

-  Kuuma
-  Lämmin
-  Hiukan lämmin
-  Sopiva
-  Hiukan viileä
-  Viileä
-  Kylmä

Lämpöviihtyvyyden mittaukset toimistotiloissa, Future Spaces-projekti

Kirjoittajat: Mia Ala-Juusela, Jarmo Laamanen

Luottamuksellisuus: VTT Public

Sisällysluettelo

Johdanto ja tavoite	3
1. Kohteiden kuvaus	3
2. Mittaukset, mittausmenetelmät ja mittauslaitteet	4
3. Tulokset: Lämpöviihtyvyys	5
4. Tavoitearvot ja tulosten tarkastelu.....	11
5. Johtopäätökset	15
Lähdeviitteet.....	15

Johdanto ja tavoite

Tässä raportissa esitetyt mittaukset liittyvät Tampereen yliopiston ja VTT:n sekä lukuisten yritysten yhteiseen Future Spaces -projektiin. Hankkeessa kehitetään ratkaisuja rakennusten laadukkaan sisäympäristön varmistamiseksi.

Sisäympäristö muodostuu monesta asiasta, tärkeimpinä sisäilman laatu ja lämpöviihtyvyys. Myös psyykkiset asiat vaikuttavat kokemukseemme sisäympäristöstä, samoin visuaalinen ja akustinen ympäristö.

Näiden mittausten avulla pyritään selvittämään, miten hyvin uusi lämpöviihtyvyyden arviointimenetelmä ennustaa lämpöviihtyvyyttä eri olosuhteissa. Kyselytutkimuksen lisäksi samassa tilassa mitataan erilaisilla mittalaitteilla fyysisiä olosuhteita, kuten säteilylämpötilaa, huonelämpötilaa ja ilman virtausnopeutta ("vetoa"). Lisäksi lämpöviihtyvyyttä selvitetään kyselytutkimuksella, jossa kysytään tilan käyttäjiltä kokemusta lämpötilasta seitsenasteisella skaalalla kuuman ja kylmän välillä (-3.....3).

1. Kohteiden kuvaus



Kuva 1. F (vas.) ja K (oik.) toimistorakennukset.

Pääkaupunkiseudulla sijaitseva F toimistorakennus (jatkossa "F-rakennus") on valmistunut vuonna 1972. Rakennuksessa on jäähdytyksellä varustettu koneellinen tulo/poisto-ilmanvaihto. Tuloilma johdetaan huoneisiin ikkunapenkkiin asennetuilla suutinkonvektoreilla ja poistoilma johdetaan ulos katossa olevilla lautasventtiileillä. Lämmönlähteenä ilmalämmitysjärjestelmässä on kaukolämpö.

Etelä-Suomessa sijaitseva K toimistorakennus (jatkossa "K-rakennus") on valmistunut vuonna 1971 ja sen pinta-ala on 1105 m². Rakennuksessa on jäähdytyksellä varustettu koneellinen tulo/poisto-ilmanvaihto. Tuloilma johdetaan huoneisiin pääosin suutinkanavilla ja poistoilma johdetaan ulos katossa olevilla lautasventtiileillä. Lämmitysjärjestelmänä on kaukolämmöllä toimivat vesikiertoiset patterit.

2. Mittaukset, mittausten menetelmät ja mittauslaitteet

Mittaukset tehtiin vuoden 2021 aikana kahdessa toimistotalossa F- (pääkaupunkiseutu) ja K- (Etelä-Suomi) rakennuksissa (Kuva 1), talvi- ja kesäolosuhteissa. K-rakennuksessa mittauksia jatkettiin vielä alkuvuonna 2022. Mittauksissa haluttiin nähdä mittaustulosten eroavaisuuksia eri ulkolämpötilalla ja eri säätyypeillä. Tutkimuksessa mitattiin ilman säteilylämpötilaa, huone- lämpötilaa ja ilman virtausnopeutta ("vetoa"). Mittauspisteet olivat oleskeluvyöhykkeellä, joka on vähintään 0,6 m seinästä ja maksimissaan 1,8 m korkeudella lattiasta. F-rakennuksessa kaikki mittaukset tehtiin toimistotyöpisteissä, K-rakennuksessa oli myös mukana yleisiä tiloja (ruokala ja kabinetti).

Mittaukset tehtiin kussakin mittauspisteessä 3 eri korkeudelta. Säteilylämpötilaa mitattiin niin pitkään kunnes mittauslukema tasaantui. Ilmavirran nopeutta mitattiin mittauspisteen eri kohdista ja korkeuksista 3 minuutin keskiarvona. Mittaushuoneet olivat samat joissa Tampereen Yliopisto suorittaa muita sisäilmamittauksia, joista ilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta käytetään myös tämän raportin laskelmiin.

Huoneissa, joissa oli tilan käyttäjä/käyttäjää läsnä, mitattiin myös lämpöviihtyvyyden arvoa (Thermal Sensation Vote, TSV) kyselytutkimuksella, asteikolla -3...3 (kylmä...kuuma). Ennen lämpöviihtyvyyden mittausta mittaukseen osallistuville esiteltiin mittauksen tarkoitus, perusteet ja sisältö sekä lämpöviihtyvyyden asteikon eri arvojen kuvaukset (mitä tarkoittaa esim. "viileä" tässä yhteydessä). Henkilötietoja tai henkilökohtaiseen terveyteen liittyviä tietoja ei kerätty.

Fysikaalisten suureiden mittaukset tehtiin kalibroiduilla mittalaitteilla (Kuva 2) soveltaen ASHRAE 55P-standardia (2003) /1/ ja Sisäilmaluokitusta 2018 /2/. TSV-arvon mittaamiseen käytettiin erityisesti tätä käyttötarkoitusta varten kehitettyä hymiönaama-asteikkoa (Kuva 3), jonka avulla ASHRAE 55P-standardin mukaista lämpöviihtyvyyden asteikkoa pyrittiin saamaan tilan käyttäjälle intuitiivisemmaksi. TSV-arvon lisäksi kysyttiin suullisesti arviota mahdollisesta vedontunteesta.

Taulukko 1. Käytetyt mittalaitteet ja epävarmuudet.

Mittaussuure	Mittalaite	Epävarmuus
Ilmavirran nopeus m/s ja sitä vastaava lämpötila °C	Swema Air 3000	±0,04 m/s (mitt.alueella 0,05 – 1,0 m/s) ± 0,1 °C
Säteilylämpötila	Swema Air 3000 + SWA 52 globe	± 0,1 °C
Lämpöviihtyvyys	Lämpöviihtyvyys-asteikko	N/A



Kuva 2. Ilmavirran nopeuden ja lämpötilan mittauslaite (vas.) ja säteilylämpötilan mittauslaite (musta pallo, oik.).

	<input type="checkbox"/> Kuuma
	<input type="checkbox"/> Lämmin
	<input type="checkbox"/> Hiukan lämmin
	<input type="checkbox"/> Sopiva
	<input type="checkbox"/> Hiukan viileä
	<input type="checkbox"/> Viileä
	<input type="checkbox"/> Kylmä

Kuva 3. Lämpöviihtyvyyden mittari.

3. Tulokset: Lämpöviihtyvyys

F-rakennuksen mittaustulokset on koottu sivulle 6 (Taulukko 2) ja tarkemmat sääolosuhteet ja ulkoilman tila sivulle 7 (Taulukko 3). K-rakennuksen vastaavat arvot esitetään sivuilla 9 ja 10 (Taulukko 4 ja Taulukko 5). Tulosten havainnollistamiseksi arvot on esitetty myös kuvissa (Kuva 4, Kuva 5 ja Kuva 6: F-rakennus; Kuva 7 ja Kuva 8: K-rakennus).

Mitatut suureet:

- **Säteilylämpötila, °C:** keskiarvo huoneen pintojen lämpötiloista
- **Ilmavirran nopeus, m/s:** mitattu ilmavirran nopeus mittauspisteessä eri korkeudelta

- **Ilmavirran lämpötila, °C:** mitattu lämpötila ilmavirran nopeuden mittauspisteessä eri korkeudelta
- **DR-arvo, %:** ilmoittaa vetoon tyytymättömien ihmisten osuuden (%) ilman nopeuden, turbulenssiasteen ja ilmavirran lämpötilan funktiona
- **TSV:** Lämpöviihtyvyyssarvio, tilan käyttäjän arvio tilan lämpöolosuhteista (esitetty taulukoissa DR-arvon yhteydessä, silloin kun TSV arvo on ollut saatavissa)

Taulukko 2. Mittaustulokset F-rakennuksesta, huoneiden numerot anonymisoitu. Tarkemmat tiedot sääolosuhteista ja ulkoilman olosuhteista Taulukossa 3.

Mitattu tila Pvm; ulkolämpötila	Säteily- lämpötila, °C 0,1 /0,6 /1,1 m	Ilmavirran nopeus, m/s 0,1 /0,6 /1,1 m	Ilmavirran lämpötila, °C 0,1 /0,6 /1,1 m	DR-arvo, % 0,1 /0,6 /1,1 m TSV-arvo
FH1 ^{x)} 10.3.2021; -8 °C	21,1/ 21,5/ 21,8	0,18/ 0,07/ 0,05	20,5/ 20,7/ 20,9	20,9/ 5,5/ 1,6 TSV: -3
FH2 ^{y)} 10.3.2021; -8 °C	20,1/ 20,5/ 20,7	0,03/ 0,02/ 0,03	19,1/ 19,6/ 20,2	0,0/ 0,0/ 0,0
FH1 ^{x)} 11.3.2021; -1 °C	21,3/ 21,6/ 21,9	0,14/ 0,07/ 0,07	20,8/ 21,1/ 21,1	20,1/ 5,1/ 2,9 TSV: -1
FH2 ^{y)} 11.3.2021; -1 °C	20,3/ 20,6/ 20,8	0,03/ 0,03/ 0,05	19,6/ 20,3/ 20,9	1,1/ 0,0/ 0,0
FH3 ^{z)} 11.3.2021; -1 °C	19,3/ 19,5/ 19,7	0,03/ 0,08/ 0,08	18,5/ 18,8/ 18,9	1,5/ 8,2/ 8,8
FH1 ^{x)} 03.6.2021; 19 °C	23,2/ 23,4/ 23,6	0,05/ 0,08/ 0,09	22,8/ 23,0/ 23,1	0,0/ 0,0/ 0,0 TSV: +1
FH2 ^{y)} 03.6.2021; 19 °C	21,5/ 21,7/ 22,0 ^{x)}	0,03/ 0,02/ 0,03	21,3/ 21,5/ 21,8	0,0/ 0,0/ 0,0 TSV: 0
FH1 ^{x)} 13.8.2021; 23 °C	22,5/ 22,6/ 22,8	0,02/ 0,07/ 0,05	22,2/ 22,3/ 22,4	0,0/ 2,0/ 0,0 TSV: 0
FH2 ^{y)} 13.8.2021; 23 °C	22,2/ 22,3/ 22,4	0,03/ 0,02/ 0,03	21,3/ 21,7/ 22,0	0,0/ 0,0/ 0,0
FH1 ^{x)} 7.12.2021; -17 °C	19,9/ 20,0/ 20,2	0,18/ 0,04/ 0,09	19,7/ 19,8/ 19,9	23,1/ 1,0/ 10,6
FH2 ^{y)} 7.12.2021; -17°C	19,7/ 19,8/ 19,9	0,04/ 0,05/ 0,06	18,1/ 18,4/ 18,8	2,3/ 2,0/ 3,5

^{x)} mittauspiste ikkunan vieressä olevassa työpisteessä

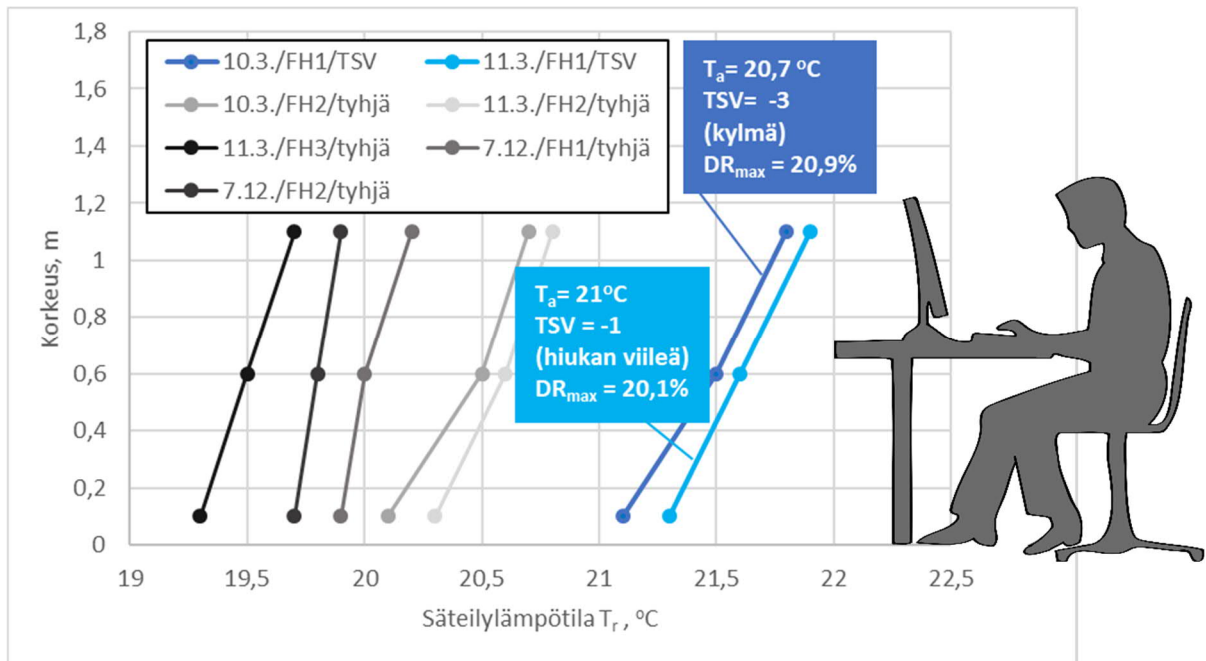
^{y)} mittauspiste keskellä huonetta olevassa työpisteessä

^{z)} huone tyhjillään

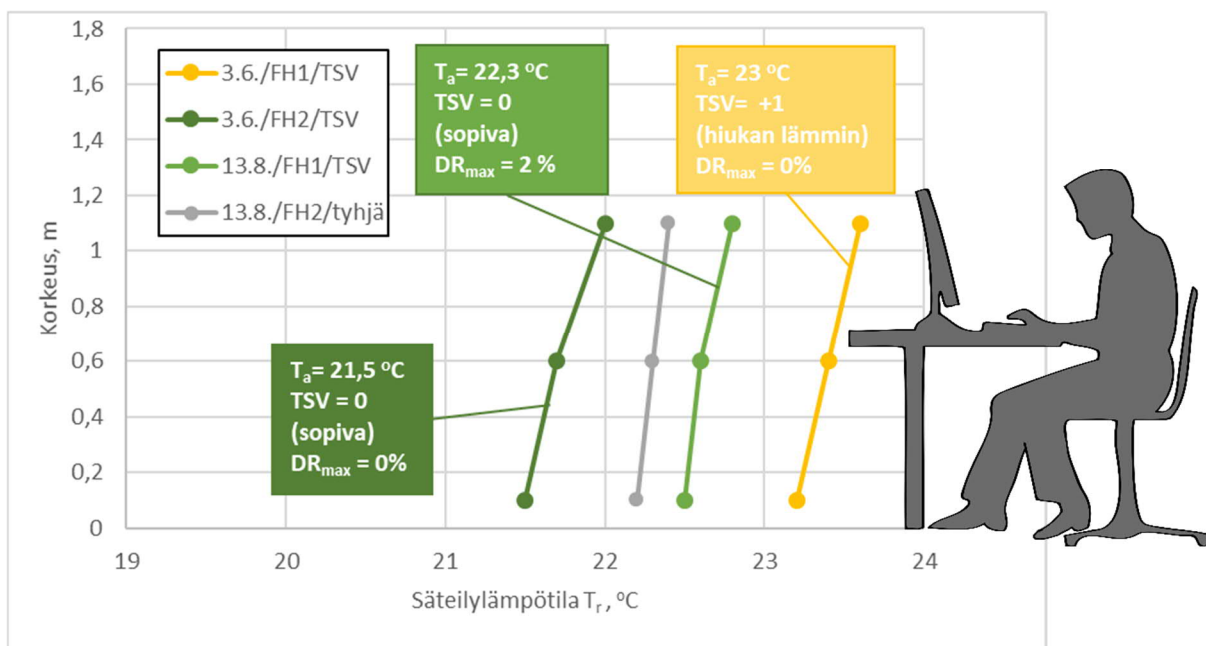
Taulukossa esitettyjen lisäksi TSV-arvo saatiin FH1 tilasta 10.3. iltapäivällä: -2 (viileä).

Taulukko 3. Sääolosuhteet F-rakennuksen mittauksissa. Lähde: Ilmatieteen laitos.

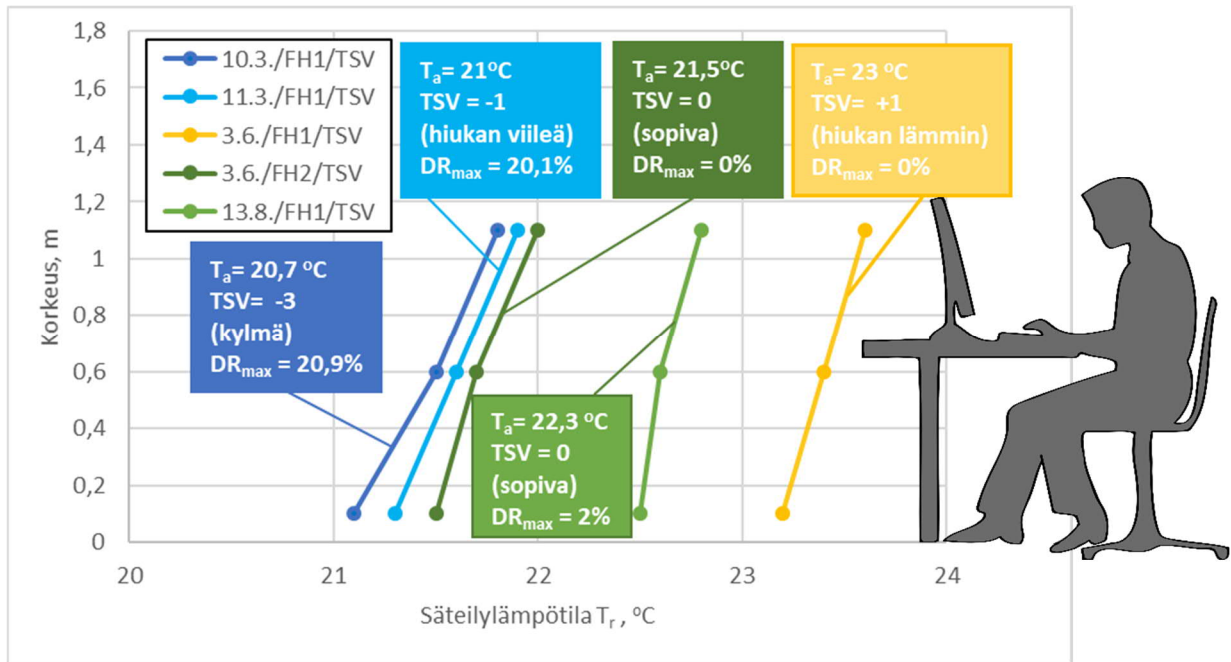
Pvm	Ulkolämpötila, °C	Ulkoilman kosteus, %	Tuuli, m/s, suunta	Aurinko/pilvisuus
10.03.21	-7...-10	57	7 m/s itä	aurinkoista 0/8
11.03.21	-2...0	68	8 m/s kaakko	pilvistä 7/8
03.06.21	19	39	5 m/s itä	aurinkoista 1/8
13.08.21	23	69	2 m/s luode	aurinkoista 1/8
07.12.21	-17	79	2 m/s koillinen	aurinkoista 2/8



Kuva 4. F-rakennuksen kevään mittaustulokset havainnollistettuna: säteilylämpötila korkeuden funktiona. Ihmisen koko esitetty viitteellisesti. TSV-arvot vain yhdestä huoneesta.



Kuva 5. F-rakennuksen kesäajan mittaustulokset havainnollistettuna: säteilylämpötila korkeuden funktiona. Ihmisen koko esitetty viitteellisesti. TSV-arvo oli saatavissa kolmessa mittauksessa.



Kuva 6. F-rakennuksen kesä- ja talvimittaustulokset havainnollistettuna, kun TSV arvo oli saatavissa: säteilylämpötila korkeuden funktiona. Ihmisen koko esitetty viitteellisesti.

Taulukko 4. Mittaustulokset K-rakennuksesta, huoneen numerot anonymisoitu. Tarkemmat tiedot sääolosuhteista ja ulkoilman olosuhteista Taulukossa 5.

Mitattu tila Pvm; ulkolämpötila	Säteily- lämpötila, °C 0,1 /0,6 /1,1 m	Ilmavirran nopeus, m/s 0,1 /0,6 /1,1 m	Ilmavirran lämpötila, °C 0,1 /0,6 /1,1 m	DR-arvo, % 0,1 /0,6 /1,1 m TSV-arvo
KH1 ^{x)} 18.3.2021; -5 °C	22,0/ 22,1/ 22,3	0,05/ 0,02/ 0,03	21,2/ 21,4/ 21,7	2,1/ 0,0/ 0,0 TSV: -1
KH2 ^{x)} 18.3.2021; -5 °C	21,7/ 22,0/ 22,2	0,04/ 0,03/ 0,03	21,4/ 21,5/ 21,7	0,0/ 0,0/ 0,0
K ruokala ^{y)} 18.3.2021; -5 °C	20,9/ 22,9/ 24,6 ^{x)}	0,11/ 0,06/ 0,11	20,0/ 22,1/ 23,2	10,2/ 2,6/ 8,7
KH kabinetti ^{x)} 18.3.2021; -5 °C	21,2/ 21,4/ 21,6	0,16/ 0,04/ 0,04	19,7/ 20,1/ 20,5	19,6/ 0,0/ 1,1
K ruokala ^{x)} 15.6.2021; 20 °C	23,5/ 23,6/ 23,9	0,04/ 0,02/ 0,02	23,1/ 23,3/ 23,4	0,0/ 0,0/0,0
KH1 ^{x)} 15.6.2021; 20 °C	23,8/ 23,9/ 24,1	0,03/ 0,03/ 0,03	23,3/ 23,4/ 23,4	0,0/ 0,0/ 0,0
KH2 ^{x)} 15.6.2021; 20 °C	24,0/ 24,3/ 24,5	0,09/ 0,05/ 0,02	23,7/ 24,0/ 24,1	0,0/ 0,0/ 0,0
KH kabinetti ^{x)} 15.6.2021; 20 °C	24,1/ 24,1/ 24,2	0,09/ 0,09/ 0,06	23,4/ 23,7/ 24,0	0,0/ 0,0/ 0,0
K ruokala ^{x)} 27.7.2021; 25 °C	25,9/ 26,3/ 26,3 ^{x)}	0,08/ 0,07/ 0,03	25,3/ 25,7/ 25,7	0,0/ 0,0/ 0,0
KH1 ^{x)} 27.7.2021; 25 °C	24,5/ 24,6/ 24,9	0,08/ 0,05/ 0,05	24,1/ 24,3/ 24,7	0,0/ 0,0/ 0,0
KH2 ^{x)} 27.7.2021; 25 °C	24,2/ 24,4/ 24,6	0,08/ 0,07/ 0,08	23,3/ 23,6/ 23,9	0,0/ 0,0/ 0,0
KH kabinetti ^{x)} 27.7.2021; 25 °C	24,0/ 24,1/ 24,2	0,02/ 0,03/ 0,02	23,5/ 23,7/ 23,8	0,0/ 0,0/ 0,0
K ruokala ^{x)} 8.12.2021; -20 °C	17,5/ 18,6/ 18,7	0,06/ 0,05/ 0,16	18,2/ 18,4/ 19,2	3,8/ 3,5/ 19,1
KH2 ^{x)} 8.12.2021; -20 °C	20,3/ 20,5/ 20,7	0,26/ 0,09/ 0,04	18,9/ 19,8/ 20,0	29,0/ 7,1/ 0,5 TSV: -2
KH kabinetti ^{x)} 8.12.2021; -20 °C	20,4/ 20,7/ 20,8	0,13/ 0,13/ 0,19	19,6/ 19,9/ 19,4	16,8/ 16,2/ 25,8
KH2 ^{x)} 19.1.2022; 0 °C	20,5/ 21,0/ 21,3	0,11/ 0,07/ 0,10	19,7/ 20,8/ 21,0	12,4/ 3,7/ 10,2 TSV: -1
KH2 ^{x)} 3.2.2022; -18 °C	20,5/ 20,9/ 21,0	0,17/ 0,04/ 0,07	19,2/ 19,6/ 19,8	22,0/ 4,1/ 5,6 TSV: -2

^{y)} mittauksessa auringon säteilyvaikutusta, mittauspiste ikkunan vieressä

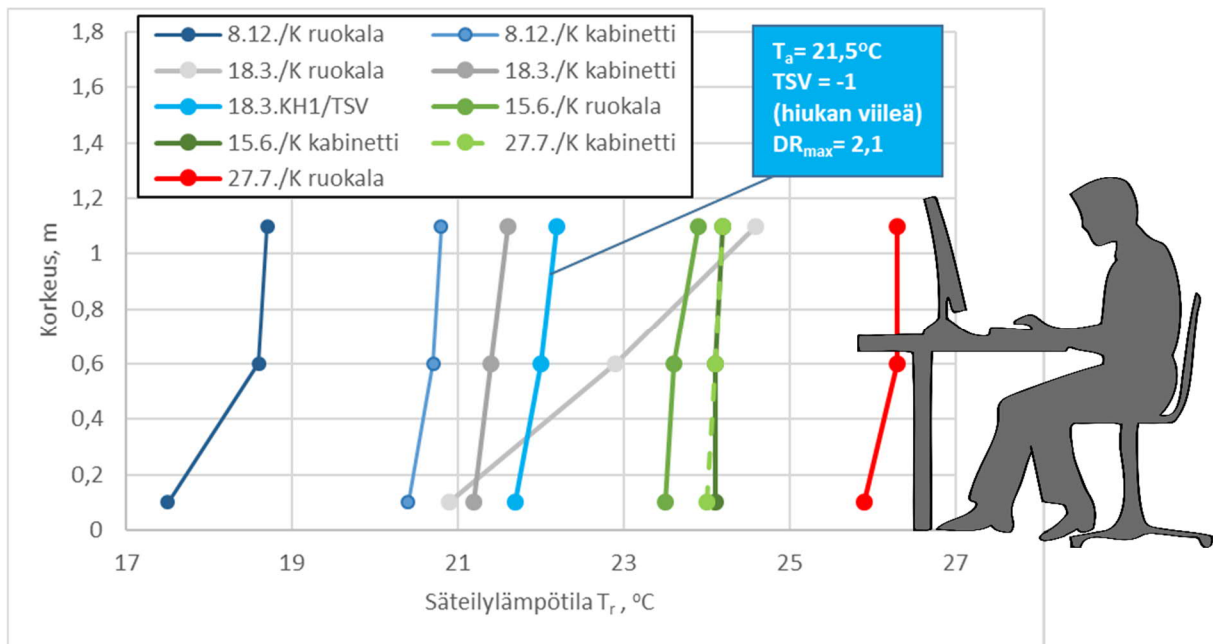
^{x)} mittauspiste ikkunan vieressä

Taulukossa esitettyjen lisäksi TSV-arvot saatiin KH1 tilasta 18.3. keskipäivällä: 0 (sopiva). Kesän mittauksista ei saatu TSV-arvoja, koska mitattavissa tiloissa ei työskennellyt ihmisiä (etätyö). Joulukuun 2021 KH2 mittauksessa saatiin kolmen henkilön arvio lämpöviihtyvyydestä

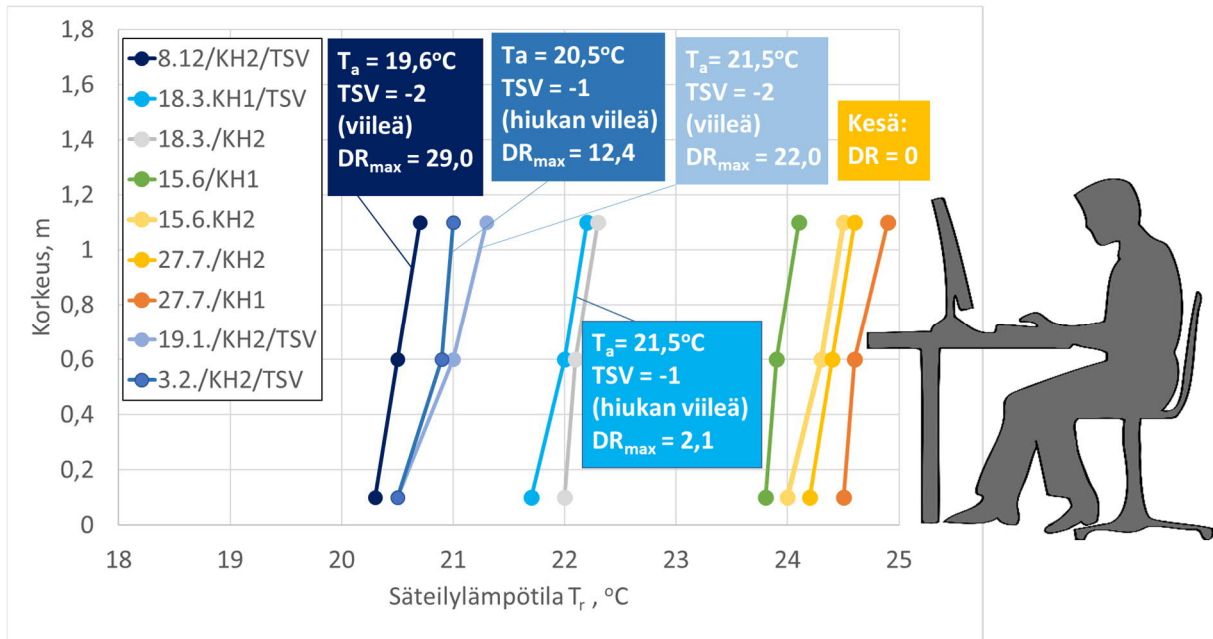
(-1,-2 ja -3 > k.a. -2). Tammikuun 2022 KH2 mittauksessa saatiin kahden henkilön arvio lämpöviihtyvyydestä (molemmat -1), samoin helmikuun 2022 mittauksessa (-1 ja -3 > k.a. -2).

Taulukko 5. Sääolosuhteet K-rakennuksen mittauksissa. Lähde: Ilmatieteen laitos.

Pvm	Ulkolämpötila, °C	Ulkoilman kosteus, %	Tuuli, m/s, suunta	Aurinko/pilvisuus
18.03.21	-4...-5	60	5 m/s koillinen	aurinkoista 1/8
15.06.21	20...21	47	4 m/s lounas	aurinkoista 0/8
27.7.21	24...26	44	3 m/s lounas	aurinkoista 1/8
8.12.21	-20	74	2 m/s koillinen	aurinkoista 2/8
19.1.22	0...1	71	2 m/s koillinen	puolipilveä 4/8
3.2.22	-17...-19	75	3 m/s pohjoinen	aurinkoista 1/8



Kuva 7. K-rakennuksen ruokalan ja kabinetin mittaustulokset havainnollistettuna: säteilylämpötila korkeuden funktiona. Ihmisen koko esitetty viitteellisesti. KH1 kevätmittaus on esitetty vertailun vuoksi (TSV-arvo saatavilla). Kesäajan mittauksista ei saatu TSV arvoja.



Kuva 8. K-rakennuksen huoneiden KH1 ja KH2 mittaustulokset havainnollistettuna: säteilylämpötila korkeuden funktiona. Ihmisen koko esitetty viitteellisesti. Kesäajan mittauksista ei saatu TSV arvoja.

4. Tavoitearvot ja tulosten tarkastelu

Sisäilmastoluokituksen 2018 lämpöolojen suunnittelu- ja tavoitearvoja

	S1 ^{x)}	S2 ^{y)}
Operatiivinen lämpötila tavoitearvo talvi/kesä °C	20-23 / 20-27	20-23 / 20-27
Ilmavirran nopeus, ($t_{ilma} = 21^\circ\text{C}$)	<0,15	<0,15
Ilmavirran nopeus, ($t_{ilma} = 23-25^\circ\text{C}$)	<0,15-0,20	<0,20-0,25
Pystysuuntainen It-ero (0,1/1,1 m) °C	<2	<3

^{x)} S1 yksilöllinen sisäilmasto, ^{y)} S2 hyvä sisäilmasto

Operatiivinen lämpötila

Operatiivinen lämpötila voidaan laskea ilman lämpötilan ja säteilylämpötilan keskiarvona, kun näiden lämpötilojen erotus on alle 4°C ja ilman nopeus on alle $0,2\text{ m/s}$ /1/, kuten kaikissa tässä esitetyissä mittauksissa keskimääräinen nopeus. Jos kevätajan 2021 tuloksia (Taulukko 2: F ja Taulukko 4: K) verrataan operatiivisen lämpötilan tavoitearvoon, niin se pysyi tavoitearvojen sisällä, huolimatta K-rakennuksen ruokalassa mitatuista korkeista lämpötiloista $1,1\text{ m}$ korkeudella, johon aurinko paistoi mittauksen aikana. Operatiivinen lämpötila kuitenkin kuvaa koko ihmiskehon alueella tapahtuvaa lämmönsiirtoa, jolloin yksittäisen mittauspisteen vaikutus pienenee. Myös kesäajan 2021 operatiiviset lämpötilat olivat tavoitearvojen sisällä kaikissa mittauspisteissä. Joulukuussa 2021 kovien pakkasten aikaan operatiivisen lämpötilan tavoitearvo

alittui K-rakennuksen ruokalassa. Talvella 2022 K-rakennuksen huoneessa 2 operatiivinen lämpötila pysyi tavoitearvojen sisällä, vaikka ilman lämpötila oli hieman alle talven operatiivisen lämpötilan tavoitetason.

Ilmavirran nopeus

Kevätmittauksissa ilmavirran nopeuden tavoitearvo ylittyi 10.3.2021 F-rakennuksessa huoneessa 1 (ikkunan vieressä) vain lattiatasolla (nilkan korkeus), jossa myös vectoriski eli DR-arvo oli kohonnut (Taulukko 2). Samassa mittauspisteessä 11.3.2021 oli myös kohonneita mitaustuloksia, joskaan ei niin korkeita. Työpisteen henkilö ilmoittikin työpisteen lämpöviihtyvyyden kyselytutkimuksessa vedon tunteesta. Joulukuussa 2021 sama tilanne toistui, ilmavirran nopeuden tavoitearvo ylittyi lattiatasolla. F-rakennuksen huoneessa 2 ilmavirran nopeus pysyi tavoitearvoissa sekä maaliskuussa että joulukuussa 2021.

Kevätmittauksissa 2021 ilmavirran nopeuden tavoitearvo ylittyi K-rakennuksessa kabinetissa (ikkunan vieressä) lattiatasolla, jossa myös vectoriski eli DR-arvo oli kohonnut (Taulukko 4). Joulukuussa 2021 ja helmikuussa 2022 kovien pakkasten aikaan K-rakennuksen huoneessa 2 ilmavirran nopeuden tavoitearvo ylittyi lattiatasolla reilusti ja se näkyi myös selvästi TSV-arvossa sekä vectoriskin DR-arvossa. Myös henkilökunnan haastatteluissa valitettiin vedon ja viileyden tunteesta.

Kesämittauksissa ilmavirran nopeuden tavoitearvo alittui ja oli alhainen jokaisessa mittauspisteessä (Taulukko 2 ja Taulukko 4).

Pystysuuntainen lämpötilaero























Pystysuuntaisen lämpötilaeron tavoitearvo (0,1/1,1 m) ylittyi kevätmittauksessa 2021 vain K-rakennuksen ruokalassa, johon aurinko paistoi mittauksen aikana (Taulukko 4). Kesämittauksissa ei ollut ylityksiä, eikä myöskään joulukuussa 2021 tai helmikuussa 2022 kovien pakkasten aikaan (Taulukko 2: F ja Taulukko 4: K).

Lämpöviihtyvyys (TSV) ja PMV-arvot

Lämpöviihtyvyyden tavoitearvot määritellään ns. Predicted Mean Vote (PMV) eli ennustetun keskimääräisen lämpöviihtyvyydsarvion mukaisesti. On huomattava kuitenkin, että PMV-arvo edustaa suuren joukon keskimääräistä arviota lämpöviihtyvyydestä, eikä sellaisenaan täysin sovellu yksittäisten arvioiden tarkasteluun.

PMV-arvot riippuvat tässä raportissa esitettyjen mitaustulosten lisäksi suhteellisesta kosteudesta, jonka arvo saatiin Tampereen Yliopiston mittauksista. Niissä tapauksissa, joissa ei mitattu ilman nopeutta ja lämpötilaa VTT:n toimesta, käytettiin Tampereen Yliopiston mittaamaa ilman lämpötilaa. Mitaustulosten perusteella lasketut PMV-arvot esitetään saatavilla olleiden TSV-arvojen rinnalla (Taulukko 6 ja Kuva 9). Laskentaan käytettiin CBE Thermal Comfort työkalua. /3/ Mitaustulosten puuttuessa on arvioitu, että operatiivinen lämpötila on lähellä ilman lämpötilaa ja että ilman nopeus on alle 0,1 m/s. Näitä voidaan pitää melko hyvinä approksimaatioina, sillä tämän mittausdatan muissa kevään mittauspisteissä ero operatiivisen lämpötilan ja ilman lämpötilan välillä on hyvin pieni (<0,3 °C) ja ilman liikenopeus kaikissa paitsi yhdessä tapauksessa (KH2 8.12.2021) on alle 0,2 m/s (useimmiten selvästi alle 0,1 m/s). Metabolialarviona on käytetty tyypillistä istuen tehtävän toimistotyön tasoa 1,1 met ja vaatteiden eristävyudeksi on arvioitu tyypillisen talvivaatetuksen mukaan 1 clo:ksi talvella ja 0,6 clo:ksi kesällä (silmämääräinen arvio mitaustilanteissa).

Taulukko 6. Mittaustulosten ja niiden puuttuessa approksimaatioiden perusteella lasketut PMV- ja PPD-arvot verrattuna tilan käyttäjien lämpöviihtyvyyssarvioon (TSV). (vuosi = 2021, paitsi kahdessa viimeisessä mittauksessa 19.1. ja 3.2.2022.)

Pvm/tila/aika	T _a (°C)	T _o (°C)	rh(%)	clo	TSV		PMV		PPD
10.3./FH1/klo 10	20,7	21,1	10,1	1	-3		-0,56		12%
10.3./FH1/klo 14*	22,7	22,7	9,1	1	-2		-0,20		6%
11.3./FH1/klo 10	21	21,3	12,9	1	-1		-0,5		10%
18.3./KH1/klo 9:30	21,5	21,8	13,8	1	-1		-0,34		7%
18.3./KH1/klo 12:30*	23,4	23,4	12,5	1	0		0,02		5%
3.6./FH1/klo 11	23,0	23,2	27,1	0,6	+1		-0,65		14%
3.6./FH2/klo 11:20	21,5	21,6	27,6	0,6	0		-1,11		31%
13.8./FH1/klo 11:20	22,3	22,5	53,0	0,6	0		-0,68		15%
8.12./KH2/klo 10:25	19,6	20,0	6,7	1	-2**		-0,89		22%
19.1./KH2/klo 10	20,5	20,72	18,2	1	-1**		-0,60		12%
3.2./KH2/klo 10	19,53	20,17	9,43	1	-2**		-0,77		17%

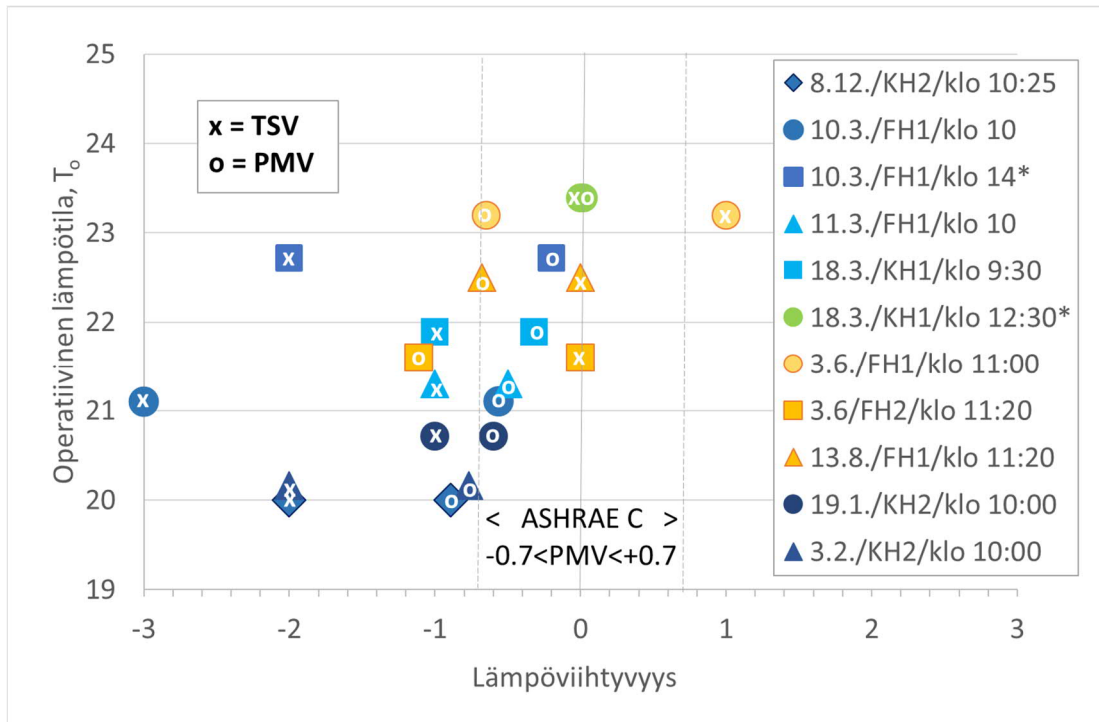
*oletus että T_o = T_a, koska ei mittausta säteilylämpötilasta

**8.12.2021 kolme TSV-arvoa saatu: -1, -2 & -3 > k.a. -2; 19.1.2022 kaksi TSV arvoa, molemmat -1; 3.2.2022 kaksi arvoa, -1 ja -3 > k.a. -2.

ASHRAE 55P-standardissa /1/ määritellään kolme lämpöviihtyvyyssluokkaa (Taulukko 7). PPD-arvo (Predicted Percentage of Dissatisfied) kertoo sen, kuinka suuri osa tilan käyttäjistä olisi todennäköisesti tyytymätön tilan lämpöolosuhteisiin. Jos tilasta saatavat PPD- ja PMV-arvot eivät mahdu kyseisten luokkien vaihteluväleihin, ei tila täytä standardin vaatimuksia riittävälle lämpöviihtyvyydelle.

Taulukko 7. ASHRAE 55P-standardin lämpöviihtyvyyssluokat. /1/

Luokka	PPD	PMV väli
A	<6	-0.2<PMV<+0.2
B	<10	-0.5<PMV<+0.5
C	<15	-0.7<PMV<+0.7



Kuva 9. PMV- ja TSV-arvot operatiivisen lämpötilan funktiona. (* $T_o=T_a$)

Yksittäisen TSV-mittauksen tavoitearvona voidaan pitää arvoa 0 (sopiva), joka saavutettiin kahdessa kesän mittauksessa F-rakennuksessa ja yhdessä kevään 2021 mittauksista K-rakennuksessa. Yhdessä kevättalven mittauksessa F-rakennuksessa annettu arvio -3 (kylmä) on kaukana tavoitearvojen ulkopuolella. Samassa tilassa TSV-arvo on myös johdonmukaisesti paljon pienempi kuin PMV-arvo. Tämä saattaa johtua ko. tilassa vallinneesta vedon tunteesta, joka tyypillisesti vähentää lämpöolosuhteisiin tyytyväisten osuutta (mitä myös DR-arvo kuvaa, Taulukko 2). Ero näiden arvojen välillä on tähän nähden kuitenkin kohtalaisen suuri. Kyseisen tilan operatiivinen lämpötila oli myös tavoitearvojen sisällä, eikä säteilylämpötila ollut merkittävän alhainen. Toisaalta tässä samassa tilassa kesäajan mittauksissa TSV-arvo on johdonmukaisesti isompi kuin PMV-arvo (Kuva 9). Onkin mielenkiintoista nähdä, tuoko projektin seuraavassa vaiheessa toteutettava ihmiskehon eksergiankulutukseen perustuva analyysi tähän lisävalaistusta, ottaen huomioon, että sen laskemiseen käytetään myös ulkoilman olosuhteita.

Mielenkiintoinen tulos on myös K-rakennuksen talvimittaus (8.12.2021), jossa saatiin kolmen henkilön arvio lämpöviihtyvyydestä samassa tilassa samaan aikaan. Tulos vaihteli merkittävästi, kylmän tunteesta (-3) vain hieman viileään (-1). Laskennallinen PMV sai arvon -0,89, joka on suurempi kuin TSV-arvojen keskiarvo -2, mutta selvästi tavoitearvojen ulkopuolella (Kuva 9). Tämä osoittaa selkeästi, miten suurta vaihtelua lämpöviihtyvyyden tunteessa voi olla yksilöiden välillä, ja myös miten tärkeää olisi, että tilan käyttäjillä olisi mahdollisuuksia vaikuttaa lämpöaistimuksen aiheuttaviin tekijöihin. Yksinkertaisimmillaan tämä voisi olla vaatetuksen säätäminen tai - jos kyse on vedon tunteesta - mahdollisuus siirtyä huoneen sisällä vedottomampaan paikkaan.

Vertailu K-rakennuksen huoneiden TSV arvojen välillä (Kuva 8 ja Taulukko 4) tarjoaa havainnollisen esimerkin ympäristön lämpöolosuhteisiin vaikuttavien asioiden välisestä yhteydestä: 18.3.2021 huoneessa 1 arvioksi tuli "hiukan viileä" (-1) ilman lämpötilan ollessa 21,5 °C, kun taas huoneessa 2 samalla ilman lämpötilalla 19.1.2022 arvio oli "viileä" (-2). Eroa oli sekä säteilylämpötilassa että DR-arvossa. Huoneessa 2 talvella 2022 TSV arviot olivat -1; "hiukan viileä" (3.2.) ja -2; "viileä" (19.1.), vaikka ilman lämpötila oli asteen verran korkeampi 19.1. (Kuva 8). Säteilylämpötilat olivat lähes samat, mutta eroa oli DR-arvossa: DR_{max} arvot olivat 12,4 (3.2. TSV: -1) ja 22,0 (19.1. TSV: -2) (Taulukko 4). Toki lämpöviihtyvyyssarviotkin tulivat näissä tiloissa (KH1 ja KH2) osin eri henkilöiltä.

Maaliskuun 2021 mittauksissa tilojen laskennalliset lämpöolosuhteet vastaavat pääosin ASHRAE 55P-standardin B-luokkaa, kaksi A-luokkaa vastaavaa tulostakin saatiin (10.3./FH1/klo 14 ja 18.3./KH1/klo 12:30). Kesän ja joulukuun 2021 mittauksissa lasketut PMV- ja PPD-arvot ovat juuri ja juuri tavoitearvojen sisällä tai jopa tavoitearvojen ulkopuolella, jolloin tilojen olosuhteet eivät täytä ASHRAE 55P-standardin vaatimuksia, vaikka tiloissa työskennelleet ihmiset antoivat osittain erilaisia arvioita viihtyvyydestään. Mittausten perusteella KH2 tilan ympäristössä olisi parantamisen varaa: ASHRAE:n raja-arvot saavutettiin vain yhdessä mittauksessa kolmesta (C-luokka), ja tiloissa työskennelleiden henkilöiden arviot lämpöviihtyvyydestä olivat johdonmukaisesti viileän puolella.

Vertailtaessa laskettuja PMV-arvoja ja mitattuja TSV-arvoja huomataan, että keväällä ja talvella jälkimmäiset ovat johdonmukaisesti alempia kuin laskennalliset arvot, paitsi kevään 2021 viimeisessä K-rakennuksen mittauksessa, jossa ko. arvot ovat erittäin lähellä toisiaan (Kuva 9). Kesän mittauksissa taas laskennalliset arvot ovat alempia kuin mitatut arvot. Näin lyhyen mittausjakson perusteella on vaikea arvioida mistä tällainen ero voi johtua, sillä syyt voivat olla moninaiset, ja riippua esim. tilan käyttäjän mieltymyksistä, edellisten päivien lämpötilakehityksestä, tilan muista ominaisuuksista, tai vaikka organisaation toimintaan liittyvistä tekijöistä, tai jopa näiden yhdistelmistä.

5. Johtopäätökset

Mitattujen huoneiden fysikaalisiin mittauksiin perustuva terminen viihtyisyys oli kokonaisuutena melko hyvä verratessa Sisäilmastoluokituksen tavoitearvoihin. Kohteissa oli kevättalvi-mittauksissa muutamia tavoitearvojen alituksia, mutta nekään eivät olleet kovin suuria. Talvella v.2021 ja v.2022 kovien pakkasten aikaan terminen viihtyisyys oli heikompi kuin kevättalven mittauksissa. Tavoitearvon ylitykset tapahtuivat mittauspisteissä, jotka sijaitsivat ikkunan vieressä oleskelualueella.

ASHRAE 55P-standardin laskennallisiin PMV-arvoihin verratessa tavoitearvot saavutettiin kevään mittauksissa, mutta vain puolessa kesän ja talven mittauksista (3/6). Niissäkin, joissa tavoitearvot saavutettiin, jäätiiin juuri ja juuri C-luokan sisälle.

Lämpöviihtyvyyden kyselytutkimukset ja mittaustulokset erosivat toisistaan pääosin johdonmukaisesti ja samansuuntaisesti vuodenaikojen sisällä, joskin otanta oli äärimmäisen suppea, johtuen pääosin COVID-19 tilanteeseen liittyvistä etätyösuosituksista.

Seuraavassa vaiheessa lasketaan mittaustulosten perusteella ihmiskehon eksergiankulutuksen minimiarvojen esiintyvyys mitatuissa olosuhteissa, ja verrataan niitä TSV- ja PMV-arvoihin. Tavoitteena on arvioida eksergiamallin toimivuutta lämpöviihtyvyyden tarkasteluun ja myöhemmässä vaiheessa sen käytettävyyttä ihmistyön tuottavuuden ennustamiseen tietyissä sisäolosuhteissa. Nämä tulokset raportoidaan erillisessä dokumentissa.

Lähdeviitteet

/1/ ASHRAE standard 55 P. Thermal environmental conditions for human occupancy. February 2003.

/2/ Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. RT 07-11299.

/3/ Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., Hoyt, T., 2020. CBE Thermal Comfort Tool : online tool for thermal comfort calculations and visualizations. SoftwareX 12, 100563.
<https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563> (Tool available at: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>)

/4/ Ala-Juusela, Mia; Shukuya, Masanori. 2014. Human body exergy consumption and thermal comfort of an office worker in typical and extreme weather conditions in Finland. Energy and Buildings. Elsevier, vol. 76, June, pages 249 – 257. ISSN 0378-7788.
DOI:10.1016/j.enbuild.2014.02.067