen sisällä. Poikkeuksena TH600 sensori on mitannut yhden tuloksen alle 20 °C. Lämpötilat

eri sensoreiden välillä poikkeavat maksimissaan muutamien desimaalien ver-
ran, kun taas kosteudet maksimissaan 3 prosenttiyksikköä.



Kuvio 19. Airwits Plus ja RuuviTAG (lämpötila ja kosteus) kuvaajat tilassa 227.



Kuva 20. TH600 anturin tulokset tilassa 227.

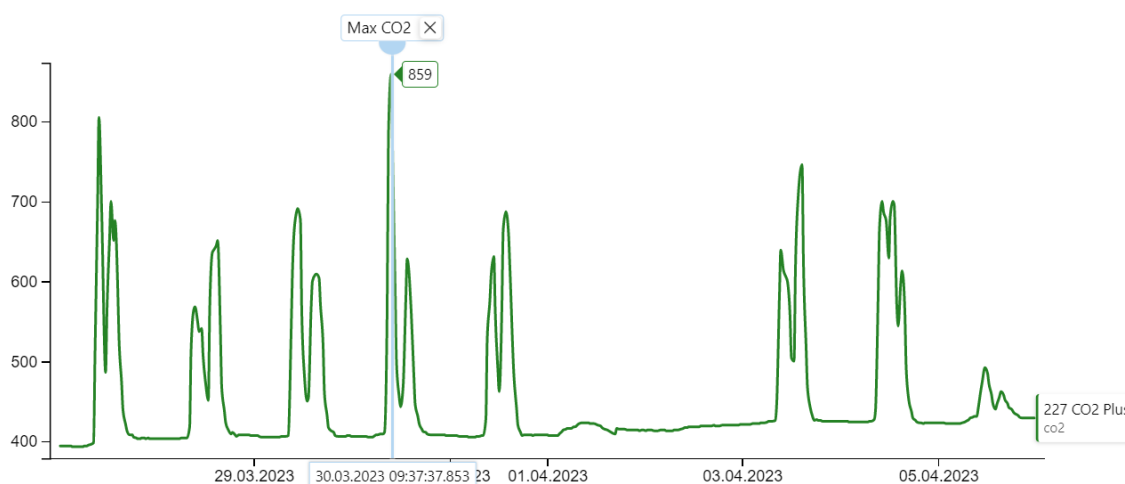
	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	14,30	20,16
Max	22,20	22,10
Min	7,10	19,83

Taulukko 23. TH600 anturin keskiarvo, maksimi ja minimi tilassa 227.

	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	13,05	20,60
Max	20,62	21,66
Min	6,91	20,12

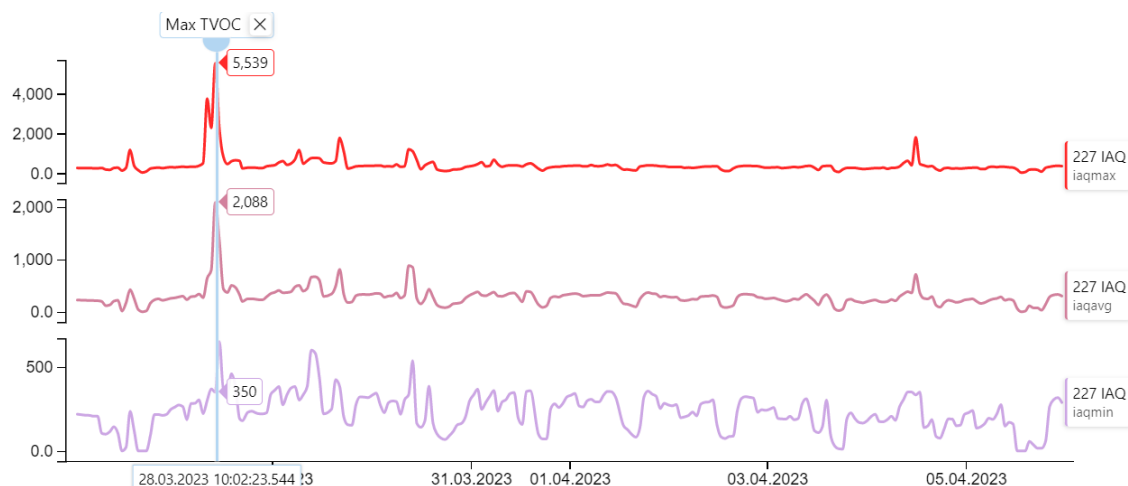
Taulukko 24. Portal Beam tulokset tilassa 227.

Kuviossa 21 on merkattu tilan hiilidioksidipitoisuus ja sen maksimiarvo seurantajakson aikana. Hiilidioksidipitoisuus on ollut maksimissaan 859 ppm eli tila ei kestä S1-luokassa koko seurantajakson aikaa, mutta kestää asumisterveysasetusten rajoissa.



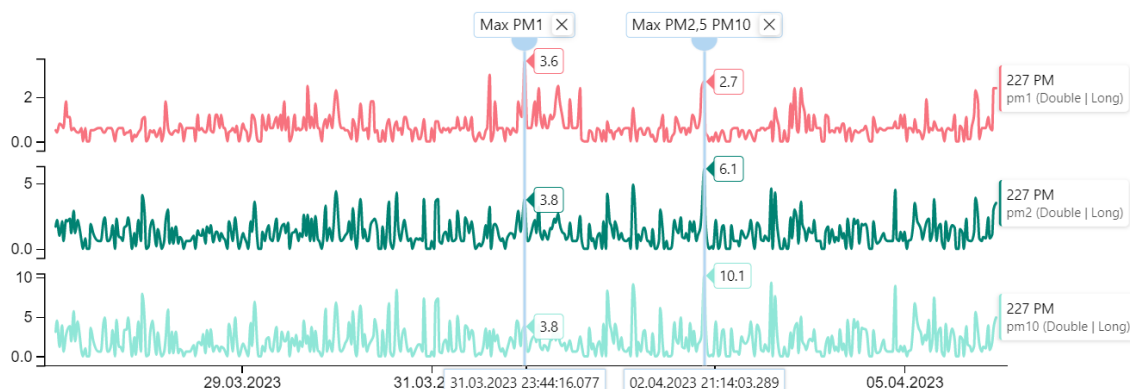
Kuvio 21. Airwits CO2 Plus kuvaaja tilassa 227.

Kuvioon 22 on merkattu TVOC-pitoisuudet ja niiden maksimipitoisuudet seurantajakson aikana. Pitoisuuksien keskiarvo seurantajaksolta on ollut 285 ppb. Maksimipitoisuus oli 5539 ppb. TVOC-pitoisuudet kohoavat käyttöaikana korkeampiin arvoihinsa. TVOC-pitoisuudet huomattavasti korkeampia kuin aikaisemmissa tapauksissa.



Kuvio 22. Airwits IAQ kuvaajat tilassa 227.

Viivadiagrammiin kuvioon 23 on merkattu eri kokoisten hiukkasten pitoisuudet seurantajaksolla ja niiden maksimiarvot. Saadut tulokset kestävät selvästi raja-arvojen sisällä koko seurantajakson ajan.

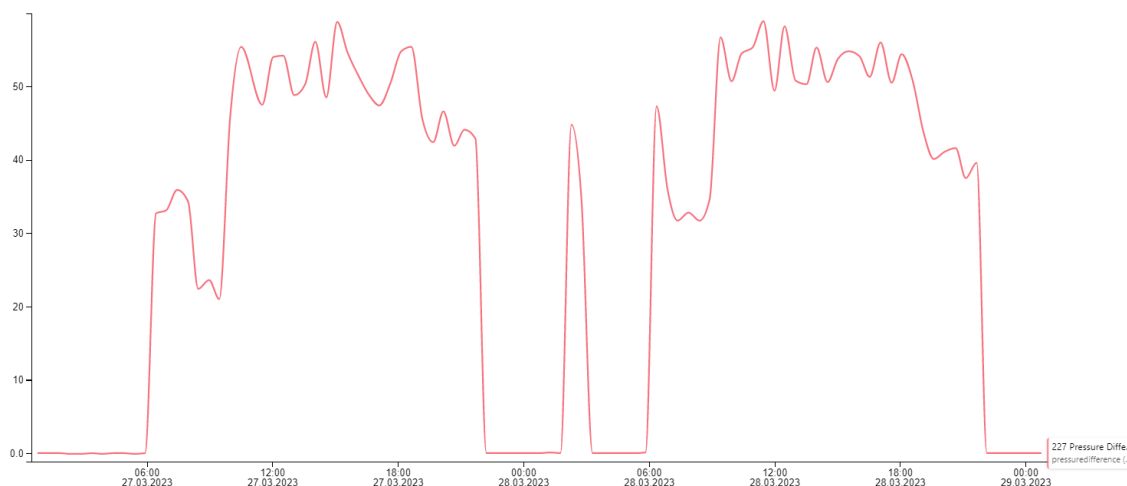


Kuvio 23. Airwits PM kuvaajat tilassa 227.

Säätöpellin mittausyhteistä mitattu paine-ero oli käyttöajalla koneen ollessa normaaliteholla noin 55 Pa, mikä käy ilmi kuviosta 24. Paine-eron perusteella pysyttiin määrittämään säätöpellin läpi menevän ilman tilavuusvirran oheisen kaavan 2 perusteella:

$$q_v = k * \sqrt{\Delta p_m}$$

K-kerroin määrittyy säätöpellin avauman perusteella, mikä katsotaan säätöpeltiä vastaavasta taulukosta liitteestä 1. Tässä esimerkkitapauksessa aukon ollessa 3, k-kertoimeksi saadaan 11,4. Näin ollen ilmavirraksi saadaan kaavan 2 perusteella noin 85 l/s.



Kuvio 24. Säätöpellin paine-ero tilassa 227.

7.4.2 Hetkellinen seuranta

Tilan 227 hetkellinen seuranta toteutettiin 13 henkilön ja mittaajan ollessa paikalla. Ulkolämpötila on ollut mittaushetkellä $-1,1\text{ °C}$. 1. mittaus suoritettiin 31.3.2023 klo 14:00 ja 2. mittaus klo 14:03. Mittauksen kesto oli molemmissa tapauksissa 2 minuuttia. Mittauspaikat olivat leveyssuunnassa tilan keskellä pöytien välissä lähempänä luokan etuosaa ja toinen lähempänä takaosaa. Taulukossa 25 esitetty luokan etuosan mittaukset ja taulukossa 26 takaosan. Tulokset ovat vasemmalta oikealle järjestyksessä sarakkeittain: hiilidioksidi, kosteus ja lämpötila.

			ppm CO2	%rH [453]	°C [453]
Mean			681	15,9	21,6
Max			701	17,2	21,8
Min			650	15,3	21,5

Taulukko 25. Keskiarvo, maksimi ja minimiarvot.

			ppm CO2	%rH [453]	°C [453]
Mean			685	16	21,7
Max			705	17,3	21,8
Min			655	15,1	21,6

Taulukko 26. Keskiarvo, maksimi ja minimiarvot.

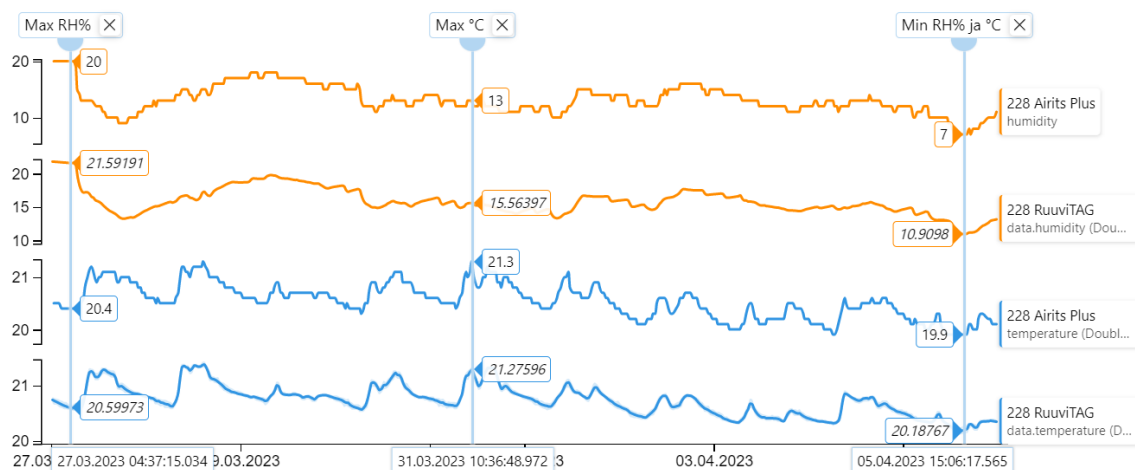
Ilman liikenopeutta mitattiin samoista mittauspisteistä noin 1,7 metrin korkeudesta oleskeluvyöhykkeeltä. Kummassakaan tapauksessa mittari ei värähtänyt eli liikenopeus oli 0 m/s.

Operatiivisen lämpötilan mittausta ei suoritettu tässä tilassa, sillä ei kehdattu häiritä opetusta. Mittausaika pyrittiin järjestämään niin, että tila tyhjenee mittauksen aloittaessa, mutta toisin kävi.

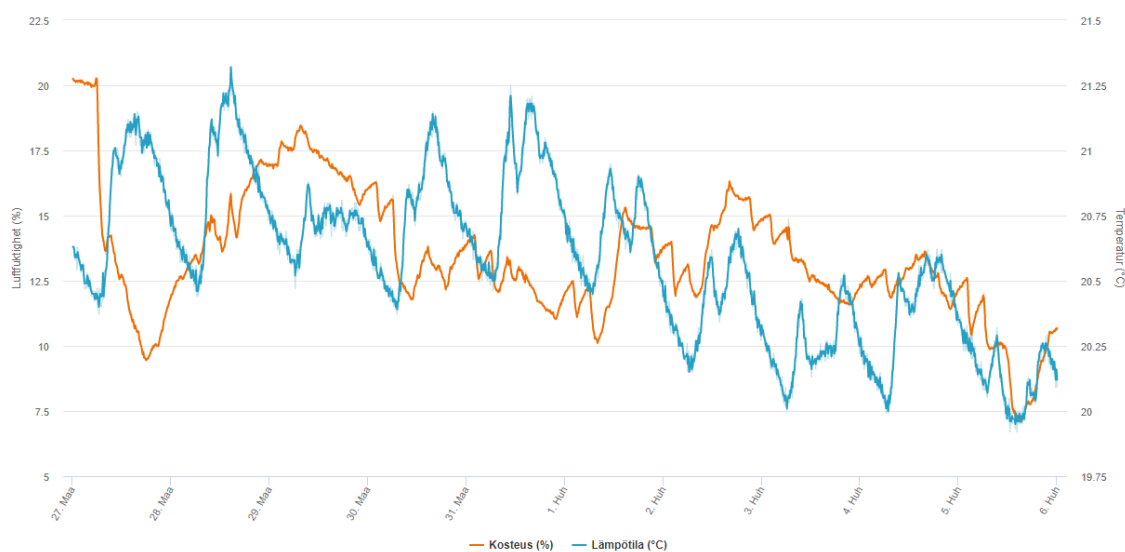
7.5 Tila 228

7.5.1 Pidempiaikainen seuranta

Kuvioissa 25 ja 26 sekä taulukoissa 27 ja 28 esiintyvät tilan lämpötilan ja kosteuden mittaustulokset. Tuloksista voi nähdä ilman olevan kuivaa. Lämpötilat kestävät raja-arvojen sisällä. Lämpötilat ovat asumisterveysasetuksen ja erilaisten suositusten mukaiset 20–22 °C. Eri sensoreiden tulokset lämpötilasta poikkeavat taas muutamien desimaalien verran. Kosteuden osalta erot ovat maksimissaan n. 3 yksikköä.



Kuvio 25. Airwits Plus ja RuuviTAG (lämpötila ja kosteus) kuvaajat tilassa 228.



Kuvio 26. TH600 anturin kuvaajat tilassa 228.

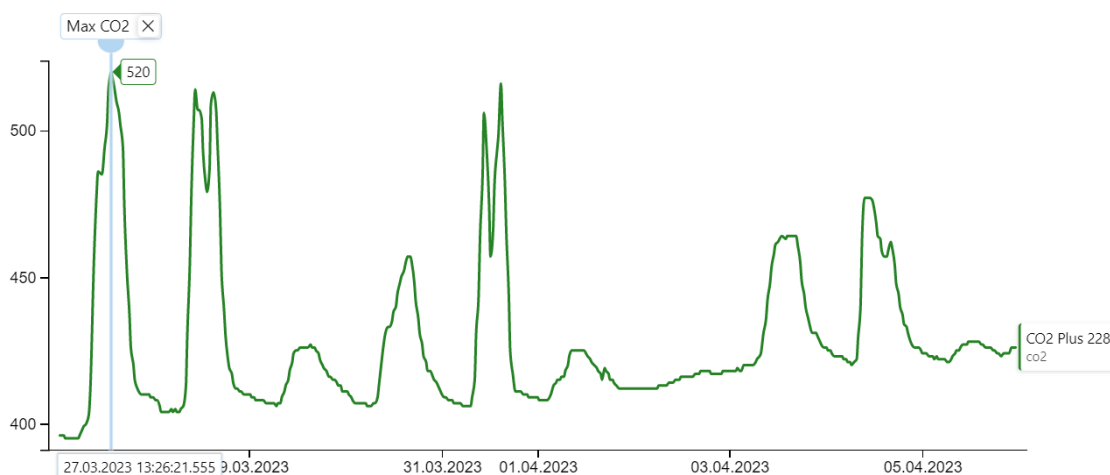
	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	13,40	20,58
Max	20,30	21,32
Min	7,10	19,95

Taulukko 27. TH600 maksimi- ja minimiarvot tilassa 228.

	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	11,91	20,84
Max	17,00	21,71
Min	6,21	20,19

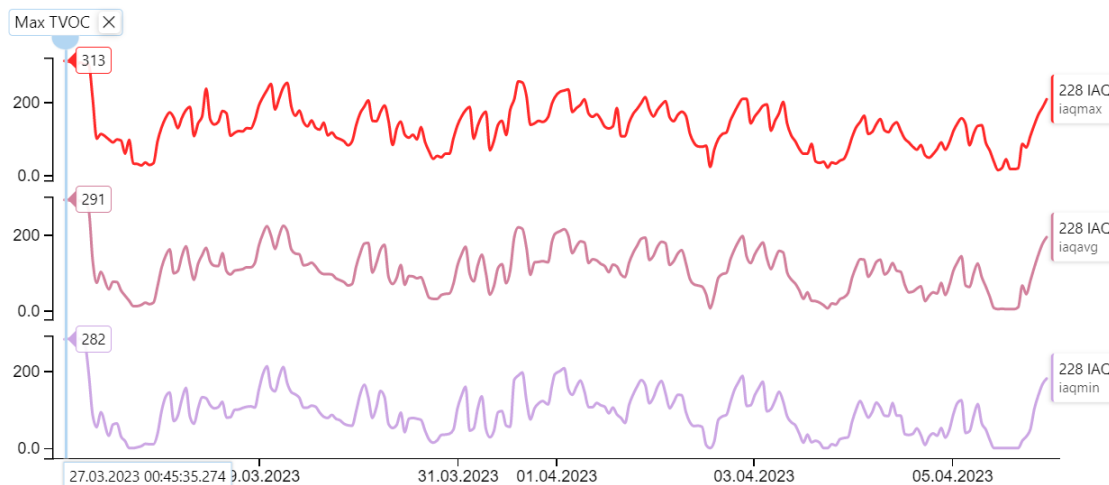
Taulukko 28. Portal Beam sensorin tulokset tilassa 228.

Kuviossa 27 on merkattu tilan hiilidioksidipitoisuus ja sen maksimiarvo seurantajakson aikana. Tila kestää selvästi raja-arvoissa.



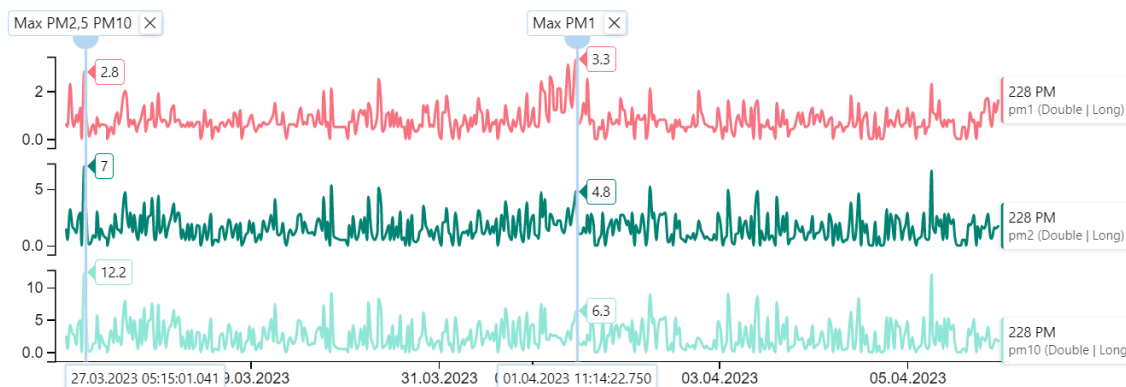
Kuvio 27. Airwits CO2 Plus kuvaaja tilassa 228.

Kuvioon 28 on merkattu TVOC-pitoisuudet ja niiden maksimipitoisuudet seurantajakson aikana. Pitoisuuksien keskiarvo seurantajaksolta on ollut 110 ppb. Maksimipitoisuus oli 313 ppb. Tässä tilassa pitoisuudet eivät nouse niin korkeiksi kuin muissa tiloissa. TVOC-pitoisuudella ei ole tiettyä johdonmukaisuutta. Välillä se on korkeimmissa arvoissa tilan käytön aikana, kun taas välillä käytön ajan ulkopuolella.



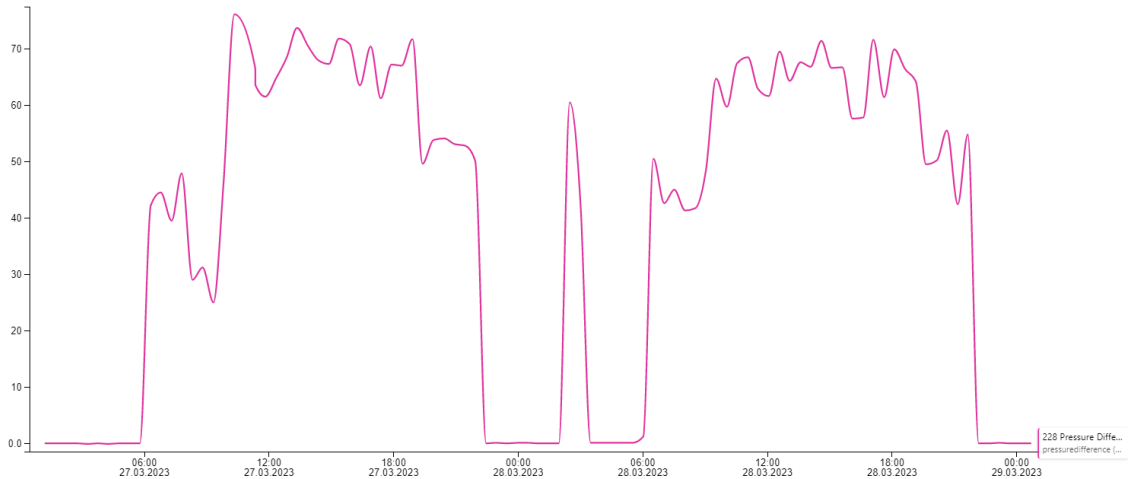
Kuvio 28. Airwits IAQ kuvaajat tilassa 228.

Viivadiagrammiin kuvioon 29 on merkattu eri kokoisten hiukkasten pitoisuudet seurantajaksolla ja niiden maksimiarvot. Saadut tulokset kestävät selvästi raja-arvojen sisällä koko seurantajakson ajan.



Kuvio 29. Airwits PM kuvaajat tilassa 228.

Säätöpellin mittausyhteistä mitattu paine-ero oli käyttöajalla koneen ollessa normaaliteholla noin 70 Pa, mikä käy ilmi kuvioista 30. Kuvioista 30 näkee ilmanvaihdon toiminnan eri vuorokauden aikana.



Kuvio 30. Säätopellin paine-ero tilassa 228.

7.5.2 Hetkellinen seuranta

Tilan 228 hetkellinen seuranta toteutettiin kahden henkilön ja mittaajan ollessa paikalla. Ulkolämpötila ollut mittaushetkellä $-8,2\text{ °C}$. 1. mittaus suoritettiin 31.3.2023 klo 09:43 ja 2. mittaus klo 9:47. Mittauksen kesto oli 2 minuuttia. Taulukossa 29 esitetty tilan takaosan mittaukset ja taulukossa 30 lähempänä lasiseinää olevat etuosan mittaukset. Tulokset ovat vasemmalta oikealle järjestyksessä sarakeittain: hiilidioksidi, kosteus ja lämpötila.

			ppm CO2 [453]	%rH [453]	°C [453]
Mean			472	15,4	21,5
Max			476	16,9	21,5
Min			467	13,9	21,5

Taulukko 29. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot.

			ppm CO2 [453]	%rH [453]	°C [453]
Mean			473	15,6	21,5
Max			477	17	21,6
Min			469	14,2	21,4

Taulukko 30. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot.

Ilman liikenopeutta mitattiin samoista mittauspisteistä noin 1,7 metrin korkeudesta oleskeluvyöhykkeeltä. Kummassakaan tapauksessa mittari ei värähtänyt eli liikenopeus oli 0 m/s.

Operatiivinen lämpötila mitattiin ikkunasta noin 1 metri poispäin ovesta katsottuna vasemman reunimmaiselta työpisteeltä. Mittauksen aloitus klo 09:55 ja kesto oli 2 minuuttia. Taulukossa 31 operatiivisen lämpötilan tulokset.

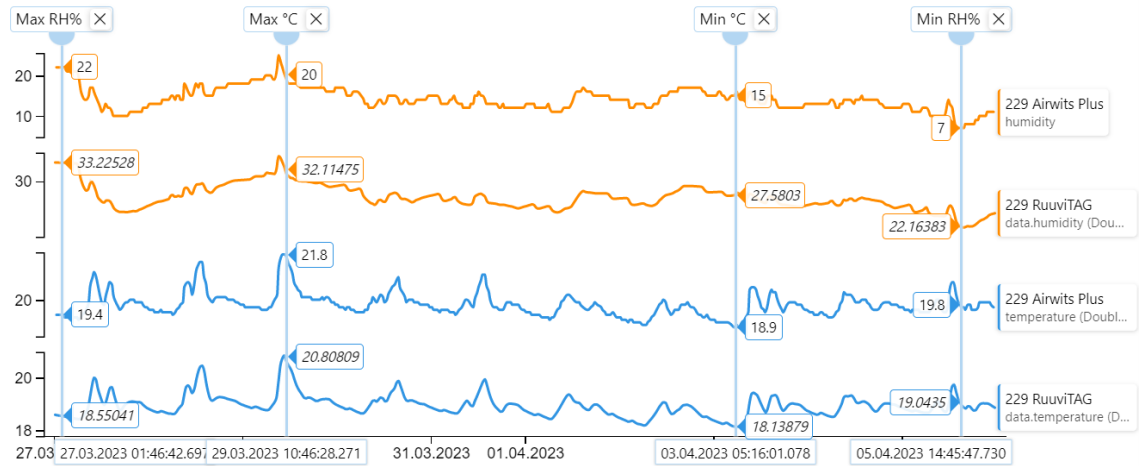
			°C TC [005]
Mean			22,7
Max			22,8
Min			22,7

Taulukko 31. Operatiivinen lämpötila.

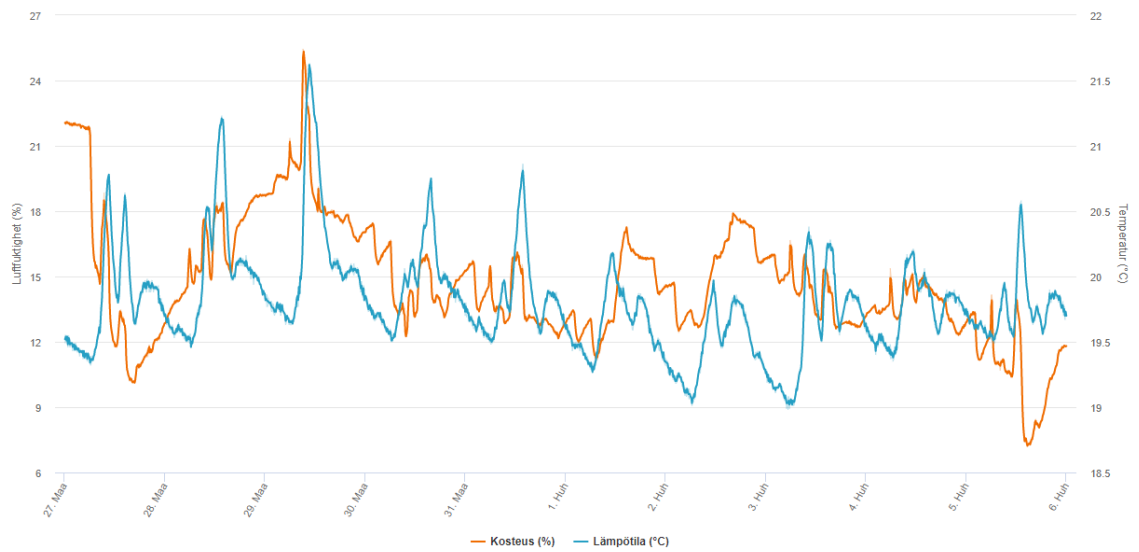
7.6 Tila 229

7.6.1 Pidempiaikainen seuranta

Kuvioissa 31 ja 32 sekä taulukoissa 32 ja 33 esiintyvät tilan lämpötilan ja kosteuden mittaustulokset. Tuloksista voi nähdä ilman olevan kuivaa. Lämpötila jää tässä tilassa koko seurantajaksolta keskiarvallisesti alle asumisterveysasetuksen 20 °C rajasta. Tuloksista voi huomata myös RuuviTAG-anturin virheelliset tulokset, jotka eroavat selvästi Airwits Plus, TH600 ja Portal Beam-antureiden tuloksista. Muiden antureiden osalta erot tuloksissa lämpötilan osalta taas muutamia desimaaleja ja kosteuden osalta useampia yksiköjä.



Kuvio 31. Airwits Plus ja RuuviTAG (lämpötila ja kosteus) kuvaajat tilassa 229.



Kuvio 32. TH600 anturin kuvaajat tilassa 229.

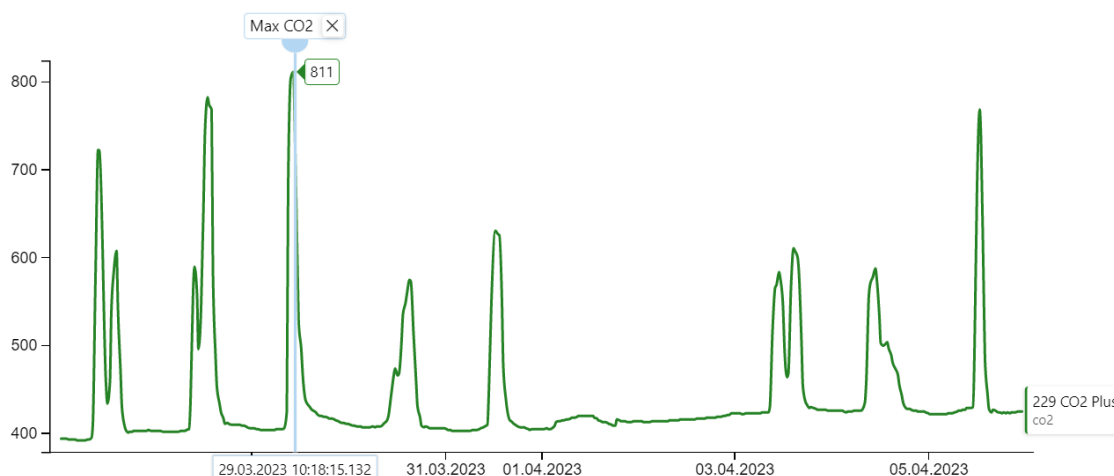
	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	14,70	19,80
Max	25,30	21,62
Min	7,20	19,02

Taulukko 32. TH600 anturin maksimi- ja minimiarvot tilassa 229.

	Kosteus %rH	Lämpötila °C
Mean	12,84	19,97
Max	20,47	21,80
Min	7,00	19,24

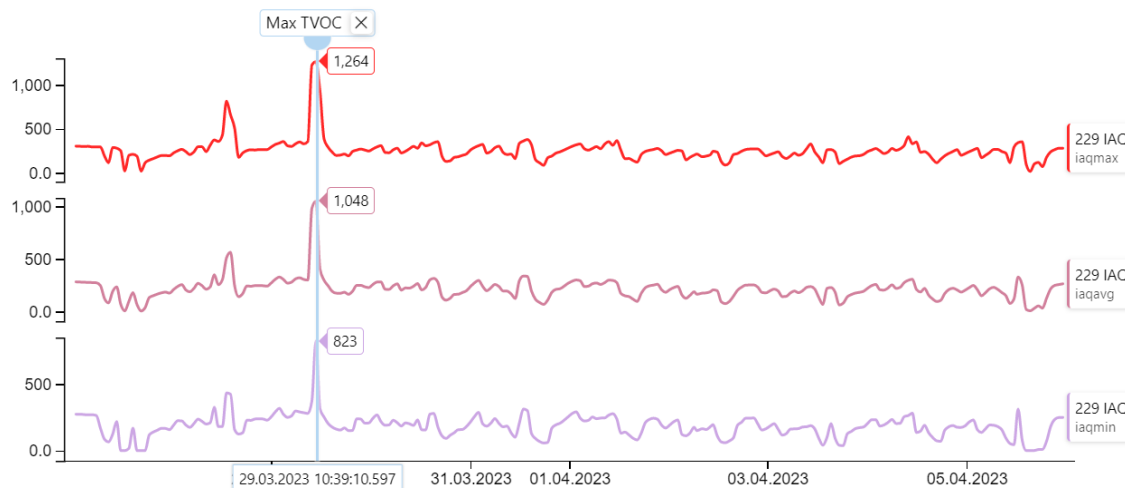
Taulukko 33. Portal Beam sensorin tulokset tilassa 229.

Kuviossa 33 on merkattu tilan hiilidioksidipitoisuus ja sen maksimiarvo seurantajakson aikana. Hiilidioksidipitoisuus on ollut maksimissaan 811 ppm eli tila ei kestä S1-luokassa koko seurantajakson aikaa, mutta kestää asumisterveysasetusten rajoissa.



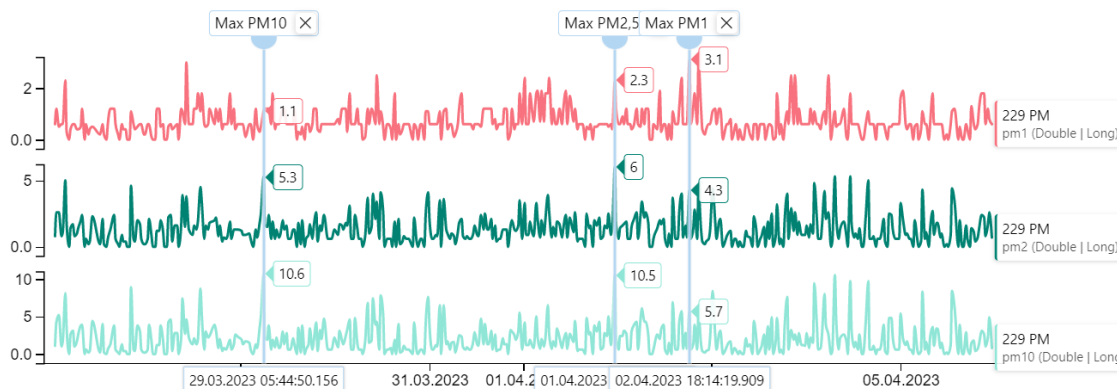
Kuvio 33. Airwits CO2 Plus kuvaaja tilassa 229.

Kuvioon 34 on merkattu TVOC-pitoisuudet ja niiden maksimipitoisuudet seurantajakson aikana. Pitoisuuksien keskiarvo seurantajaksolta on ollut 212 ppb. Maksimipitoisuus oli 1264 ppb. TVOC-pitoisuudessa on muutama selvä piikki, missä voidaan katsoa olevan yhdisteitä ilmassa normaalia reilusti enemmän. Piikit ajoittuvat käytönaikaiseen vuorokauden hetkeen.



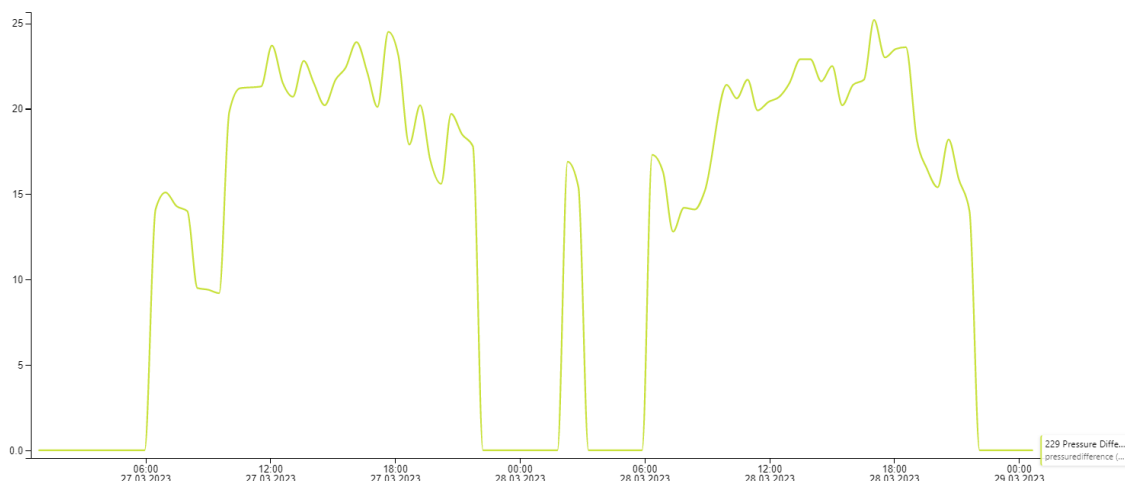
Kuvio 34. Airwits IAQ kuvaajat tilassa 229.

Viivadiagrammiin kuvioon 35 on merkattu eri kokoisten hiukkasten pitoisuudet seurantajaksolla ja niiden maksimiarvot. Saadut tulokset kestävät selvästi raja-arvojen sisällä koko seurantajakson ajan.



Kuvio 35. Airwits PM kuvaajat tilassa 229.

Säätöpellin mittausyhteistä mitattu paine-ero oli käyttöajalla koneen ollessa normaaliteholla noin 20–25 Pa, mikä käy ilmi kuvioista 36. Kuvioista 30 näkee ilmanvaihdon toiminnan eri vuorokauden aikana.



Kuvio 36. Säätopellin paine-ero tilassa 229.

7.6.2 Hetkellinen seuranta

Tilan 229 hetkellinen seuranta toteutettiin 15 henkilön ja mittajaan ollessa paikalla. Mittaus käynnistettiin välittömästi henkilöiden poistuttua tilasta. Ulkolämpötila ollut mittaushetkellä $-1,3\text{ °C}$. 1. mittaus suoritettiin 31.3.2023 klo 13:40 ja 2. mittaus klo 13:45. Mittauksen kesto oli 2 minuuttia. Taulukossa 34 esitetty mittaukset. Tulokset ovat vasemmalta oikealle järjestyksessä sarakkeittain: hiidioksidi, kosteus ja lämpötila.

			ppm CO2 [453]	%RH [453]	°C [453]
Mean			579	15,2	21,1
Max			601	15,3	21,2
Min			551	15,1	21,1

Taulukko 34. Keskiarvo, maksimi- ja minimiarvot.

Ilman liikenopeutta mitattiin samoista mittauspisteistä kahdesta kohtaa tilan kummaltakin puolelta noin 1,7 metrin korkeudesta oleskeluvyöhykkeeltä. Kummassakaan tapauksessa mittari ei värähtänyt eli liikenopeus oli 0 m/s.

Operatiivinen lämpötila mitattiin opettajan työpisteeltä. Työpiste sijaitsee ovesta katsottuna suoraan edessäpäin. Mittauksen aloitus klo 14:18 ja kesto oli 3 minuuttia. Taulukossa 35 operatiivisen lämpötilan tulokset.

			°C TC [005]
Mean			20,8
Max			20,9
Min			20,7

Taulukko 35. Operatiivinen lämpötila 229.

7.7 Yhteenveto mittaustuloksista

Tilojen sisäilman olosuhteet olivat kosteuden osalta varsin samanlaisia joka tilassa. Suhteellinen kosteus jää joka tilassa alle suositellun 20 %, mikä on melko yleistä talviaikana. Yleensä ei suositella ilman kostutusta, sillä siitä aiheutuu riski mikrobikasvulle. Kosteudella voidaan katsoa olevan vain pienehkö yhteys koettuun ilman laatuun, jos aktiviteetti tilassa on lähinnä istumatyötä.

Lämpötilat ovat varsin viileitä, mikä on ongelmallista tiloissa viihtymiselle. Tilassa 229 lämpötilan keskiarvo on ollut seurantajakson aikana alle 20 °C, mikä voidaan lukea toimenpiderajan alittavaksi tulokseksi. Kaikki tilat, paitsi 220 ja 223c jäivät seurantajakson keskiarvon osalta alle Sisäilmastoluokituksen S1-luokan lämpötilan tavoitearvosta 21 °C talvella. Osassa tiloista lämpötila nousee paikoin yli 22 °C, mikä haittaa myös tilassa viihtymistä. Lämmityksen toimintaan olisi hyvä kiinnittää huomiota.

Hiilidioksidipitoisuudet jäivät alle toimenpiderajojen, mikä kertoo ilmanvaihtuvuuden riittävydestä tiloissa. Tiloissa 227 ja 229 hiilidioksidipitoisuudet nousevat tosin yli S1-luokan raja-arvon 750 ppm. Suuremmissa luokahuoneissa pitoisuudet nousevat korkeampiin arvoihin, sillä niissä on enemmän käyttäjiä. Ilmanvaihtoa voisi tehostaa mahdollisesti, jos haluttaisiin päästä S1-luokkaan joka tilan osalta.

TVOC-pitoisuuksien arvioinnista haastavan tekee se, ettei niille ole asetettu Suomessa raja-arvoja. Laitevalmistajakaan ei ole määrittänyt raja-arvoja. TVOC-pitoisuuksia verrattiin Saksan liittovaltion ympäristöviraston antamaan asetukseen, jonka mukaan TVOC-yhdisteiden pitoisuus tulisi olla alle 220 ppb ollakseen terveydelle vaaratonta. TVOC-pitoisuuksista voi huomata poikkeamat keskiarvosta eri tilojen välillä eri aikana. Tiloissa 223c, 227 ja 229 pitoisuudet ovat kohonneet useamman kerran normaalia suurempiin arvoihin. Kyseessä on voinut olla todellinen tilanne tai mittavirhe. 227 tilan TVOC-pitoisuuksiin (keskiarvo seurantajaksoilta 285 ppb) olisi syytä kiinnittää huomiota esim. ilmanvaihtoa tehostamalla tai lähteiden etsimisellä.

Hengitettävien hiukkasten sekä pienhiukkasten pitoisuudet (PM₁₀, PM_{2,5} ja PM₁) eivät kohoa missään tiloissa yli Asumisterveysasetuksen PM₁₀ raja-arvon 50 µg/ m³ ja PM_{2,5} raja-arvon 25 µg/ m³. Poikkeuksena tiloissa 217 ja 223c käydään seurantajakson aikana yli Sisäilmastoluokituksen S1-luokan vaatimuksen 10 µg/ m³.

Ilmanvaihtokanavien säätöpelleiltä mitatuista paine-eroista nähtiin ilmanvaihdon toiminnan vuorokauden ajan mukaan. Ilmanvaihto menee päälle pienemmälle teholla klo 06:00 aikaan. Aamu yhdeksästä iltä kuuteen tai seitsemään ilmanvaihto on normaaliteholla, jonka jälkeen iltä kymmeneen asti taas pienemmällä teholla. Yön aikana klo 22:00-06:00 ilmanvaihto on muuten kiinni, paitsi klo 01:00-02:00 aikaan ilmanvaihtoa käytetään päällä. Kyseessä on todennäköisesti ilmanvaihdon jaksoittainen käyttö, missä ilmanvaihtoa käytetään yöllä päällä vain lyhyen ajan. Aikaohjelma toimii oikein ilmanvaihdon mennessä normaaliteholle kaksi tuntia ennen käyttöaikaa ja kiinni käyttöajan päätyttyä.

Taulukossa 36 on listattu yhteenvetona eri suureiden keskiarvojen mukaiset toimenpiderajojen tai suositusten ylitykset/alitukset seurantajakson ajalta. Punainen väri on havainnollistamassa tapausta, jossa toimenpiderajoja tai suosituksia ei täytetä.

Tila	217	220	223c	227	228	229	Toimenpideraja/suositus
Lämpötila	> 20 °C	> 20 °C	> 20 °C	> 20 °C	> 20 °C	< 20 °C	20-26 °C (Asumisterveysasetus)
Lämpötila	< 21 °C	> 21 °C	> 22 °C	< 21 °C	< 21 °C	< 20 °C	21-22 °C (S1-luokka)
Lämpötila	> 20 °C	> 21 °C	> 22 °C	> 20 °C	> 20 °C	< 20 °C	20-22 °C (S2-luokka)
Lämpötila	> 20 °C	> 21 °C	> 22 °C	> 20 °C	> 20 °C	< 20 °C	20-23 °C (S3-luokka)
Kosteus	< 20 %	< 20 %	< 20 %	< 20 %	< 20 %	< 20 %	20-40 %
Hiilidioksidi	< 750 ppm	< 750 ppm	< 750 ppm	> 750 ppm	< 750 ppm	> 750 ppm	750 ppm (S1-luokka)
TVOC	< 220 ppb	< 220 ppb	< 220 ppb	284 ppb	< 220 ppb	< 220 ppb	< 220 ppb

Taulukko 36. Poikkeamat toimenpiderajoista/suosituksista.

Hetkellisten mittaustulosten osalta jokaisessa tilassa keuhettiin Asumisterveysasetuksen 545/2015 raja-arvojen sisällä. Operatiivisen lämpötilan osalta tiloissa 220 ja 223c esiintyy Sisäilmaluokituksen 2018 enimmäisarvon (23 °C) ylittävät lämpötilat. Tiloissa on suuret ikkunat, joista aurinko pääsee paistamaan sisään. Jos sälekaihtimet olisivat olleet kiinni operatiivinen lämpötila olisi ollut todennäköisesti matalampi. Hetkellisten mittausten ja sensoreiden mittausten vertailusta haastavaa tekee se, että mittarit eivät tallenna arvoja juuri samalla minuutilla.

8 Pohdinta/yhteenveto

Opinnäytetyössä pyrittiin selvittämään sisäilman laatu koulurakennuksen eri tiloissa sekä vertailemaan eri mittareilla saatuja tuloksia keskenään. Sisäilma on voimakkaasti kytköksissä sisätilojen käyttäjien viihtyvyyteen ja hyvinvointiin, minkä takia aihe on tärkeä. Työssä pohdittiin yleisesti sisäilmaongelmia ja niiden vaikutusta yksilön ja yhteisön kannalta. Opinnäytetyön rajaus tehtiin sisäilmaston osalta niin, ettei siinä huomioitu tilan ääni- ja valo-olosuhteita. Teoriaosuuden tieto koottiin eri lähteistä saaduista materiaalista. Eri ohjeet, lait ja asetukset ohjaavat suunnittelua ja sisäilman laadun raja-arvoja, joihin pohjaten tutkimuksen tuloksia on vertailtu. Toiminnallisessa osuudessa saatiin riittävästi tuloksia, joiden pohjalta pystyttiin arvioimaan tiloissa vallitsevaa sisäilman laatua. Tutkimustuloksista kävi ilmi, että sisäilman laadussa löytyy puutteita. Työn teon aikana osaaminen aiheesta lisääntyi huomattavasti, sillä eri lähteitä tuli tutkittua varsin paljon.

Toiminnallisessa osuudessa perehdyttiin eri valmistajien IoT-laitteisiin ja niiden pilvipalveluiden toimintaan. Laitteiden toimintakuntoon saattaminen ja asennus tiloihin saatiin suoritettua suhteellisen tehokkaasti.

Lyhyempi tiedontallennusväli olisi voinut olla aiheellinen Connected Finlandin ja Kontakt.io:n laitteissa, minkä myötä olosuhteista olisi saatu enemmän mittauksia. Laitteiden asennuspaikoilla on ollut varmastikin vaikutusta mittaustuloksiin, sillä laitteita ei pystynyt asentamaan esimerkiksi oleskeluvyöhykkeen keskelle. Samaa suuretta mittaavat sensorit olisi voinut asentaa eri kohtiin tilassa, millä olisi pystytty arvioimaan olosuhteiden tasaisuutta. Ilmanvaihdon päätelaitteiden sijainti mittareihin nähden ja ilman liikkuminen tilassa on myös vaikuttanut saattuihin tuloksiin. Savukokeiden kautta olisi pystynyt havaitsemaan tilojen ilman sekoittuminen, mistä olisi ollut hyötyä tutkimuksessa. Tiloissa on mahdollisesti jouduttu pitämään välillä ikkunoita auki, sillä aistinvaraisesti sisäilman laadussa on esiintynyt puutteita. Tämä vääristää myös osaltaan saatuja mittaustuloksia. 223c sensoreiden asennuspaikka on ollut tilan oven vieressä, minkä myötä tulokset eivät välttämättä vastaa täysin tilassa vallitsevia olosuhteita. Parhaimmat olosuhteet ovat todennäköisesti juuri oven vieressä, sillä ovea avataan päivän aikana useampaan kertaan ja ilmavirtausta syntyy.

Tässä opinnäytetyössä saadut tutkimustulokset voisivat olla hyödyksi tulevaisuudessa mahdollisesti osana laajempia sisäilmatutkimuksia. Jatkoehdotuksena sanoisin, että ilmanvaihdon oikeanlaiseen toimintaan tulisi kiinnittää huomiota. Kun ilmanvaihto toimii oikealla tavalla, myös riskit muiden pitoisuuksien kasvamiseen vähenee. Rakennuksen tilojen painesuhteita voisi olla aihetta seurata ja tutkia, sillä niiden pohjalta olisi mahdollista saada lisätietoa mahdollisten sisäilmaongelmien aiheuttajista.

Tutkimustuloksista pystyy havaitsemaan pääpiirteittäin koulurakennuksen sisäilman laadun nykyhetken tilan. Sisäilman laadun perusteelliseen selvitykseen tarvittaisiin suuremmat resurssit.

Lähteet

- Asumisterveysasetuksen soveltamisohje. 2016. <https://www.valvira.fi/documents/14444/261239/Asumisterveysasetuksen+soveltamisohje/ac8d5e16-97be-456c-9c9c-ce8560f2092e>
- Elina Saukko. Raksystems; 2022. Sisäilmaongelmia aiheuttavat monet muutkin tekijät kuin vain home. <https://raksystems.fi/ajankohtaista/sisailmaongelmien-moninaiset-syyt/>
- Eurovent. 2020. Ilmansuodattimien EN ISO 16890-luokituksen mukaisen suodatinluokan valinta yleisilmanvaihdon sovelluksiin. Bryssel. [eu-rovent rec 423 selection of en iso 16890 rated air filter classes - third edition - 2020 - fi - web.pdf](https://www.eurovent-certification.com/~/media/Products/EN_ISO_16890_Rated_Air_Filter_Classes_-_Third_Edition_-_2020_-_FI_-_web.pdf) (talotekniikkainfo.fi)
- FINVAC ry. 2019. Opas ilmanvaihdon mitoitukseen muissa kuin asuinrakennuksissa. https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/opus_ilmanvaihdon_mitoitukseen_muissa_kuin_asuinrakennuksissa_2019b.pdf
- Harju, P. 2008. Ilmastointitekniikan oppikirja 1. Kouvola: Penan Tieto-Opus KyHengitysliitto. 2022. Huoneilman kosteus. <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/sisailman-olosuhteet/huoneilman-kosteus/>
- Hengitysliitto. 2022. Huoneilman lämpötila. <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/sisailman-laatu/sisailman-olosuhteet/huoneilman-lampotila/>
- Hengitysliitto. 2022. Ilmanvaihdon suodattimet. <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/ilmanvaihdon-suodattimet/>
- Hengitysliitto. 2022. Ilmanvaihtojärjestelmät. <https://www.hengitysliitto.fi/kodin-sisailma-ja-kunnossapito/ilmanvaihto/ilmanvaihtojarjestelmat/>
- Hengitysliitto. 2022b. Sisäilmasta oireilu. <https://www.hengitysliitto.fi/hengitysterveys-ja-sairaudet/hengityssairaudet/sisailmasta-oireilu/>
- Homepakolaiset ry. 2017. Kunnat ja oppilaitosten sisäilmaongelmat. <https://homepakolaiset.fi/ammattiryhmille/opiskelu/kuntapaattajille-ja-viranomaisille/>
- Karelia. 2021. Kartta-wartsila. <https://www.karelia.fi/wp-content/uploads/2021/05/kartta-wartsila-2021-valintakoe-kevat.pdf>
- OAJ. 2017. Koulutus-, kasvatusta- ja tutkimusalan Sisäilmatutkimus
- Pekkanen, J. 2019. Sisäilman epäpuhtaudet. Lääkärikirja Duodecim. <https://www.terveysportti.fi/apps/dtk/ltk/article/ykt01155/search/hiili-dioksidi?db=203>
- Pohjoiskarjala.net julkaisu. 2021. <https://dynastyjulkaisu.pohjoiskarjala.net/joensuu/kokous/2021417-5-22735.PDF>
- RT 14-11239. 2016. Rakennuksen lämpökuvaus. Rakennustieto.
- Sandberg, E (toim). 2014. Ilmastointilaitoksen mitoitus. Ilmastointitekniikka osa 2. Tammerprint 2014.
- Sandberg, E (toim). 2016. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. Ilmastointitekniikka osa 1. Forssa Print 2016.
- SFS-EN 15251. 2007. Sisäympäristön lähtötiedot rakennusten energiatehokkuuden suunnitteluun ja arviointiin ottaen huomioon ilman laatu, lämpöolosuhteet, valaistus ja äänitekniset ominaisuudet.

- Sisäilmastoluokitus. 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset.
- Sisäilmayhdistys ry. 2008a. Perustietoa. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Perustietoa>.
- Sisäilmayhdistys ry. 2008b. Fysikaaliset tekijät. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Fysikaaliset-tekijat>
- Sisäilmayhdistys ry. 2008c. Kemialliset epäpuhtaudet. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Kemialliset-epapuhtaudet>
- Sisäilmayhdistys ry. 2008d. Terveen koulun tuntomerkit. [Terveen koulun tuntomerkit / Sisäilmaston tarkastuslistat / Perustietoa sisäilmasta / Sisäilmayhdistys \(sisailmayhdistys.fi\)](https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveen-koulun-tuntomerkit/Sisailmaston-tarkastuslistat/Perustietoa-sisailmasta/Sisailmayhdistys)
- Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545> (Asumisterveysasetus)
- Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisu. 2020. HTP-ARVOT 2020. Haitallisiksi tunnetut pitoisuudet. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162457/STM_2020_24_J.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Talotekniikkainfo. 2018. Sisäilmasto ja ilmanvaihto-opas. https://talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/talotekniikkainfo_sisailmasto_ja_ilmanvaihto_opas_30.1.2018.pdf
- THL. 2020. Tutkimus: Koulun sisäilman laatua ei voi luotettavasti arvioida oppilaiden oireilun perusteella. <https://thl.fi/fi/-/tutkimus-koulun-sisailman-laatu-ei-voi-luotettavasti-arvioida-oppilaiden-oireilun-perusteella>
- THL. 2022. Mitkä tekijät vaikuttavat sisäilman laatuun? <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/sisailma/mitka-tekijat-vaikuttavat-sisailman-laatuun>
- Tilan ulkoilmavirran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella. 2018.
- Valtioneuvoston kanslia. 2023a. 1950–1960-lukujen tiiliverhoiltu betonirakennus. Terveet tilat 2028. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1950-1960-lukujen-tiiliverhoiltu-betonirakennus/katunakyma>
- Valtioneuvoston kanslia. 2023b. 1970–1980-lukujen elementtirakennus. Terveet tilat 2028. <https://tilatjaterveys.fi/rakennukset#/1970-1980-lukujen-elementtirakennus/katunakyma>
- Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta 1009/2017. 2017. Ympäristöministeriö. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>

Liite 1 Halton PRA 200 säätöpellin k-kerroin taulukko

Halton PRA 200, k-kerroin

Yksiköitä Aukko a	Ilmavirta (qv) [l/s] Paine-ero (dP m) [Pa]	Ilmavirta (qv) [m3/h] Paine-ero (dP m) [Pa]	Ilmavirta (qv) [cfm] Paine-ero (dP m) [in WC]
1	7.1	25.6	237.4
1.5	8	28.8	267.5
2	8.8	31.7	294.3
2.5	10	36.0	334.4
3	11.4	41.0	381.2
3.5	13.1	47.2	438.0
4	15.1	54.4	504.9
4.5	17.5	63.0	585.2
5	20.5	73.8	685.5