

Henri Forsman

Vesikiertoisten säteilylämmityspaneelien energiataloudellisuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Insinööri (AMK)
Talotekniikan koulutusohjelma
Insinöörityö

5.6.2012

Tekijä(t) Otsikko	Henri Forsman Vesikiertoisten säteilylämmityspaneelien energiataloudellisuus
Sivumäärä Aika	46 sivua + 8 liitettä 15.5.2012
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	talotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	LVI-tuotantopainotteinen
Ohjaaja(t)	yliopettaja Jukka Yrjölä LVI-insinööri Risto Kiviranta
<p>Insinöörityössä tavoitteena oli esitellä yleisesti säteilylämmitystä ja tarkastella vesikiertoisten järjestelmien energiataloudellisuutta teorian ja tutkimuksien avulla. Työssä myös käydään läpi vesikiertoisen säteilylämmitysjärjestelmän suunnitteluprosessi esimerkkikohteessa.</p> <p>Työssä esimerkkijärjestelmänä käytetään Seroco Oy:n maahantuomia Fraccaron WP-sarjan säteilylämmityspaneeleita. Kyseisen sarjan säteilylämmityspaneeleista esitellään näiden rakenne ja toimintaperiaate. Säteilylämmityspaneelien energiataloudellisuutta tutkitaan lämmönsiirtotekniikan laskentakaavojen, tutkimustuloksien sekä kenttämittauksien avulla.</p> <p>Säteilylämmityspaneelien energiataloudellisuutta lähdettiin tutkimaan konvektion ja lämpösäteilyn osuuksista kokonaislämpötehosta. Säteilylämmityspaneelien sijaitessa katon rajassa ylöspäin nouseva konvektio säteilylämmityspaneelin pinnalta voidaan pitää osittain hukka energiana. Konvektion osuuteen kokonaislämpötehosta pystytään vaikuttamaan säteilylämmityspaneelin mitoituksessa ja suunnittelussa.</p> <p>Tehdyissä kenttämittauksissa keskityttiin mittaamaan ilman lämpötilan kerrostumista ja operatiivista lämpötilaa. Ilman lämpötilan kerrostumisen voimakkuus vaikuttaa katon kautta johtuvaan lämpöhäviöenergiaan.</p> <p>Työssä esitellään esimerkkikohteen säteilylämmitysjärjestelmän suunnitteluprosessi, jossa käydään läpi tarvittavat lähtötiedot suunnittelua varten, mitoittaminen, putkitukset ja säteilylämmityspaneelien aiheuttama painehäviö. Työssä myös tutustutaan aluekohtaisen lämmityksen mahdollisuuteen.</p> <p>Työn tuloksista huomataan, että säteilylämmityspaneelin mitoituksella voidaan vaikuttaa huomattavasti energiataloudellisuuteen. Leveämpi, pintalämpötilaltaan korkeampi ja vaakatasoon asennettu säteilylämmityspaneeli aiheuttaa pienemmän osuuden konvektiota kokonaislämpötehosta.</p>	
Avainsanat	säteilylämmitys, vesikiertoinen, energiataloudellisuus

Author(s) Title	Henri Forsman Energy efficiency of the hydronic radiant panel systems
Number of Pages Date	46 pages + 8 appendices 15 May 2012
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Specialisation option	HVAC Engineering, Production Orientation
Instructor(s)	Jukka Yrjölä, Principal lecturer Risto Kiviranta, HVAC Engineer
<p>The purpose of this final year project was to study the energy efficiency of hydronic radiant panel systems. The Bachelor's thesis also presented the radiant panels in general and gave advice on the correct design of the hydronic radiant panel systems.</p> <p>The energy efficiency of hydronic radiant panels depends on the percentage of the thermal radiation of overall heating power. The higher the percentage the more energy efficient heating is achieved. The percentage can be influenced with the width of the radiant panel and the mean temperature of the radiant panel surface. These were evaluated with theory and research results. Also a Finnish version of a planning guide for the hydronic radiant panels was created. The guide includes a step by step planning of an example case.</p> <p>The results showed that with a higher surface temperature and a wider radiant panel the percentage of thermal radiation was the highest, almost 80 % of the overall heating power. Installing the radiant panels in an inclined position affected the energy efficiency negatively as the proportion of convective heat from the radiant panel increased, which could be considered as a heat loss.</p> <p>The results and the planning guide can be used to create more energy efficient radiant heating systems. They also work as a marketing tool for the marketer.</p>	
Keywords	radiant panels, energy efficiency, thermal heat

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Säteilylämmitys	2
2.1	Perusteet	2
2.2	Säteilylämmitysjärjestelmät	4
3	Vesikiertoiset säteilylämmitysjärjestelmät	5
3.1	Fraccaro Waterstrip WP säteilylämmittimet	5
3.2	Käyttökohteet	6
4	Energiataloudellinen lämmitys	8
4.1	Ilman lämpötilan kerrostuminen	8
4.2	Ilman lämpötilan kerrostumisen taloudellinen vaikutus	10
5	Energiataloudellinen säteilylämmitysjärjestelmä	12
5.1	Lämmityssäteilypaneelin pintalämpötila	12
5.2	Lämmityssäteilypaneelin leveys	16
5.3	Lämmityssäteilypaneelin asento	18
5.4	Tutkimustuloksia paneelien säteilytehosta	20
6	Kohteen Mäkelän auto mittaukset	23
6.1	Ilman lämpötilan kerrostuminen	23
	Mittaussuunnitelma	23
	Mittaustulokset	27
6.2	Operatiivinen lämpötila	29
	Mittaussuunnitelma	29
	Mittauksien suorittaminen	29
6.3	Päätelmät mittaustuloksista	30
7	Säteilylämmitysjärjestelmän suunnittelu	31
7.1	Tarvittavat lähtötiedot	31
7.2	Tilojen korkeuden vaikutus järjestelmän suunnitteluun	31
	Kattorakenteiden muodon huomioiminen	33
7.3	Tilojen kalustuksen huomioiminen	33

7.4	Fraccaron WP-sarjan säteilylämmityspaneelien suunnittelu	34
7.5	Säteilylämmityspaneelin mitoittaminen	34
7.6	Putkitus	37
7.7	Säteilylämmityspaneelien aiheuttama painehäviö	39
7.8	Säteilylämmityspaneelimallin valinta	41
7.9	Suunnittelun kulku lohkokaaviona	42
7.10	Aluekohtainen lämmitys	43
8	Päätelmät	44
9	Yhteenveto	45
	Lähteet	46
	Liitteet	
	Liite 1. Ilman aineominaisuudet	
	Liite 2. Mäkelän auton varaosavaraston pohjakuva ja mittauspisteet	
	Liite 3. Esimerkkikohteen pohjakuva	
	Liite 4. Fraccaron WP-sarjan säteilylämmityspaneelien mitoitusaulukko	
	Liite 5. Fraccaron WP-sarjan jakotukkien mitoitusaulukko	
	Liite 6. WP3-040-esimerkkikohteen suunnittelu ja putkitustyyli D	
	Liite 7. WP3-120-esimerkkikohteen suunnittelu ja putkitustyyli B	
	Liite 8. Säteilylämmityspaneelien painehäviötaulukko	

1 Johdanto

Tämä työ tehdään Seroco Oy:n toimeksiantona. Seroco Oy on suomalainen LVI-alan maahantuontiin, jälleenmyyjä ja markkinointiyhteistyöhön keskittyvä yritys. Seroco Oy:n valikoimaan kuuluvat jäähdytys-, lämmitys- sekä ilmanvaihtojärjestelmät.

Työn tarkoituksena on saada Seroco Oy:lle markkinointia tukevaa aineistoa vesikiertoisten säteilylämmitysjärjestelmien energiataloudellisuudesta. Seroco Oy maahantuo Italiasta Fraccaromerkkisiä säteilylämmitysjärjestelmiä, joille tällä hetkellä ei markkinoinnin tueksi ole kuin tehtaan omia englanninkielisiä esitteitä.

Työssä myös käydään läpi vesikiertoisen säteilylämmitysjärjestelmän suunnittelu esimerkkikohteen avulla, koska suomenkielistä suunnitteluopasta Fraccaron vesikiertoisille säteilylämmitysjärjestelmälle ei ole.

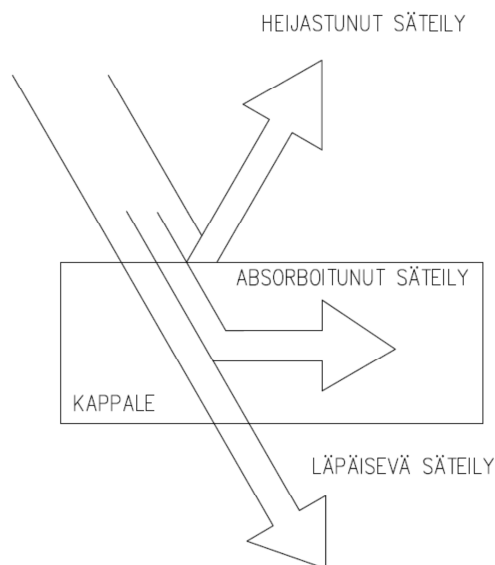
Vaikka vesikiertoiset säteilylämmitysjärjestelmät ovat olleet Euroopassa markkinoilla jo hyvin pitkään, on silti havaittu järjestelmien olevan melko tuntemattomia suomalaisille rakennuttajille ja suunnittelijoille. Järjestelmiin kohdistuu myös paljon ennakkoluuloja, joita tällä työllä yritetään vähentää.

2 Säteilylämmitys

2.1 Perusteet

Säteilylämmitys perustuu lämpösäteilyyn, joka on yksi kolmesta lämmön siirtymistavasta (konvektio, siirtyminen, säteily). Kaikki kappaleet lähettävät lämpösäteilyä ympäristöönsä. Teoreettisesti kappale, jonka lämpötila on $-273,15\text{ °C}$ (absoluuttinen nollapiste) ei lähetä minkäänlaista lämpösäteilyä. Kappaleiden lähettämä lämpösäteily on sähkömagneettista säteilyä, aallonpituus $0,8\text{--}400\text{ }\mu\text{m}$, jota lämpöliikkeessä olevat atomit ja molekyylit lähettävät. [1, s. 66.]

Kappaleesta lähtevä lämpösäteily leviää ympäristöönsä ilman väliainetta toisin kuin konvektiossa tai siirtymisessä. Kappale, johon lämpösäteily osuu, voi absorboida, heijastaa tai tietyissä kappaleissa läpäistä sen, kuten kuvasta 1 voi nähdä. Absorboituaan lämpösäteily saa kappaleen molekyylit kiihdyttämään lämpöliikettään, jolloin kappaleen lämpötila nousee. Säteilylämmöstä lämmennyt kappale taas lämmittää ympäröivän ilman. Heijastaessaan lämpösäteily kimpoaa kappaleesta ja osuu seuraavaan kappaleeseen. [1, s. 66–67.]



Kuva 1. Lämpösäteilyn käyttäytyminen [1, s. 66.]

Kappaleen lähettämän lämpösäteilyn voimakkuus riippuu kappaleen lämpötilasta ja emissiivisyydestä, ja sitä kutsutaan lämpösäteilyn intensiteetiksi. Eri materiaaleilla ja kappaleilla on oma emissiolukunsa. Nämä ilmaisevat, kuinka paljon pinta lähettää lämpösäteilyä verrattuna täydelliseen säteilypintaan eli mustaan kappaleeseen, jonka emissiivisyys on 1. [2, s. 18.] Taulukossa 1 esitetään muutaman materiaali emissiivisyys.

Taulukko 1. Materiaalien emissiivisyyksiä

Materiaali	e
Alumiini, kiiltävä	0,04
Kupari, Kiillotettu	0,03
Lasi	0,94
Puu (pyökki)	0,94
Tiili rapattu	0,93
Betoni	0,88
Valkoinen maali	0,95
mattapintainen musta maali	0,97

Tiedettäessä kappaleen emissioluku voidaan sille määrittää säteilyvoimakkuus käyttäen apuna Stefanin-Boltzmannin vakiota, kaava 1.

$$M = A\varepsilon(T_s^4 - T_h^4) \quad (1)$$

M on pinnan säteilyvoimakkuus W/m^2

A on kappaleen pinta-ala m^2

ε on pinnan emissiivisyys

σ on Stefanin-Boltzmannin vakio $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2K^4)$

T_s on pinnan absoluuttinen lämpötila K

T_h on ympäröivän ilman absoluuttinen lämpötila K

2.2 Säteilylämmitysjärjestelmät

Säteilylämmitysjärjestelmät voidaan jakaa kolmeen eri päätyyppiin: sähkö-, kaasukäyttöiset sekä vesikiertoiset järjestelmät. Kaikkien näiden toiminta perustuu luvussa 2.1 esitetty lämpösäteilyn periaatteisiin. Suurin osa järjestelmistä on tarkoitettu kattoon tai seinää asennettavaksi, vaikka lattiamallejakin on markkinoilla.

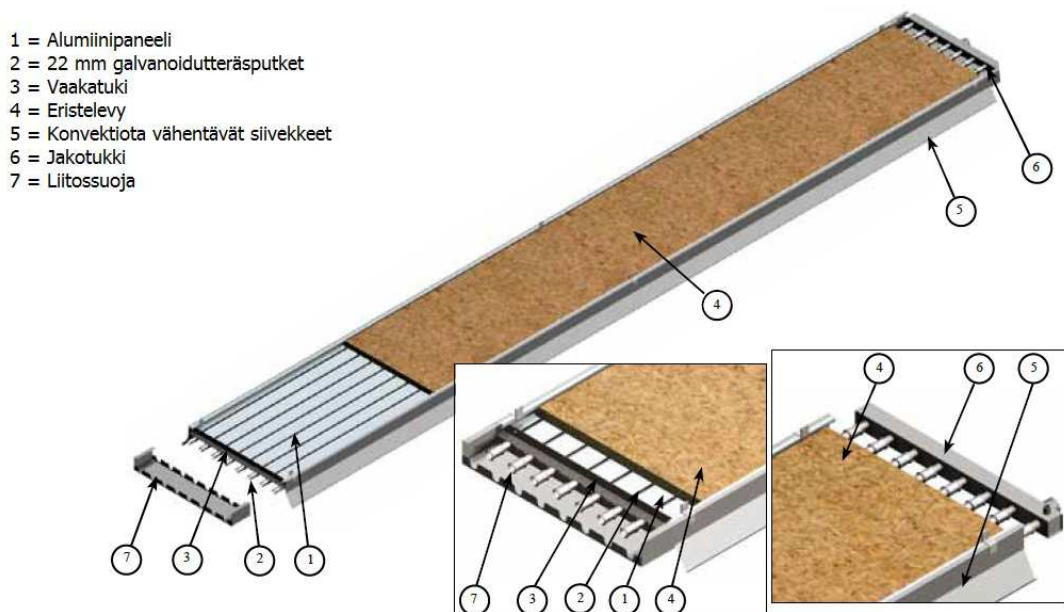
Vaikkakin järjestelmien lämmönluovutus perustuu lämpösäteilyyn, esiintyy lämmityslaitteiden ympärillä konvektiota. Tämä johtuu siitä, että säteilylämmitin on ympäröivää ilmaa lämpimämpi ja se alkaa lämmittää ympäröivää ilmassaa, jolloin lämmennyt ilmassa alkaa kohota ylöspäin. Nyrkkisääntönä on, että noin 60–70 % säteilylämmittimien lämpötehosta on lämpösäteilyä ja loput konvektiota [2, s. 6.]. Kyseiset prosentiosuudet ovat kuitenkin riippuvaisia säteilylämmittimen muodosta, pintalämpötilasta sekä asennosta. Niihin palataan myöhemmin tässä työssä.

3 Vesikiertoiset säteilylämmitysjärjestelmät

Vesikiertoiset mallit eroavat sähkö- ja kaasukäyttöisistä eniten pintalämpötilaltaan.

Kaasu- ja sähkökäyttöisissä malleissa säteilijän pintalämpötila voi olla useita satoja celsiusastetta, mutta vesikiertoisissa järjestelmissä säteilylämmityspaneelin pinnan lämpötila on yleensä 60–80 °C:ta.

3.1 Fraccaro Waterstrip WP säteilylämmittimet



Kuva 2. Fraccaron Waterstrip WP säteilylämmityspaneeli [3]

Tässä työssä esimerkkijärjestelmänä käytetään vesikiertoisia Fraccaron Waterstrip WP säteilylämmityspaneeleita.

Kuvasta 2 nähdään, että rakenteeltaan Waterstrip WP säteilylämmittimet ovat alumiinisia paneeleita, joiden sisällä kulkee 4–12 kappaletta ulkohalkaisijaltaan 22 mm olevia galvanoidujateräspuutkia. Lämmityspuutket kulkevat paneelin läpi pituussuunnassa ja ovat avonaisia kummastakin päästä, jolloin paneeleita voidaan yhdistää sarjaan. Paneelien väliset liitokset tehdään puristusliitoksin ja sarjan viimeiseen ja ensimmäiseen paneeliin liitetään jakotukit.

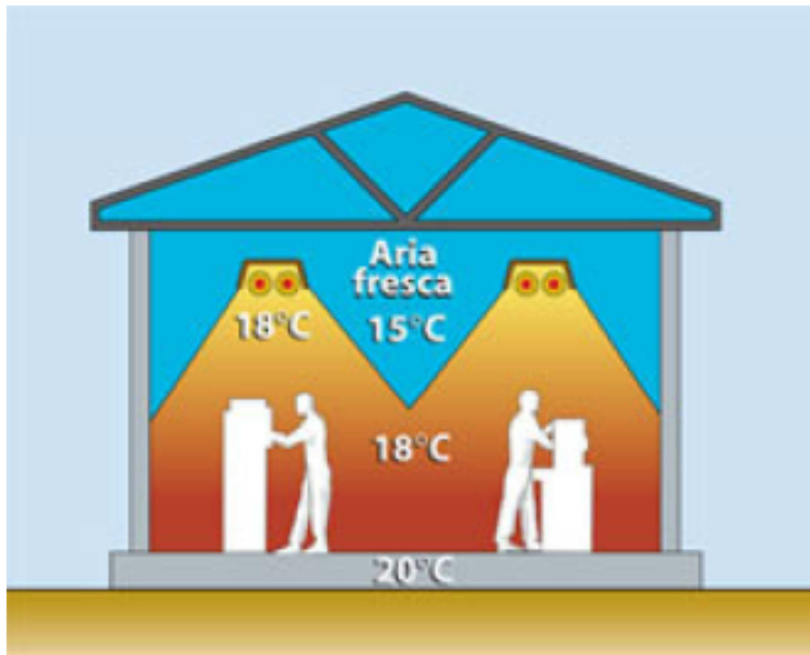
WP-sarjan säteilylämmityspaneeleita on yhteensä seitsemän eri mallia. Nämä mallit on jaettu kahteen eri sarjaan: WP2 ja WP3, näitä kahta sarjaa erottaa paneelin läpi kulkevien putkien lukumäärä. WP2-ryhmässä putkien välinen etäisyys on 150 mm ja WP3 100 mm. Kumpaankin sarjaan kuuluvat 60 cm, 90 cm ja 120 cm leveät säteilylämmityspaneelimallit, WP3-sarjaan kuuluu myös 40 cm leveä malli. Kaikki säteilylämmityspaneelimalleja on saatavilla 4- ja 6-metrinä.

Paneelin alaspäin osoittava puoli alumiinista on maalattu vaalean harmaaksi RAL 9002, jolloin tämän pinnan emissiivisyys on lähestulkoon sama kuin taulukossa 1 esitetyn valkoisen maalin 0,95. Paneelin alumiinin ylöspäin osoittava alumiini on jätetty kiiltäväksi, jolloin ylöspäin suuntautunut lämpösäteily on hyvin vähäistä, emissiivisyys 0,03. Tämän lisäksi paneelin päälle on asennettuna eristelevy, joka vähentää vielä ennestään katon turhaa lämmittämistä.

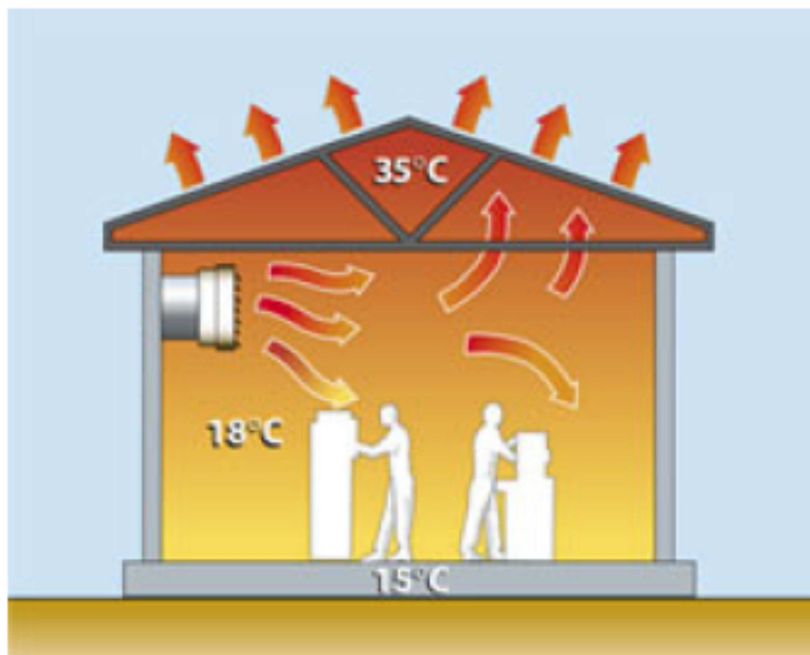
Lämmityspaneeleita varten kattorakenteisiin asennetaan 4–6 kappaletta kiintopisteitä paneelia kohden, joihin kiinnitetään metalliset kettingit, jotka ovat kiinni paneelien liukukannakkeissa. Säteilylämmityspaneelien asennuskorkeus määritetään suunnitteluvaiheessa.

3.2 Käyttökohteet

Yleisimmät käyttökohteet Waterstrip-säteilylämmitysjärjestelmille ovat suuret ja korkeat tilat, kuten tuotantotilat, urheiluhallit, messuhallit, varastorakennukset ja myymälät. Säteilylämmityspaneelit voidaan sijoittaa kattorakenteisiin, jolloin ne eivät vie tilaa lattia- tai seinätasolta. Kattoon asennetut säteilylämmittimet säteilevät lämmön lattiatasolle ja lämmittävät rakenteet ja esineistöt, jotka puolestaan luovuttavat lämpönsä ilmaan, jolloin saadaan aikaan mahdollisimman tasainen terminen sisäilmasto. Samanlaisista sisäilmastoa on hyvin vaikea luoda esimerkiksi lämminilmapuhalluksessa tämänkaltaisissa tiloissa, koska lämmin ilmassa pyrkii nousemaan ylöspäin, jolloin katon rajassa lämpötila nousee paikoin hyvin korkeaksi, samalla jättäen lattiatason ja rakenteet viileämmäksi. [2] Kuvissa 3 ja 4 on havainnollistettu lämminilmapuhalluksen ja säteilylämmityksen eroa tuotantotilassa.



Kuva 3. Säteilylämmitys tuotantotilassa [3]



Kuva 4. Lämminilmapuhallus tuotantotilassa [3]

4 Energiataloudellinen lämmitys

Lämmitysjärjestelmän energiataloudellisuudella tarkoitetaan lämmitystapaa, jolla pystytään tuottamaan haluttu huonelämpötila ja terminen viihtyvyys tiloihin. Samalla kuitenkin järjestelmän tulee olla mahdollisimman energiatehokas, nopeasti lämpötilan vaihteluihin reagoiva sekä vähän hukkalämpöä tuottava.

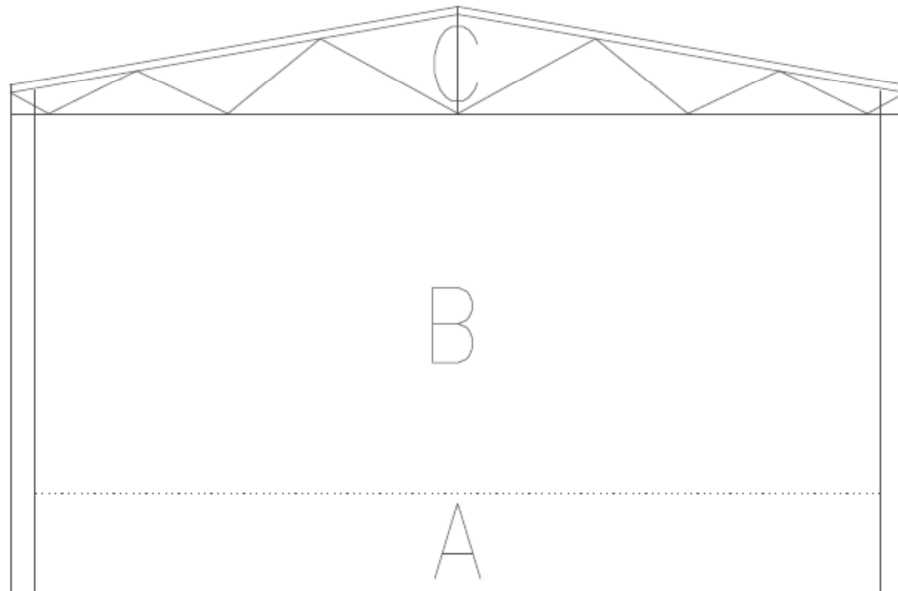
4.1 Ilman lämpötilan kerrostuminen

Ilman lämpötilan kerrostumista syntyy, jos tilassa on erilämpöisiä ilmassoja, jolloin lämmin ilmassa pyrkii nousemaan kevyempänä ylöspäin tilan yläpohjaa kohti. Tämä voi johtaa siihen, että lähellä yläpohjaa ilmanlämpötila voi olla monia asteita lämpimämpää kuin lattiatasolla olevan ilmanlämpötila. Tällöin yläpohjan rakenteiden kautta häviävän lämpöhäviöenergian osuus kasvaa. Asunnoissa, toimistoissa, sekä muissa rakennuksissa, joissa huonekorkeus on noin 2,5 m – 3,5 m, ei lämpötilojen kerrostumisella ole merkittävää vaikutusta lämmitysjärjestelmän energiataloudellisuuteen, koska lämpötilaero ei pääse kasvamaan suuresti näin matalissa tiloissa. [2]

Tuotanto- ja varastotiloissa, saleissa, messu- ja urheiluhalleissa tilojen korkeus voi olla yli 10 metriä, jolloin lämpötilojen kerrostuminen vaikuttaa huomattavasti lämmitysjärjestelmän energiataloudellisuuteen. Vaikka kyseiset tilat ovat korkeita, niin yleensä terminen viihtyvyys tarvitaan ainoastaan lattiatasolla oleskeluvyöhykkeellä, tämän vyöhykkeen korkeus on noin 2-metriä lattiatasosta. Tällaisessa tilanteessa voidaan rakennuksen korkeus jakaa kuvan 5 mukaisesti vertikaalisiin vyöhykkeisiin. [5, s. 8.]

- Vyöhyke A, oleskeluvyöhyke: Tavoitteena on luoda mahdollisimman termisesti viihtyisä alue, tähän vaikuttavat ilmanlämpötila, ilman liike ja lämpösäteily.
- Vyöhyke B, neutraalivyöhyke: Tämän vyöhykkeen ilmanlämpötila ei suoranaisesti vaikuta oleskeluvyöhykkeen termiseen viihtyvyyteen, mutta lämpötilan kerrostumisen voimakkuus tällä vyöhykkeellä vaikuttaa ulkoseinien läpi johtuviin lämpöhäviöenergioihin.
- Vyöhyke C, energiatehokkuusvyöhyke: Suurissa ja korkeissa rakennuksissa tämä vyöhyke kertoo käytetyn lämmitysjärjestelmän energiatehokkuuden. Tämä

vyöhyke on suoraan kattorakenteiden alapuolella ja tällä vyöhykkeellä ilman lämpötila on korkeimmillaan. Lämmitysjärjestelmää valittaessa tulisi valita järjestelmä, joka johtaa mahdollisimman matalaan lämpötilaan tällä vyöhykkeellä.



Kuva 5. Lämpötilojen kerrostumisen jakaminen vyöhykkeisiin [5, s. 8.]

Lämpötilojen kerrostumiselta ei pystytä välttymään millään lämmitysjärjestelmällä, mutta kerrostumisen voimakkuuteen voidaan vaikuttaa valitsemalla mahdollisimman vähän konvektiota aiheuttavalla järjestelmällä. Lämpötilojen kerrostumisesta on tehty tutkimuksia, joissa on mitattu ilman lämpötila eroa lattiatasosta yläpohjaan, tulokset on esitettyinä yksiköllä $g = K/m$.

REHVA (Federation of European Heating, Ventilation and Air-conditioning Associations) yhdistys ilmoittaa seuraavat arvot [5, s. 8.]:

Ilmalämmitys (pakotettu konvektio, tuloilmaelimet seinällä)

$$g = 0,9...1,1 \text{ K/m}$$

Säteilylämmitys

$$g = 0,3...0,5 \text{ K/m.}$$

4.2 Ilman lämpötilan kerrostumisen taloudellinen vaikutus

Ilman lämpötilan kerrostumisen taloudellisesta vaikutuksesta voidaan esimerkkinä laskea 7 metriä korkean hallirakennuksen ilmanlämpötilan kerrostuma lattiatasosta kattoon. Käytetään kerrostuman arvona ilmalämmityksessä ja säteilylämmityksessä REHVA-yhdistyksen julkaisemien arvojen keskiarvoa. Määritetään ilman lämpötilaksi lattiatasolla 18 °C.

Ilmalämmityksen kerrostuma

Lattiataso 18 °C

$$\text{Katto } 18 \text{ °C} + 1 \text{ °C/m} * 7 = 25 \text{ °C/m}$$

Säteilylämmityksen kerrostuma

Lattiataso 18 °C

$$\text{Katto } 18 \text{ °C} + 0,4 \text{ °C/m} * 7 = 20,8 \text{ °C/m}$$

Laskelmista huomataan, että säteilylämmityksen kerrostuma on 4,2 °C pienempi. Verataan vielä Suomen rakentamismääräyskokoelman (SRMK) D5 mukaan kummankin tapauksen yläpohjan läpi johtuvaa lämpöhäviöenergiaa. Käytetään laskuissa SRMK C3:n antamaa U-arvoa yläpohjalle 0,15 W/m²*K. Katon pinta-alaksi määritetään 200 m², ja vuoden ulkoilman keskilämpötilat Suomenrakentamismääräyskokoelman osan D5 mukainen 1 säävyöhykkeen +5 °C [7].

$$Q_{\text{joht}} = \Sigma H_{\text{joht}} * (T_s - T_u) * \Delta T / 1000 \quad (2)$$

Q_{joht} on rakenteiden läpi johtuva lämpöenergia, kWh

ΣH_{joht} on rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö, W/K

T_s on sisäilman lämpötila, °C

T_u on ulkoilman lämpötila, °C

ΔT on ajanjakson pituus, h

Tässä laskussa tarkastellaan ainoastaan yläpohjan läpi johtuvaa lämpöhäviöenergiaa, joten rakennusosien ominaislämpöhäviössä otetaan huomioon ainoastaan yläpohja.

$$\Sigma H_{\text{joht}} = U_{\text{yläpohja}} * A_{\text{yläpohja}} \quad (3)$$

ΣH_{joht} on rakennusosien yhteenlaskettu ominaislämpöhäviö, W/K

$U_{\text{yläpohja}}$ on rakennusosan lämmönläpäisykerroin, W/m² * K

$A_{\text{yläpohja}}$ on rakennusosan pinta-ala, m²

$$\Sigma H_{\text{joht}} = 0,15 \text{ W/m}^2 * \text{K} * 200 \text{ m}^2 = 30 \text{ W/K}$$

Ilmalämmitys

$$Q_{\text{joht}} = 30 \text{ W/K} * (25 \text{ °C} - 5 \text{ °C}) * 8760 \text{ h} / 1000 = 5256 \text{ kWh}$$

Säteilylämmitys

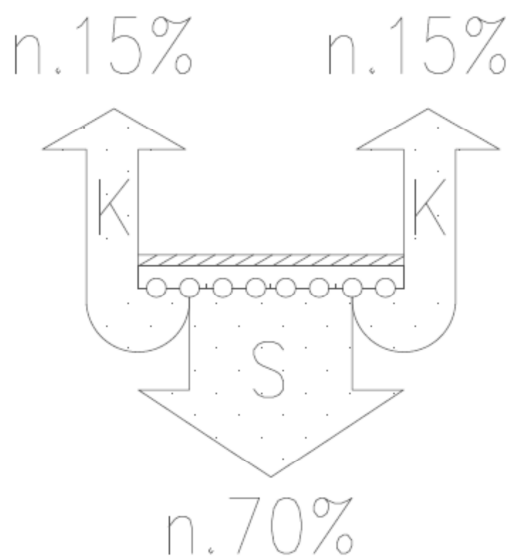
$$Q_{\text{joht}} = 30 \text{ W/K} * (20,8 \text{ °C} - 5 \text{ °C}) * 8760 \text{ h} / 1000 = 4152 \text{ kWh}$$

Laskelmista huomataan, että tällaisessa tapauksessa yläpohjan läpi johtuva lämpöhäviöenergia säteilylämmityksessä on yli 1000 kWh pienempi kuin ilmalämmityksen.

5 Energiataloudellinen säteilylämmitysjärjestelmä

Energiatehokkaana säteilylämmitysjärjestelmänä voidaan pitää järjestelmää, joka luovuttaa suurimman osan lämpötehostaan säteilyn avulla alaspäin oleskeluvyöhykkeelle eikä konvektiona kattorakenteisiin.

Säteilylämmityspaneelissa tapahtuu aina lämpimän ilman kohoamista ylöspäin paneelin ympäriltä, koska se on ympäristöä lämpimämpi kappale. Konvektion ja säteilyn suhteeseen kokonaislämmitystehonluovutuksessa voidaan kuitenkin vaikuttaa suunnittelemalla ja mitoittamalla säteilylämmityspaneelit oikein. Kuvassa 6 on esitetty säteily- ja konvektion lämmitystehon jakautumista säteilylämmityspaneelin kokonaislämmitystehosta.



Kuva 6. Säteilyteho ja konvektion teho säteilylämmityspaneelissa S = säteily K = konvektio

5.1 Lämmityssäteilypaneelin pintalämpötila

Lämmityssäteilypaneelin pintalämpötilalla on merkittävä vaikutus lämpösäteilyn osuuteen kokonaislämpötehosta. Seuraavissa kaavoissa on osoitettu, kuinka säteilylämpöteho sekä konvektioteho käyttäytyvät pintalämpötilan noustessa.

Säteilyvoimakkuus lasketaan Stefan-boltzmanin lain kaavalla 1 avulla, joka esitettiin luvussa 2.

Konvektion tehoa laskettaessa voidaan olettaa, että konvektio on luonnollista eikä pakotettua ja säteilylämmityspaneelin ei kohdistu muuta voimakasta ilman liikettä. Tällöin tarkastelussa ei oteta huomioon ilman nopeutta ja konvektion teho saadaan ratkaistua Newtonin jäähtymislakia käyttäen [4].

$$Q_c = h_c A_s \Delta T \quad (4)$$

Q_c on lämpöteho pinnasta ympäristöön, W

h_c on lämmönsiirtokerroin konvektiolle, W/(m²K)

A_s on kappaleen pinta-ala, m²

ΔT on kappaleen ja fluidin lämpötilaero, °C

h_c on riippuvainen kappaleen muodosta, virtauksen lämpötilasta sekä fluidin fysikaalisista ominaisuuksista. h_c voidaan ratkaista Nusseltin luvun avulla (Nu)

$$Nu = h_c D / k \quad (5)$$

Nu on Nusseltin luku, dimensioton lämpötilagradientti

h_c on lämmönsiirtokerroin konvektiolle, W/(m²K)

D on kappaleen karakteristinen mitta, m

k on ilman lämmönjohtavuus, W/(Km)

Nu voidaan ratkaista käyttämällä Grashofin, Prandtin sekä Rayleighin lukua [4].

$$Gr = D^3 \rho^2 g \Delta T \beta / \nu^2 \quad (6)$$

Gr on Grashofin luku: virtaavan aineen nostevoiman suhdetta vaikuttaviin kitkavoimiin

D on kappaleen karakteristinen mitta, m

ρ on kappaleen tiheys, kg/m³

g on putoamiskiihtyvyys, 9,81 m/s²

ΔT on pinnan ja fluidin välinen lämpötilaero, K

β on lämpölaajenemiskerroin, 1/K

ν on dynaaminen viskositeetti, m²/s

$$Pr = \nu C_p / k \quad (7)$$

Pr on Prandtlin dimensioton luku: approksimoi liikemäärän ja termisen diffuusion suhdetta

ν on dynaaminen viskositeetti, m^2/s

C_p on ominaislämpökapasiteetti, kJ/KgK

k on ilman lämmönjohtavuus, W/km

$$Ra = GrPr \quad (8)$$

Rayleighin luku: dimensioton luku, joka kuvaa aineen sisäistä lämmönsiirtoprosessia

Kun kyseessä on säteilylämmityspaneeli, joka on asennettu vaakasuoraan horisontaalisesti, niin että lämmitetty puoli osoittaa alaspäin, voidaan Nusseltin luvun ratkaisemiseksi käyttää kaavaa [4]:

$$Nu = 0,27 Ra^{1/4}, \text{ jos } 10^5 \leq Ra \leq 10^{10} \quad (9)$$

Lämmönsiirtokerroin konvektiolle h_c saadaan ratkaisemalla kaavasta 3

$$h_c = Nuk / (D) \quad (10)$$

Otetaan esimerkiksi tilanne, jossa on Fraccaron WP3-060 malli, jonka leveys on 600mm ja pituus 4000 mm. Paneeli on kytketty lämmityspiiriin, jonka tuloveden lämpötila on $70\text{ }^\circ\text{C}$ ja huonelämpötila $20\text{ }^\circ\text{C}$. Oletetaan, että kiertopiirin vesi jäähtyy paneelin läpi kulkiessaan $5\text{ }^\circ\text{C}$, jolloin paneelin keskimääräiseksi pintalämpötilaksi saadaan $70\text{ }^\circ\text{C} + 65\text{ }^\circ\text{C} / 2 = 67,5\text{ }^\circ\text{C}$.

Selvitetään ensimmäiseksi Grashofin luku (kaava 6), liitteenä 1 olevasta taulukosta saadaan ilman aineominaisuudet kaavan laskemiseksi. Aineominaisuudet valitaan paneelin pintalämpötilan ja huonelämpötilan keskiarvosta $(67,5\text{ }^\circ\text{C} + 20\text{ }^\circ\text{C}) / 2 = 43,75\text{ }^\circ\text{C}$.

Karakteristinen mitta määritetään vertaamalla paneelin pinta-alaa sen piiriin $D = A/P$ [4].

$$Gr = (2,4 \text{ m}^2/9,2 \text{ m})^3 * (1,128 \text{ kg/m}^3)^2 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (67,5 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) * 0,00315$$

$$1/\text{K} / (17,33 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2$$

$$Gr = 11 * 10^7$$

Tämän jälkeen määritetään Prandtlin luku, joka saadaan katsomalla se ilman aineominaisuuslistalta liite 1.

$$Pr = 0,711$$

Lasketaan Rayleighin luku kaavalla 8

$$Ra = 11 * 10^7 * 0,711 = 7,82 * 10^7$$

Tällöin voidaan laskea Nusseltin luku kaavalla 9.

$$Nu = 0,27 * (7,82 * 10^7)^{1/4}$$

$$Nu = 25,39$$

Lasketaan kaavalla 10 arvo konvektion lämmönsiirtokertoimelle h_c

$$h_c = 25,39 * 0,0273 \text{ W/Km} / (2,4 \text{ m}^2/ 9,2 \text{ m})$$

$$h_c = 2,66 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Nyt voidaan laskea konvektiolle sekä säteilylle lämpöteho

Konvektion teho lasketaan kaavalla 4

$$Q_c = 2,66 \text{ W/m}^2\text{K} * 2,4 \text{ m}^2 * (67,5 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) = 303,24 \text{ W}$$

Säteilyteho lasketaan kaavalla 1

$$M = 2,4 \text{ m}^2(0,95 * 5,67 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)) * ((273,15 \text{ K} + 67,75 \text{ K})^4 - (273,15 \text{ K} + 20 \text{ K})^4)$$

$$M = 791,20 \text{ W}$$

Lämmitysteho tällöin yhteenlaskettuna säteilylämmityspaneelille on
 $791,20 \text{ W} + 303,24 \text{ W} = 1094,44 \text{ W}$
 josta konvektion osuus on 27,7 %.

Taulukossa 2 on laskettu 5:llä eri paneelin pintalämpötilalla konvektion ja säteilylämpötehon suhdetta. Laskuissa käytetyt dimensiot sekä muut suureet ovat samoja kuin esimerkissä käytetyt.

Taulukko 2. Laskennalliset arvot Fraccaro Waterstrip WP3-060 säteily- ja konvektiotehot eri pintalämpötiloilla

Pintalämpötila °C	säteilyteho W	Konvektion teho W	Konvektion osuus %	Gr 10 ⁷	Ra 10 ⁷	Nu	Hc	Pr
40	288	116	28,7	7,6	5,4	23,2	2,4	0,713
55	544	213	28,1	9,1	6,5	24,2	2,5	0,711
70	837	320	27,6	11,1	7,9	25,5	2,7	0,710
80	1056	392	27,1	12,1	8,6	26	2,7	0,709
100	1552	535	25,6	13,3	9,5	26,6	2,8	0,709

Voidaan siis huomata, että lämpösäteilijän pintalämpötilaa nostaessa säteilytehon osuus kasvaa verrattuna konvektiotehoon kokonaislämmönluovutuksessa.

5.2 Lämmityssäteilypaneelin leveys

Lämmityssäteilypaneelin leveydelläkin voidaan vaikuttaa säteilylämmöntehon osuuteen verrattuna konvektiontehoon kokonaislämmönluovutuksessa. Luvussa 5.1 käytetyistä kaavoista voidaan huomata, että kummatkin säteily ja konvektio ovat riippuvaisia paneelin dimensioista. Säteilylämpötehoon vaikuttavat ainoastaan paneelin pinta-ala, mutta konvektioon vaikuttaa paneelin muoto. Kaavassa 6 ja 10 ratkaisussa käytetään paneelin piirin suhdetta paneelin pinta-alaan. Tarkastellaan paneelin leveyden vaikutusta säteilylämpötehon sekä konvektiotehon suhteeseen.

Kaikkissa laskuissa paneelin keskimääräinen pintalämpötila on 70 °C, huonelämpötila 20 °C sekä paneelin pituus 4 metriä. Laskut suoritetaan samalla periaatteella kuin luvussa 5.1 lasketussa esimerkissä.

Fraccaro WP3-040, leveys 400 mm

Konvektio

$$Gr = (1,6 \text{ m}^2 / 8,8 \text{ m})^3 * (1,112 \text{ kg/m}^3)^2 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (70 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) * 0,00315 \text{ 1/K} / (17,42 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2$$

$$Gr = 3,77 * 10^7$$

$$Pr = 0,7105$$

$$Ra = 3,77 * 10^7 * 0,7105 = 2,68 * 10^7$$

$$Nu = 0,27 * (2,68 * 10^7)^{1/4} = 19,43$$

$$h_c = 19,43 * 0,0273 \text{ W/mK} / (1,6 \text{ m}^2 / 8,8 \text{ m}) = 2,92 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q_c = 2,92 \text{ W/m}^2\text{K} * 1,6 \text{ m}^2 * (70 \text{ }^\circ\text{C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) = 233,6 \text{ W}$$

Säteily

$$M = 1,6 \text{ m}^2 (0,95 * 5,67 * 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4) * ((273,15 \text{ K} + 70 \text{ K})^4 - (273,15 \text{ K} + 20 \text{ K})^4))$$

$$M = 558,5 \text{ W}$$

Lämmitysteho tällöin yhteenlaskettuna säteilylämmityspaneelille on

$$558,5 \text{ W} + 233,6 \text{ W} = 792,1 \text{ W}$$

josta konvektion osuus on 29,5 %.

Suoritetaan vielä samankaltainen lasku Fraccaron WP3 sarjan muillekin malleille. Tulokset esitetään taulukossa 3

Taulukko 3. Fraccaro Waterstrip WP3-sarjan säteily- ja konvektiotehot

Malli	Leveys (m)	säteilyteho (W)	konvektio (W)	Konvektion osuus %	Gr 10^7	Ra 10^7	Nu	H _c	D m
WP3-040	0,4	559	234	29,5	3,8	2,7	19,4	2,9	0,18
WP3-060	0,6	838	320	27,6	11,4	7,9	25,5	2,7	0,26
WP3-090	0,9	1257	440	25,9	31,1	22,1	32,9	2,4	0,37
WP3-120	1,2	1676	555	24,9	61,7	43,8	39,1	2,3	0,46

5.3 Lämmityssäteilypaneelin asento

Lämmityssäteilypaneelin asento vaikuttaa voimakkaasti konvektion osuuteen, jos säteilypaneeli asennetaan, niin että se ei ole vaakatasossa. Grashofin luku (kaava 6) kuvaa virtaavan aineen nostevoiman suhdetta vaikuttaviin kitkavoimiin. Kun paneelin asennuskulmaa vaihdetaan vaakatasosta, helpottuu konvektion virtaus ylöspäin paneelista.

Konvektion tehoa laskiessa Grashofin luvun kaavaan (kaava 6) otetaan huomioon säteilylämmityspaneeelin kaltevuus. Kaava erottuu myös normaalitilanteesta siten, että karakteristisella mitalla tarkoitetaan paneeli pituutta kallistetun pinnan suunnalta [4].

Nusseltin lukua laskiessa käytetään

$$Gr = L^3 \rho^2 g \cos \Theta \Delta T \beta \quad (11)$$

L on paneelin pituus kallistetun pinnan suunnalta m

ρ on kappaleen tiheys kg/m³

Θ on paneelin kaltevuuskulma °

g on putoamiskiihtyvyyys 9,81 m/s²

ΔT on pinnan ja fluidin välinen lämpötilaero K

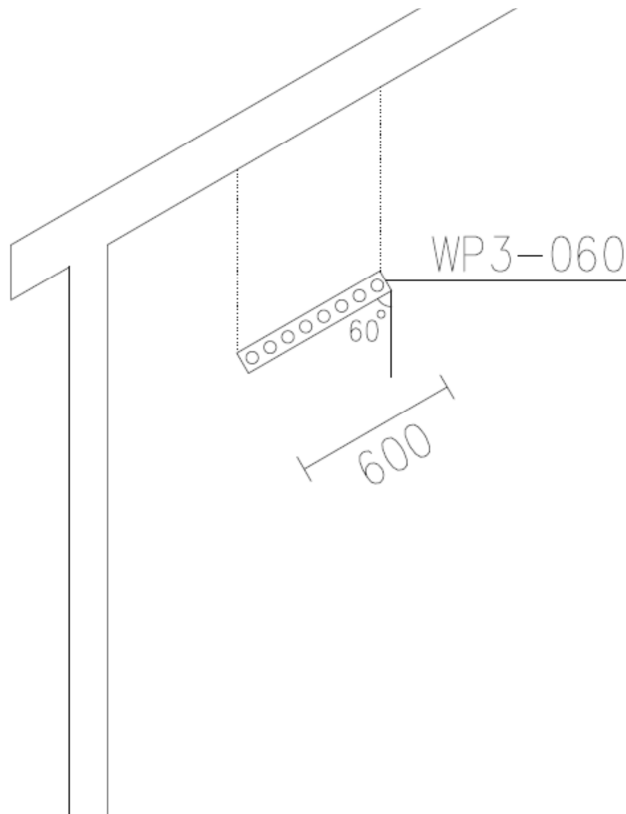
β on lämpölaajenemiskerroin 1/K

ν on dynaaminen viskositeetti m²/s

Kaltevan paneelin konvektiotehoa laskiessa Nusseltin luku saadaan kaavalla 12.

$$Nu = \left(\frac{0,387 Ra^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right)^2 \quad (12)$$

Lasketaan esimerkkitilanne konvektion ja säteilylämmitystehosta, jossa Fraccaron WP3-060 4-metrinen säteilylämmityspaneeli asennetaan 60 °:n kulmaan seinätasoon nähden kuvan 7 osoittamalla tavalla.



Kuva 7. Kaltevasti asennettu säteilylämmityspaneeli

Lasketaan Grashofin luku kaavan 11 mukaisesti

$$Gr = 0,6^3 * (1,128 \text{ kg/m}^3)^2 * \text{Cos } 60 * 9,81 \text{ m/s}^2 * (70 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) * 0,00315 \text{ 1/K} / (17,33 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2$$

$$Gr = 7,07 * 10^8$$

$$Pr = 0,711$$

$$Ra = 7,07 * 10^8 * 0,711 = 5,03 * 10^8$$

$$Nu = (0,825 + (0,387 * (5,03 * 10^8)^{1/6}) / ((1 + (0,492/0,711)^{9/16})^{8/27}))^2$$

$$Nu = 114,2$$

konvektion lämmönsiirtokerroin lasketaan kaavalla 10, jossa karakteristinen mitta on pituus L [4].

$$h_c = 114,2 * 0,0273 \text{ W/mK} / 0,6 = 5,2 \text{ W/mK}$$

$$Q_c = 5,2 \text{ W/m}^2\text{K} * 2,4 \text{ m}^2 * (70 \text{ C} - 20 \text{ }^\circ\text{C}) = 623,65 \text{ W}$$

Säteily

$$M = 2,4 \text{ m}^2(0,95 * 5,67 * 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4) * ((273,15 \text{ K} + 67,75 \text{ K})^4 - (273,15 \text{ K} + 20 \text{ K})^4))$$

$$M = 791,20 \text{ W}$$

Lämmitysteho tällöin yhteenlaskettuna säteilylämmityspaneelille on

$$623,65 \text{ W} + 791,20 \text{ W} = 1333,6 \text{ W}$$

josta konvektion osuus on 42,67 %.

Tässä laskussa ei otettu huomioon, että konvektio tehon voimistuessa paneelin pintalämpötila laskee, jolloin myös säteilyteho laskee. Tällöin konvektion osuus kokonaislämmönluovutustehossa kasvaa.

Asennuskulman suuruuden vaikutus konvektion osuuteen on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Asennuskulman vaikutus konvektion osuuteen

Asennuskulma °	Säteilyteho (W)	Konvektio (W)	Konvektion osuus %	Gr 10 ⁸	Ra 10 ⁸	Nu	Hc
15	838	764	47,7	13,6	9,7	140	6,4
30	838	738	46,8	12,2	8,7	135	6,2
45	838	694	45,3	10	7,1	127	5,8
60	838	624	42,7	7,1	5	114	5,2
75	838	510	37,8	3,7	2,6	93	4,3

5.4 Tutkimustuloksia paneelien säteilytehosta

Luvussa 3.4 lasketut säteily- sekä konvektiolämmönluovutustehot on laskettu täysin teorian pohjalta, eikä laskuihin otettu huomioon paneelien päällä tapahtuvaa lämmön-

luovutusta. Laskuissa myös käytetään oletusta, että paneelien ympäröivä ilma ei ole liikkeessä.

Tämän takia on hyvä tarkastella laboratorio-olosuhteissa suoritettuja mittauksia, joissa simuloitiin juuri luvuissa 5.1 ja 5.2 käytyjä aiheita. Tutkimukset ovat REHVA:n julkaisemia tutkimustuloksia.

Taulukko 5. Säteilylämmityspaneelin lämmitystehon jakautuminen, säteilylämmityspaneelin leveys 300 mm [5, s. 26]

Veden keskilämpötila	Huonelämpötila	Lämpötilaero	Kokonaisteho	Säteilyteho	Konvektion teho	Säteilyn osuus
θ_m [°C]	θ_g [°C]	$\Delta\theta$ [K]	q_0 [W/m]	q_r [W/m]	q_k [W/m]	η_s (%)
90,21	19,75	70,46	216	147	69	68
70,4	19,92	50,48	145	94	51	65
50,47	19,92	30,55	81	51	30	63

Taulukko 6. Säteilylämmityspaneelin lämmitystehon jakautuminen, säteilylämmityspaneelin leveys 600 mm [5, s. 26]

Veden keskilämpötila	Huonelämpötila	Lämpötilaero	Kokonaisteho	Säteilyteho	Konvektion teho	Säteilyn osuus
θ_m [°C]	θ_g [°C]	$\Delta\theta$ [K]	q_0 [W/m]	q_r [W/m]	q_k [W/m]	η_s (%)
89,18	19,92	69,26	381	271	110	71
69,4	19,91	49,49	253	175	78	69
49,96	20,13	29,83	140	95	45	68

Taulukko 7. Säteilylämmityspaneelin lämmitystehon jakautuminen, säteilylämmityspaneelin leveys 1200 mm [5, s. 26]

Veden keskilämpötila	Huonelämpötila	Lämpötilaero	Kokonaisteho	Säteilyteho	Konvektion teho	Säteilyn osuus
θ_m [°C]	θ_g [°C]	$\Delta\theta$ [K]	q_0 [W/m]	q_r [W/m]	q_k [W/m]	η_s (%)
87,41	20,08	67,33	681	518	163	76
68,41	20,02	48,48	451	334	117	74
48,92	20,28	28,65	245	179	66	73

Kuten taulukoiden 4, 5, 6 ja 7 tutkimustuloksista voidaan huomata että laboratorio-olosuhteissa mitatut säteilylämmityspaneelien säteilylämmitysteho suhteessa kokonaislämmitystehoon oli pienempi kuin luvuissa 5.1 ja 5.2 lasketut. Tämä johtunee juurikin siitä, ettei laskuissa otettu huomioon paneelin päällä tapahtuvaa lämmönluovutusta tai ilmanliikkeiden vaikutusta konvektioon.

Tehdyistä laskuista ja REHVA:n julkistamien tuloksista voidaan tehdä johtopäätöksenä, että jos halutaan minimoida konvektion osuutta kokonaislämpötehosta, tulee säteilylämmityspaneelin olla mahdollisimman leveä sekä lämmin pinnastaan.

Fraccaro on tutkinut omien säteilylämmityspaneelien (taulukko 8) asennon vaikutusta konvektion osuuteen kokonaislämmitystehosta. Tuloksista ei kuitenkaan selviä tutkittujen säteilylämmityspaneelien pintalämpötilaa.

Taulukko 8. Säteilylämmityspaneelin asennon vaikutus konvektion osuuteen [3]

WP3-040			WP3-060		
Asennuskulma °	Lämpösäteilyn osuus %	Konvektion osuus %	Asennuskulma °	Lämpösäteilyn osuus %	Konvektion osuus %
0	55	45	0	66	34
15	50	50	15	61	39
30	45	55	30	56	44
45	40	60	45	51	49
60	35	65	60	46	54
90	25	75	90	36	64
WP3-090			WP3-120		
Asennuskulma °	Lämpösäteilyn osuus %	Konvektion osuus %	Asennuskulma °	Lämpösäteilyn osuus %	Konvektion osuus %
0	70	30	0	72	28
15	65	35	15	67	33
30	60	40	30	62	38
45	55	45	45	57	43
60	50	50	60	52	48
90	40	60	90	42	58

6 Kohteen Mäkelän auto mittaukset

Tähän työhön kuului lämpötilamittauksia Mäkelän auton Järvenpään automyymälän varaosavarastossa. Kohteeseen aloitettiin vuoden 2011 talvella remontti, jossa kohteen kattoon asennettiin Fraccaron WP3-060-säteilylämmityspaneelit. Liitteenä 2 on kohteen varaosavaraston pohjakuva.

Kohteessa tehtävillä mittauksilla haluttiin tutkia ilman lämpötilan kerrostumista ja operatiivista lämpötilaa.

6.1 Ilman lämpötilan kerrostuminen

Ilmanlämpötilan kerrostuminen mitataan jakamalla huoneen korkeus osiin, joista jokaisesta kerätään lämpötilatieto dataloggerilla. Dataloggerit ovat digitaalisia mittauslaitteita, jotka tallentavat lämpötilatiedot sisäiseen muistiinsa tietyn intervallin välein.

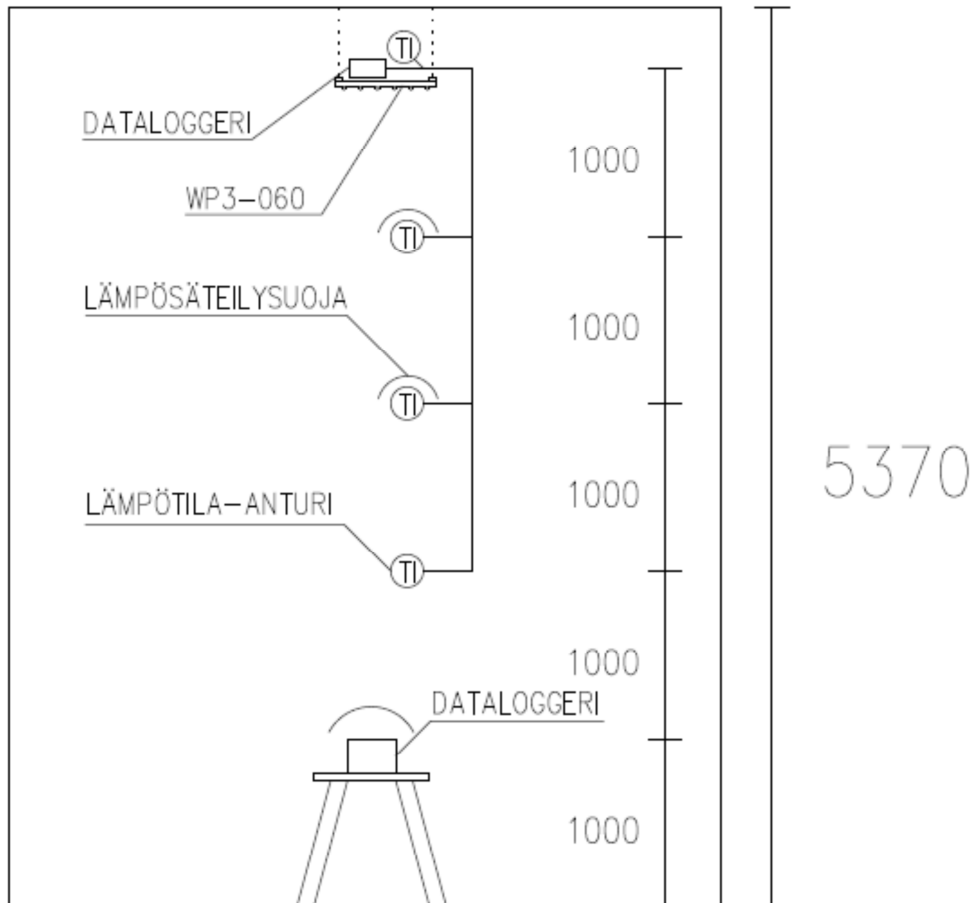
Mittaussuunnitelma

Mittaussuunnitelma tehtiin pohjakuvien sekä tutustumiskäynnin perusteella. Pohjakuvastä huomattiin, että kohteen kattorakenteet eivät olleet täysin vaakatasossa, vaan katto nousi noin 4°. Mittaukset päätettiin tehdä varaosavaraston korkeimmasta kohdasta, jonka korkeus oli 5,37 m. Tämä korkeus jaettiin viiteen osaan, joista mitattaisiin dataloggereilla lämpötila-arvoja.

Mittauslaitteeksi saatiin Metropolialta

- Dataloggeri Eltek Squirrel 400
 - Kolme kappaletta 5 metrin pituista lämpötila-anturijohtoa
 - Yksi kappale 1 metrin pituista lämpötila-anturijohtoa
- Escort-lämpötilaloggeri

Kuvasta 8 nähdään, että Squirrel-dataloggeri sijoitetaan säteilylämmityspaneelin päälle, josta 1 metrin pituinen mitta-anturijohto kiinnitetään kattorakenteisiin 5 metrin korkeuteen, kolme 5 metrin pituista mitta-anturijohtoa laitetaan roikkumaan yhden metrin välein, niin että alin lämpötila-anturi on 2 metrin korkeudessa. Escort-lämpötilaloggeri sijoitetaan roikkuvien antureiden alapuolelle työtason päälle 1 metrin korkeuteen



Kuva 8. Ilmanlämpötilan kerrostumisen mittaaminen

Mittausantureille ja Escort-lämpötilaloggerille, jotka ovat säteilylämmityspaneelin alapuolella rakennettiin lämpösäteily suoja, jotta ne mittaisivat ainoastaan ilman lämpötilaa. Squirrel-dataloggerin mittausintervalliksi valittiin 1 minuutti ja Escort-lämpötilaloggerin mittausintervalliksi 10 min. Samankaltainen mittaus suoritettaisiin ulkoseinän vieressä samoilla korkeusasemilla. Mittauksien suorittaminen

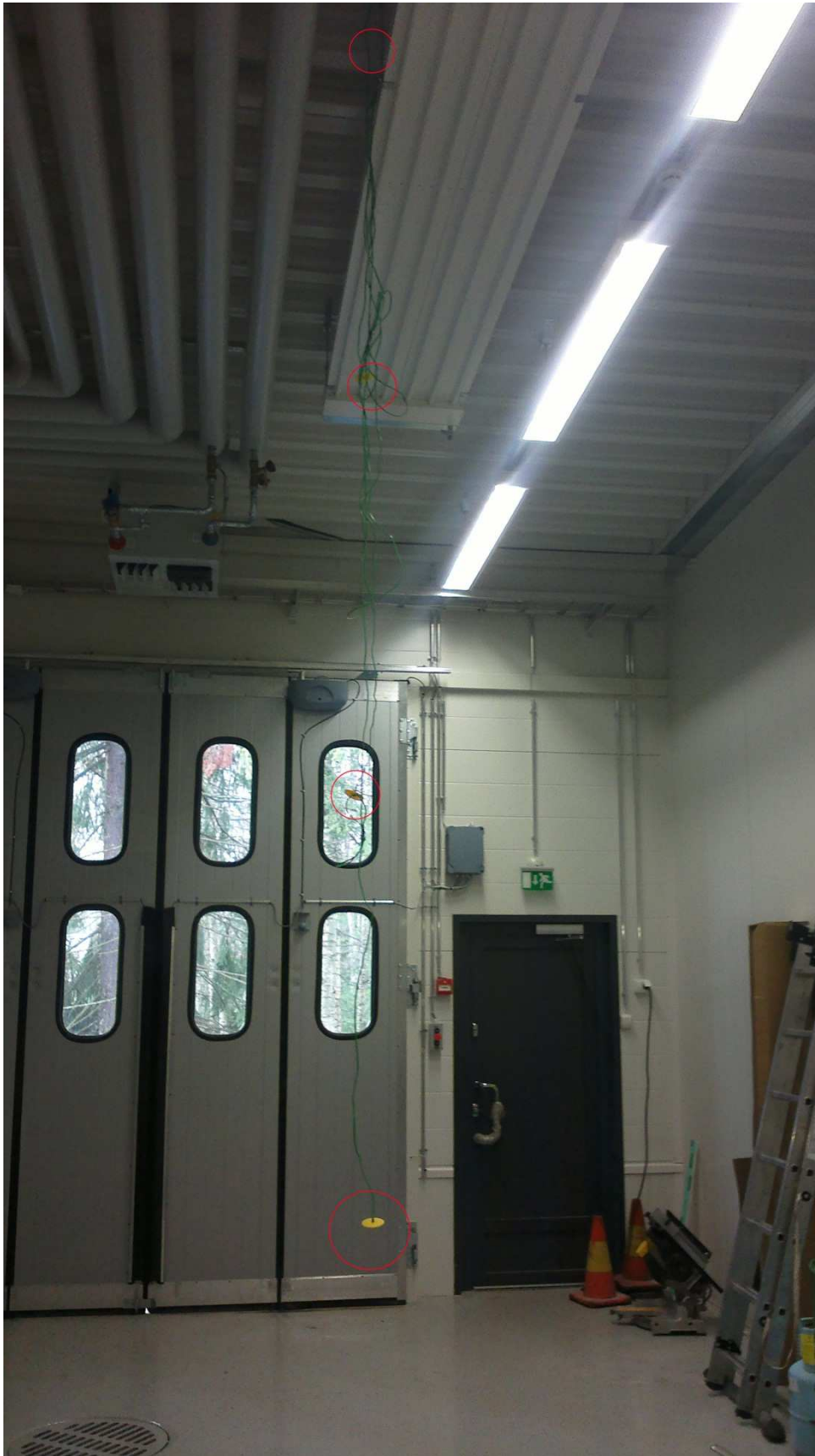
Mittaukset suoritettiin 17.4.2012–18.4.2012. Kohteeseen saavuttua huomattiin, että varaosavaraston säteilylämmityspaneelien säätöventtiiliä ohjaavat lämpötilamittarit

olivat jääneet urakoitsijalta asentamatta. Mittaukset suoritettiin kaikesta huolimatta. Muihin tiloihin ei päästy mittaamaan, koska ne olivat aktiivisessa käytössä, eikä saksinostinta pystytty siirtämään varaosavarastosta pois.

Mittaukset aloitettiin tekemällä testimittaus varaosavaraston nosto-oven viereiseltä säteilylämmityspaneelilta, kuvassa 9 Squirrel-dataloggerin mitta-anturit on korostettuna punaisilla ympyröillä.

Testimittauksella tarkistettiin, että anturit toimivat ja korkeudet olivat oikeat. Tämän jälkeen mittausvälineistö siirrettiin varaosavaraston toisen säteilylämmityspaneelin luokse ja mittauksen aloitusajankohta kirjattiin muistiin. Mittauspistettä siirrettiin seuraavana päivänä ulkoseinän viereen, ajankohta mittauspisteen vaihtumiselle kirjattiin muistiin. Mittauksen lopetusajankohta otettiin myös muistiin.

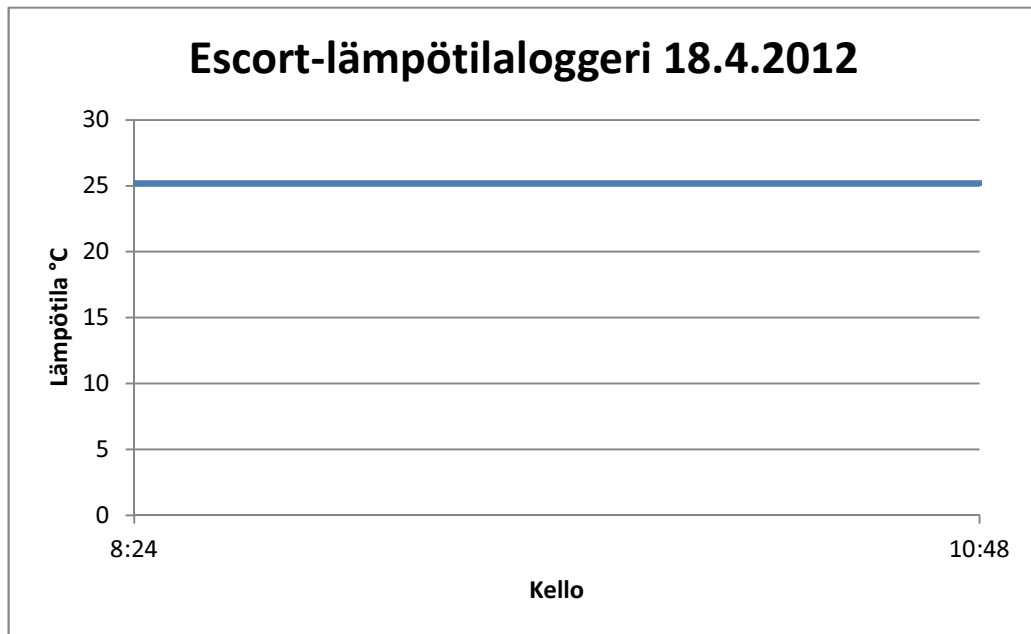
Mittauspisteet on esitetty liitteen 2 pohjakuvassa.



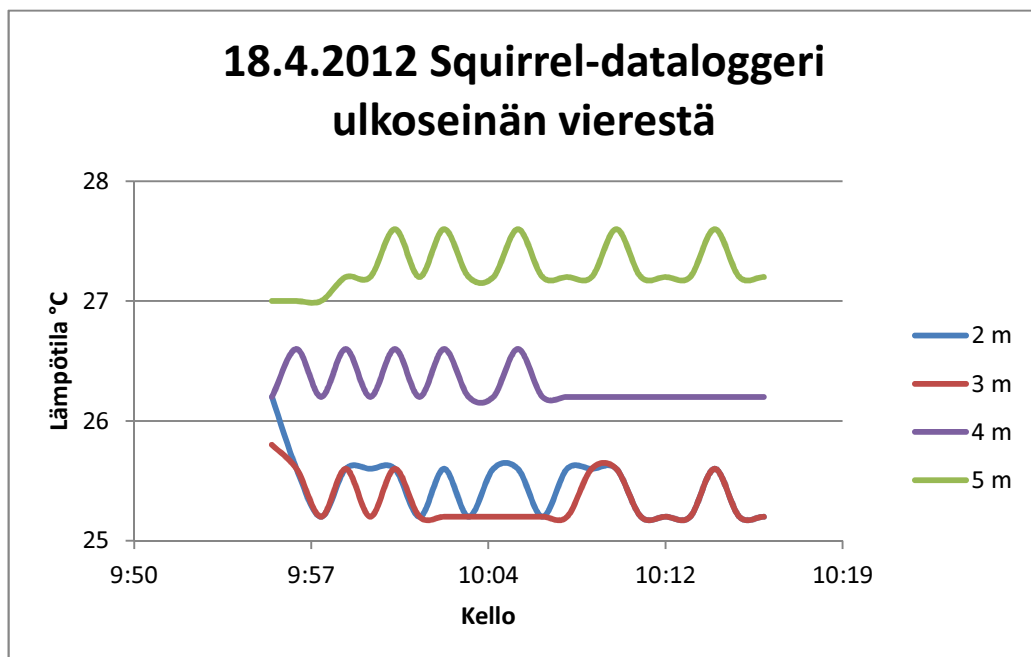
Kuva 9. Ilman lämpötilan kerrostumisen mittaaminen, mittauskohdat esitettyinä punaisella

Mittaustulokset

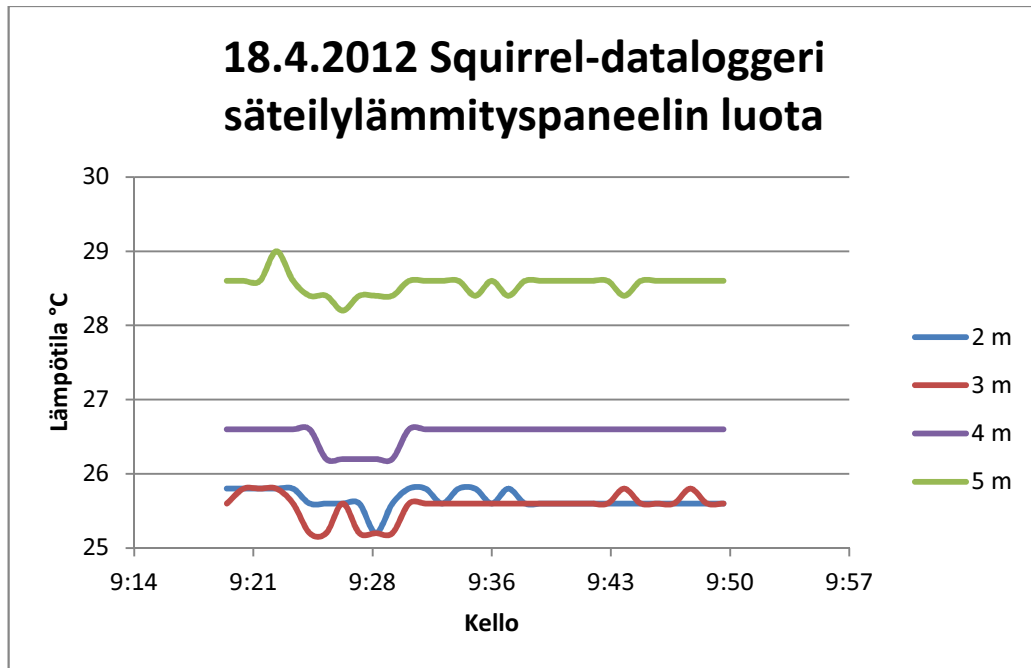
Mittaustulokset purettiin tietokoneelle ja tuloksista muodostettiin kaaviot 1, 2 ja 3.



Kuvio 1. Escort-lämpötilaloggerin tulokset



Kuvio 2. Squirrel-dataloggerin tulokset ulkoseinän vierestä



Kuvio 3. Squirrel-dataloggerin tulokset säteilylämmityspaneelin luota

Mittaustuloksista huomataan, että Escort-lämpötilaloggerin mitaama lämpötila-arvo on pysynyt tasaisesti arvossa 25,2 °C ja Squirrel-dataloggerin mitaamissa lämpötila-arvoissa on heiluntaa. Tähän syynä voi olla se, että Escort lämpötilaloggeri mittaa lämpötilan laitteen kotelon sisällä olevalla anturilla, jolloin kotelon lämmentyä huoneenlämpöön ei se ole yhtä reaktiivinen pienille lämpötilamuutoksille kuin Squirrel-dataloggerin pienet lämpötila-anturijohdot.

Säteilylämmityspaneelin luota mitattaessa suurin lämpötilakerrostuma mitataan kello 09:23, jolloin 5 metrin korkeudessa oleva anturi saa arvokseen 29 °C ja 1 metrin korkeudessa oleva Escort-lämpötilaloggeri arvokseen 25,2 °C. Tällöin ilmanlämpötilan kerrostumaksi saadaan $29\text{ °C} - 25,2\text{ °C} / 4\text{ m} = 0,95\text{ °C/m}$.

Keskiarvo kerrostumalle säteilylämmityspaneeli luota mitattaessa oli 0,84 °C/m.

Ulkoseinän viereltä mitattaessa suurin lämpötilakerrostuma mitataan kello 10:01, jolloin 5 metrin korkeudessa oleva anturi saa arvokseen 27,6 °C ja 1 metrin korkeudessa oleva Escort-lämpötilaloggeri arvokseen 25,2 °C. Tällöin ilmanlämpötilan kerrostumaksi saadaan $27,6\text{ °C} - 25,2\text{ °C} / 4\text{ m} = 0,6\text{ °C/m}$.

Keskiarvo kerrostumalle ulkoseinän vierestä mitattaessa oli 0,52 °C/m

Mittaustarkkuus laitteille

Escort lämpötilaloggeri +/- 0,3 °C

Squirrel dataloggeri +/- 0,1 °C

6.2 Operatiivinen lämpötila

Operatiivinen lämpötila on mitattu tai laskettu lämpötila-arvo, joka kuvaa ilman lämpötilasta poikkeavien pintalämpötilojen vaikutusta ihmisen kokemaan lämmöntunteeseen [6, s. 10–12]. Operatiivinen lämpötila halutaan mitata kohteesta, jos operatiivinen lämpötila osoittautuu korkeammaksi kuin ilmanlämpötila. Voidaan tällöin laskea huoneenlämpötilaa, niin että operatiivinen lämpötila on sama kuin alun perin valinnut ilmanlämpötila. Tämä mahdollistaa huomattavat säästöt lämmityskustannuksissa.

Mittausuunnitelma

Operatiivista lämpötilaa mitataan kahdesta kohtaa tilaa. Ensimmäinen piste sijaitsee suoraan säteilylämmityspaneelin alla ja toinen sen vierellä.

Mittauslaitteeksi saatiin Metropolialta

- Sisäilmastomittari TZAK 1100
 - Kuutioanturi

Mittauksien suorittaminen

Mittaukset suoritettiin kohteessa 17.4.2012. Kuutioanturi asetettiin TZAK 1100-laitteen käyttöohjeen mukaisesti jalustalle 110 cm:n korkeuteen, jolloin se mittaa seisovan henkilön operatiivista lämpötilaa.

Kuutioanturi siirrettiin ensimmäiseen mittauspisteeseen säteilylämmityspaneeli alle, ja sen pintalämpötilojen annettiin tasoittua 10 minuutin verran, jotta mittaustuloksista tulisi mahdollisimman tarkka. Tämän jälkeen suoritettiin mittaus, joka toistettiin kymmenen kertaa.

Keskiarvon seisovan henkilön operatiiviselle lämpötilalle, suoraan säteilylämmitys-paneelin alta TZAK 1100 antoi 24,88 °C.

Kuutioanturi siirrettiin seuraavaan mittauspisteeseen kahden säteilylämmityspaneelin väliin ja annettiin sen pintalämpötilojen tasoittua 10 minuutin verran. Tämän jälkeen suoritettiin mittaus, joka toistettiin kymmenen kertaa.

Keskiarvo seisovan henkilön operatiiviselle lämpötilalle, säteilylämmityspaneelien välistä TZAK 1100 antoi 24,85 °C.

Mittauspisteet ovat esitettynä liitteen 2 pohjakuvassa.

6.3 Päätelmät mittaustuloksista

Päätelmien muodostaminen mittaustuloksista on hankalaa, koska säteilylämmitys-paneelien kiertovettä ohjaavan säätöventtiilin huonetermostaattien puuttuessa, varaosavaraston ilmanlämpötila oli noin 5 °C lämpimämpää kuin sen pitäisi. Voidaan kuitenkin todeta, että lämpötilojen kerrostuminen oli keskiarvoltaan voimakkaampaa, kuin luvussa 4.1 esitettyjen REHVA:n tekemien tutkimusten antamat arvot. Syy tähän voi olla, että kohteessa olevat säteilylämmityspaneelit oli asennettu samaan kulmaan kuin katto eli 4°:n kulmaan. Luvussa 5.3 esitettiin, kuinka säteilylämmityspaneelin asentaminen muuhun kuin vaakatasoon pienentää lämpösäteilyn osuutta kokonaislämmönluovutuksesta.

Operatiivisen lämpötilan osalta huomattiin, että se oli hiukan pienempi kuin Escort-lämpötilaloggerin mittaama ilman lämpötila. On kuitenkin vaikea arvioida, minkälaisia operatiivisen lämpötilan arvoja saadaan, kun lämpötilamittarit on asennettu säätämään säteilylämmityspaneelien säätöventtiiliä.

7 Säteilylämmitysjärjestelmän suunnittelu

7.1 Tarvittavat lähtötiedot

Säteilylämmitysjärjestelmän suunnittelussa tarvitaan lämmitysjärjestelmän suunnitteluun tarvittavat normaalit lähtötiedot:

- lämmitystehontarve
- huonelämpötila
- lämmitysmuoto sekä kiertoveden meno- ja paluuveden lämpötila
- huonejaot.

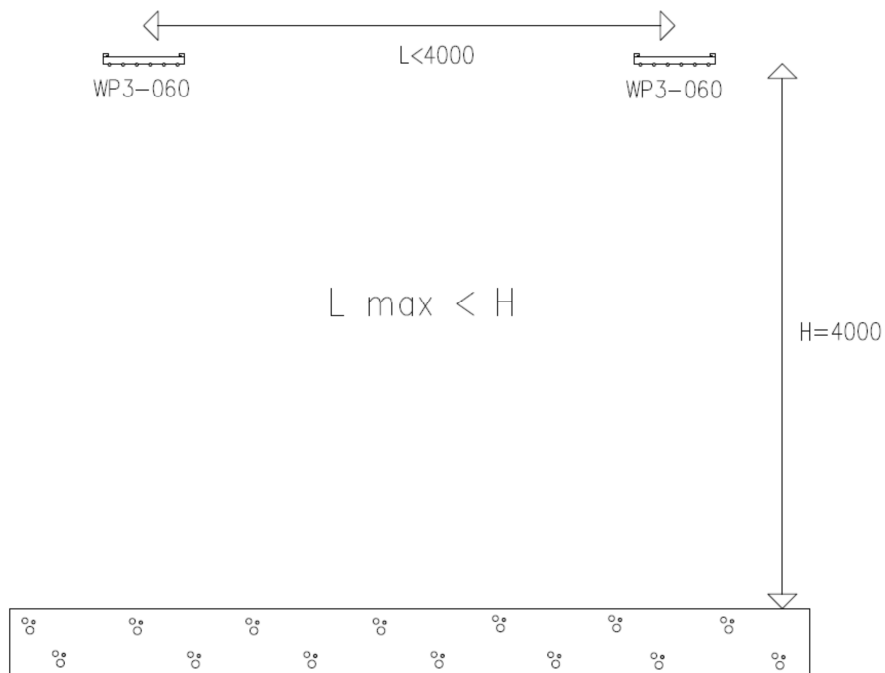
Yllä mainittujen lähtötietojen lisäksi tulee erityisesti kiinnittää huomiota seuraaviin asioihin:

- tilojen korkeus
- kattorakenteiden muoto (kalteva tai tasainen)
tilojen kiintokalusteet tai telineet.

7.2 Tilojen korkeuden vaikutus järjestelmän suunnitteluun

Tilojen korkeus vaikuttaa huomattavasti säteilylämmityspaneelien mitoitukseen sekä suunnitteluun. Säteilylämpö leviää säteilylämmityspaneelilta keilamaisesti alaspäin, ja keilan koko kasvaa sitä suuremmaksi, mitä korkeammalle säteilylämmityspaneeleit asennetaan. Keilan kasvaessa, myös säteilylämmön intensiivisyys vähenee.

Suunnittelussa tulisi huolehtia siitä, että säteilylämmitys kattaa koko tilan lattiapinta-alan. Hyvänä suunnitteluohjeena on pidetty sääntöä, että katossa olevien säteilylämmityspaneelien keskustojen etäisyys toisistaan pitää olla lyhyempi kuin säteilylämmityspaneelien asennuskorkeus, kuten kuvassa 10 [3].



Kuva 10. Asennuskorkeuden vaikutus paneelien väliseen etäisyyteen, esimerkkiarvona 4 m korkea tila.

Säteilytehon intensiivisyyden heikkeneminen asennuskorkeuden kasvaessa tulee huomioida paneelien tehontuottoa määrittäessä. Fraccaro on antanut omille säteilylämmityspaneelilleen korjauskertoimet asennuskorkeuden mukaan (taulukko 9).

Taulukko 9. Fraccaron säteilylämmityspaneelien tehon korjauskerroin [3]

Asennuskorkeus [m]	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	10	11	12
Korjauskerroin	1	0,98	0,97	0,96	0,94	0,92	0,9	0,88	0,87	0,86

Taulukosta 9 voidaan nähdä, että optimaalinasennuskorkeus säteilylämmityspaneelille on 6 m. Tätä korkeammalla olevat säteilylämmityspaneelit eivät luovuta lämmitystehoa yhtä tehokkaasti oleskeluvyöhykkeelle. Alle 6 metriä korkeissa tiloissa korjauskerroin on 1.

Asennuskorkeutta määrittäessä tulee myös ottaa huomioon terminen viihtyvyys ja liian voimakas lämpösäteily oleskeluvyöhykkeellä. Liian voimakas lämpösäteily voi tuntua

epämiellyttävältä. Tämä voidaan välttää sillä, ettei säteilyteho ylitä 200 W/m^2 [5, s. 19–20]. Tämä voidaan varmistaa laskemalla suunnitellun säteilylämmitysjärjestelmän kokonaisteho ja vertaamalla sitä lattiapinta-alaan, koska kyseessä on lämpösäteilyn aiheuttama ongelma, tulee lämmitysteho kertoa säteilylämmitysjärjestelmän lämpösäteilyn osuudella. Esimerkiksi 200 m^2 on mitoitettu WP3-090-säteilylämmityspaneelita 20 kW ja WP3-090:n lämpösäteilyn osuus on vaakatasoon asennettuna (taulukko 8) 70 %. Tällöin säteilyteho neliometriä kohden on $20 \text{ kW} * 70 \% / 200 \text{ m}^2 = 70 \text{ W/m}^2$ [5, s. 19-20].

Kattorakenteiden muodon huomioiminen

Kuten luvussa 5.4 esitettiin, säteilylämmityspaneelien asentaminen kaltevasti aiheuttaa sen, että kokonaislämmitystehonluovutuksesta konvektion osuus kasvaa verrattuna täysin vaakasuoraan asennettua säteilylämmityspaneelia. Tämän takia on hyvä tarkistaa katon tyyppi ja siihen liittyvät rakenteet.

Säteilylämmitysjärjestelmän energiataloudellisuuden puolesta on tärkeää, että säteilylämmityspaneelit asennetaan vaakatasoon.

Kaltevissa kattorakenteissa olisi hyvä valita yhtenäinen asennuskorkeus säteilylämmityspaneelille, jossa kaikki olisivat vaakatasossa. Jos tämä ei ole mahdollista tilankäytön takia, voidaan paneelita asentaa eri korkeusasemille, jotta paneelit saadaan vaakatasoon asennettua.

7.3 Tilojen kalustuksen huomioiminen

Tilojen kalustuksen, etenkin kiintokalustuksen, huomioiminen suunnittelussa voidaan pitää tärkeänä. Katossa sijaitsevien säteilylämmityspaneelien luovuttamaan lämpösäteilyyn tulee päästä oleskeluvyöhykkeelle, jotta saadaan aikaiseksi mahdollisimman tasainen ilman lämpötila. Tätä voivat estää erinäiset kiintokalusteet, kuten korkeat lavahyllyt ja muut kiintokalusteet. Jos säteilylämmityspaneeli sijoitetaan suoraan korkean ka-

lusteen ylle, suurin osa lämpösäteilystä vaikuttaa vain tämän korkean kalusteen ylätasolle tai lämpösäteily heijastuu kalusteesta jonnekin muualle kuin oleskeluvyöhykkeelle.

7.4 Fraccaron WP-sarjan säteilylämmityspaneelien suunnittelu

Säteilylämmitysjärjestelmän suunnittelu aloitetaan perehtymällä kohteen lähtötietoihin ja niiden perusteella lähdetään valitsemaan sopivaa säteilylämmityspaneelia, putkitustapaa ja asennuskorkeutta.

Tarkastellaan esimerkkikohteen avulla suunnittelun etenemistä. Esimerkkikohta on eräs varastorakennus Helsingissä, kohteen pohjakuva liitteenä numero 3. Tarkoituksena on suunnitella rakennuksen varastotilaan säteilylämmitysjärjestelmä.

Lähtötietoja kohteesta:

- Varaston pinta-ala n. 730 m²
- Tilan vapaa korkeus 6 m
- Lämmitystehontarve 36,5 kW
- Lämmitysmuoto: vesikiertoinen keskuslämmitys 70 °C - 40 °C
- Lämpötila 15 °C.

7.5 Säteilylämmityspaneelin mitoittaminen

Suunnittelu aloitetaan laskemalla säteilylämmityspaneelien yllämpötila

$$\Delta T_m = (T_m + T_p)/2 - T_h \quad (12)$$

ΔT_m on säteilylämmityspaneelin yllämpötila huonelämpötilaan nähden, °C

T_m on lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötila, °C

T_p on lämmitysjärjestelmän paluueden lämpötila, °C

T_h on huonelämpötila, °C

$$\Delta T_m = (70 \text{ °C} + 40 \text{ °C})/2 - 15 \text{ °C} = 40 \text{ °C}$$

Tämän avulla voidaan määrittää liitteestä 4 eri levyisten säteilylämmityspaneelien metrinen tehontuotto ja tämän avulla voidaan laskea tarvittava määrä säteilylämmityspaneelia, jotta saadaan katettua lämmitystehontarve.

WP2-060 – 202 W/m, jolloin $36\,500\text{ W} / 202\text{ W/m} = 180\text{ m}$

WP2-090 – 284 W/m, jolloin $36\,500\text{ W} / 284\text{ W/m} = 129\text{ m}$

WP2-120 – 380 W/m, jolloin $36\,500\text{ W} / 380\text{ W/m} = 96\text{ m}$

WP3-040 – 173 W/m, jolloin $36\,500\text{ W} / 173\text{ W/m} = 216\text{ m}$

WP3-060 – 242 W/m, jolloin $36\,500\text{ W} / 242\text{ W/m} = 151\text{ m}$

WP3-090 – 346 W/m, jolloin $36\,500\text{ W} / 346\text{ W/m} = 105\text{ m}$

WP3-120 – 446 W/m, jolloin $36\,500\text{ W} / 446\text{ W/m} = 82\text{ m}$

Säteilylämmityspaneelien lisäksi, myös linjojen päihin liitettävälle jakotukeille on annettu lämmitysteho, tehot löytyvät liitteestä 5.

WP2-060 – 139 W/jakotukkipari

WP2-090 – 207 W/jakotukkipari

WP2-120 – 260 W/jakotukkipari

WP3-040 – 91 W/jakotukkipari

WP3-060 – 135 W/jakotukkipari

WP3-090 – 215 W/jakotukkipari

WP3-120 – 282 W/jakotukkipari

Liitteen 2 pohjakuvasta huomataan varastohallin suuremman osan pituudeksi 33,3 metriä ja leveydeksi 20 metriä ja varaston pienemmän osan pituus 11,6 metriä ja leveys 5,6 metriä. Suunnitellaan paneelien sijainti, niin että paneelit asennetaan varaston suuremmassa osassa 30 metrin pituisiksi linjoiksi, jolloin yhdessä linjassa on 5 kappaletta 6 metrin pituista säteilylämmityspaneelia liitettynä yhteen. Varaston pienemässä osassa puolestaan on 10 tai 12 metrin pituinen linja, joka tehdään joko kahdesta 6 metrin pituisesta tai 6 metrin ja 4 metrin yhteenliitetyistä säteilylämmityspaneelista.

Määritetään paneelien asennuskorkeus 5,5 metriin, jolloin kuvassa 8 esitetyn ohjeen mukaisesti paneelien maksimaalisen välimatkan tulee olla pienempi kuin 5,5 metriä. Tällöin 20 metriä leveä varastohallin suurempaan osaan tarvitaan vähintään 3 kappaletta linjoja, jotta säteilylämmityspaneelien luovuttama lämpösäteily kattaisi tasaisesti koko varastotilan lattiapinta-alan. Pienemmässä osassa riittää yksi linja. Määritetään tehontarpeen mukaan lasketut erilevyisten säteilylämmityspaneelien juoksumetriensä mukaiset linjojen lukumäärät.

WP3-040 säteilylämmityspaneelia käytettäessä tarvittava juoksumetri oli 216 metriä. Tällöin tarvittaisiin hallin pieneen käytäväosaan yksi kymmenmetrinen ja hallin suurempaan osaan seitsemän kappaletta 30-metristä linjaa, jotta tarvittava lämmitysteho saavutettaisiin. Yhteensä säteilylämmityspaneelia olisi $10\text{ m} + 30\text{ m} * 7 = 220\text{ m}$ ja jakotukkipareja olisi 8. Lämmityspaneelilinjat esitetty pohjakuvassa liitteessä 5. Kokonaislämmitysteho: $220\text{ m} * 173\text{ W/m} + (8 * 91\text{ W}) = 37,80\text{ kW}$.

Tarkastellaan loppujen vaihtoehtojen linjojen lukumäärät

WP2-060

- 1 kpl 10-metrinen linja
- 6 kpl 30-metristä linjaa ($((170\text{ m} - 10\text{ m}) / 30\text{ m} = 5,33)$)
- 7 paria jakotukkeja
- Lämmitysteho: 39,4 kW

WP2-090

- 1 kpl 10-metrinen linja
- 4 kpl 30 metristä linjaa ($((129\text{ m} - 10\text{ m}) / 30\text{ m} = 3,97)$)
- 5 paria jakotukkeja
- Lämmitysteho: 38 kW

WP2-120

- 1 kpl 10-metrinen linja
- 3 kpl 30-metristä linjaa ($((96\text{ m} - 10\text{ m}) / 30\text{ m} = 2,87)$)
- 4 paria jakotukkeja
- Lämmitysteho: 39 kW

WP3-060

- 1 kpl 10–metrinen linja
- 5 kpl 30–metristä linjaa ($((151 \text{ m} - 10 \text{ m}) / 30 \text{ m} = 4,7)$)
- 6 paria jakotukkeja
- Lämmitysteho: 39,5 kW

WP3-090

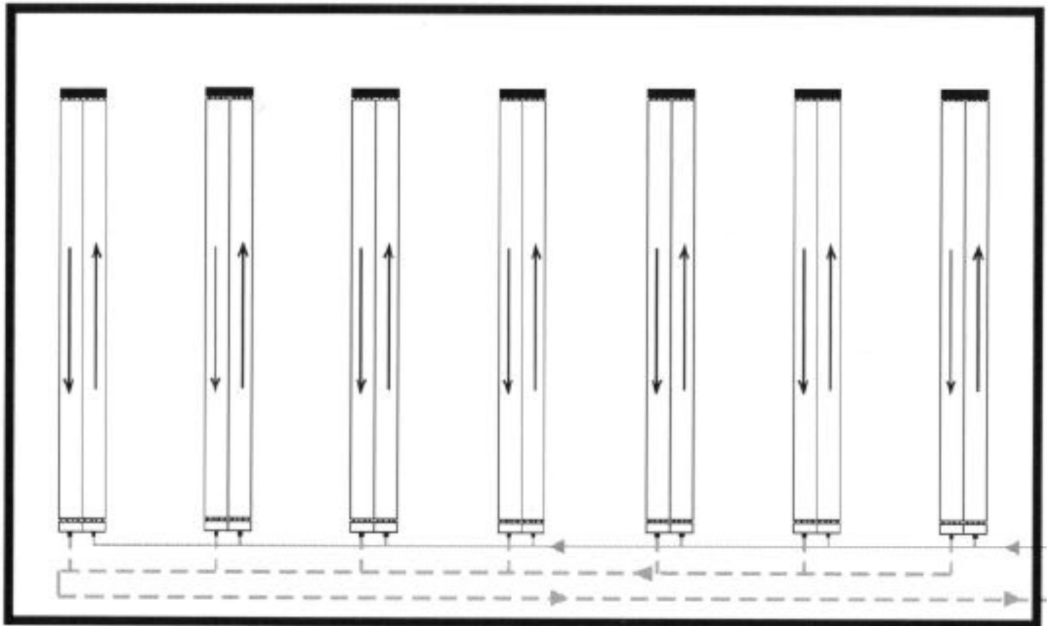
- 1 kpl 12–metrinen linja
- 3 kpl 30–metristä linjaa ($((105 \text{ m} - 12 \text{ m}) / 30 \text{ m} = 3,1)$)
- 4 kpl jakotukkeja
- Lämmitysteho: 36,2 kW.

WP3-120 mallilla lämmitysteho saavutetaan jo 2 kappaleella 30–metrisellä linjaa. Jos halutaan välttyä reilulta ylimitoitukselta ja halutaan tuottaa mahdollisimman tasainen lämmitys koko hallitilaan, voidaan tarvittava lämmitysteho tuottaa käyttämällä 6 kappaletta 12–metristä ja yksi kappale 10–metristä linjaa, jolloin WP3-120 säteilylämmitys-paneelia olisi yhteensä 82 metriä ja jakotukkipareja olisi 7. Lämmitysteho 38,5 kW. Tämä vaihtoehto on esitettyä liitteessä 7.

7.6 Putkitus

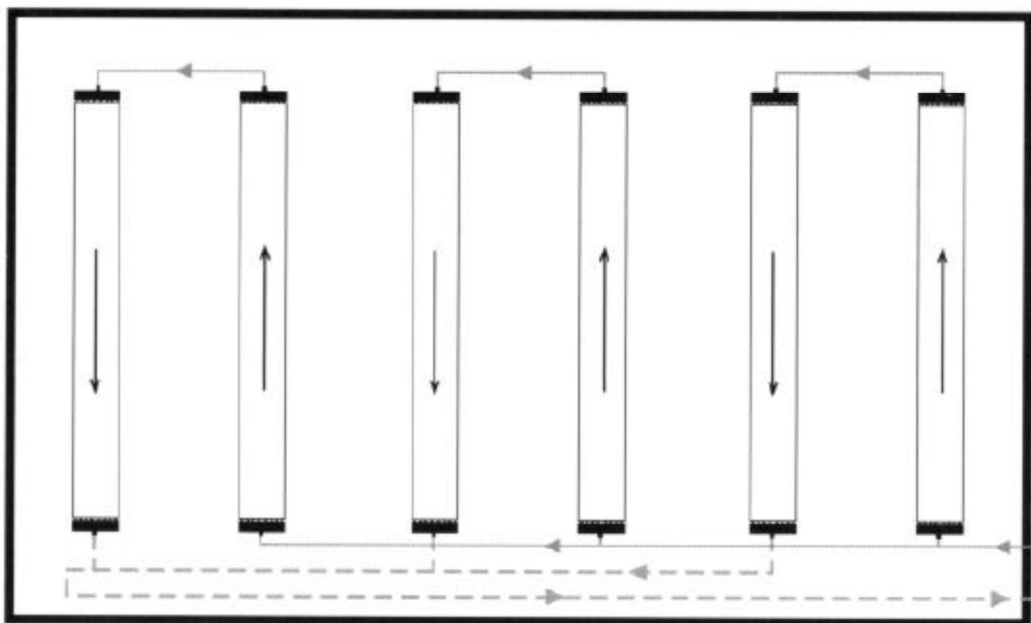
Putkitukseen on olemassa periaatteessa kaksi eri tapaa, joilla kiertovesi voidaan jakaa säteilylämmityspaneelille. Fraccaro käyttää näistä kahdesta nimiä D ja B [3].

Kuvassa 11 on esitetty tapa D, jossa paneelilinjan päissä olevat jakotukit jakavat vesivirran, niin että puolet säteilylämmityspaneelin läpi kulkevista putkista ovat menovedelle ja loput paluuedelle. Tämä mahdollistaa sen, että meno- ja paluuesiputket kytetään linjan yhdessä päässä. Esimerkki tavasta D on liitteenä 6.



Kuva 11. Putkitustapa D [3]

Kuvassa 12 on esitetty tapa B, jossa paneelilinja läpi kulkee ainoastaan meno- tai paluuvesi. Tällöin linjan kummassakin päässä on jakotukki, jossa on yksi lähtö. Esimerkki tapaus B on liitteenä 7.



Kuva 12. Putkitustapa B [3]

7.7 Säteilylämmityspaneelien aiheuttama painehäviö

Säteilylämmityspaneelien aiheuttama kiertoveden painehäviö saadaan valmistajan antamasta taulukosta. Painehäviö määräytyy säteilylämmityspaneelin lävitse kulkevien putkien lukumäärästä, putkitustyylistä sekä virtaamasta.

Fraccaron painehäviötaulukko on liitteenä 8. Tässä painehäviötaulukossa painehäviö on ilmoitettuna yksikkönä mm(H₂O)/m, yksi mm(H₂O)/m vastaa noin 9,80 Pascalia.

Lasketaan esimerkki 30 metriä pitkälle linjalle WP3-060-säteilylämmityspaneelia, putkitustyyli D. Lämpöteho on 7,26 kW, menovesi 70 °C ja paluuvesi 40 °C.

WP3-060-mallissa säteilylämmityspaneelin lävitse kulkevia putkia on yhteensä kuusi kappaletta.

Virtaama voidaan määrittää lämmitystehon kaavalla.

$$\dot{Q} = q_v * \rho_v * C_{p_v} * (T_m - T_p) \quad (13)$$

\dot{Q} on lämmitysteho, W

q_v on virtaama, l/s

ρ_v on veden tiheys 1000 kg/m³

C_{p_v} on veden ominaislämpökapasiteetti, 4,2 kJ/kg * K

T_m on menoveden lämpötila, K

T_p on paluuv veden lämpötila, K

Ratkaistaan kiertoveden virtaama lämmitystehon kaavasta

$$q_v = \dot{Q} / \rho_v * C_{p_v} * (T_m - T_p)$$

Lasketaan virtaama esimerkissä annetuilla tiedoilla

$$q_v = 7260 \text{ W} / 1000 \text{ kg/m}^3 * 4,2 \text{ kJ/kg} * \text{K} * (70 \text{ °C} - 40 \text{ °C})$$

$$q_v = 0,0576 \text{ l/s}$$

Fraccaron painehäviötaulukossa virtaaman yksikkönä käytetään l/h.

$$q_v = 0,0576 \text{ l/s} * 3600 \text{ s/h} = 207,36 \text{ l/h} \sim 205 \text{ l/h}$$

Liitteenä 7 olevasta taulukosta voidaan tällöin määrittää painehäviöksi: 1,36 mm(H₂O)/m, joka vastaa Pascaleina 1,36 mm(H₂O)/m * 9,80 = 13,33 Pa/m. Tällöin 30 metrin pituinen WP3-060-linja aiheuttaisi painehäviötä 13,33 Pa/m * 30 m = 399,9 Pa.

Putkitustapaa ja paneelia valittaessa tulee ottaa huomioon valmistajan ilmoittamat minimi sekä maksimi virtaamat eri säteilylämmityspaneelimalleille ja putkitustyylille. Liian pieni virtaama voi vähentää säteilylämmityspaneelin lämpötehoa, koska kiertoveden virtaus muuttuu laminaariseksi. Liian suuri virtaama taas voi aiheuttaa melua ja tärinää.

Esimerkiksi WP3-120-mallille putkitustyyliä B käyttäen minimivirtaamaksi annetaan 820 l/h ja maksimivirtaamaksi 24000 l/h. Tämä tarkoittaisi sitä, että esimerkkinä käytävässä kohteessa voitaisiin käyttää minimissään seuraavan pituisia säteilylämmityspaneelilinjoja

Putkitustyyli B

$$\emptyset = 820 \text{ l/h} / 3600 \text{ s} * 1000 \text{ kg/m}^3 * 4,2 \text{ kJ/kg} * \text{K} * (70 \text{ }^\circ\text{C} - 40 \text{ }^\circ\text{C}) = 28 \text{ 700 W}$$

$$\text{WP3-120} = 28 \text{ 700 W} / 446 \text{ W/m} = 64,3 \text{ m}$$

Lyhin mahdollinen säteilylämmityspaneelilinja WP3-120-mallilla, putkitustyyli B:llä, olisi 64,3 metrin pituinen. Tämä tarkoittaisi sitä, että lämmitystehoa vastaava 82 metriä WP3-120-säteilylämmityspaneelia tulisi kytkeä yhdeksi linjaksi.

Putkitustyyli D

$$\emptyset = 410 \text{ l/h} / 3600 \text{ s/h} * 1000 \text{ kg/m}^3 * 4,2 \text{ kJ/(kg} * \text{K)} * (70 \text{ }^\circ\text{C} - 40 \text{ }^\circ\text{C}) = 14 \text{ 350 W}$$

$$\text{WP3-120} = 14 \text{ 350 W} / 446 \text{ W/m} = 32,17 \text{ m}$$

Lyhin mahdollinen säteilylämmityspaneelilinja WP3-120-mallilla, putkitustyyliä D, olisi 32,17 metrin pituinen. Esimerkkikohteessa tämä tuottaisi ongelmia, koska varastorakennuksen isomman osan pituus oli 33 metriä. Yhtenäisenä linjana tämä ei luultavamin mahtuisi.

Tarkistetaan vielä muiden paneelileveyksien minimivirtaamien mukaiset säteilylämmityspaneelilinjojen pituudet.

- WP2-060
 - Putkitustyyli B, min 45 m
 - Putkitustyyli D, min 23 m
- WP2-090
 - Putkitustyyli B, min 49 m
 - Putkitustyyli D, min 25 m
- WP2-120
 - Putkitustyyli B, min 50 m
 - Putkitustyyli D, min 25 m
- WP3-040
 - Putkitustyyli B, min 53 m
 - Putkitustyyli D, min 26 m
- WP3-060
 - Putkitustyyli B, min 58 m
 - Putkitustyyli D, min 29 m
- WP3-090
 - Putkitustyyli B, min 63 m
 - Putkitustyyli D, min 31 m

7.8 Säteilylämmityspaneelimallin valinta

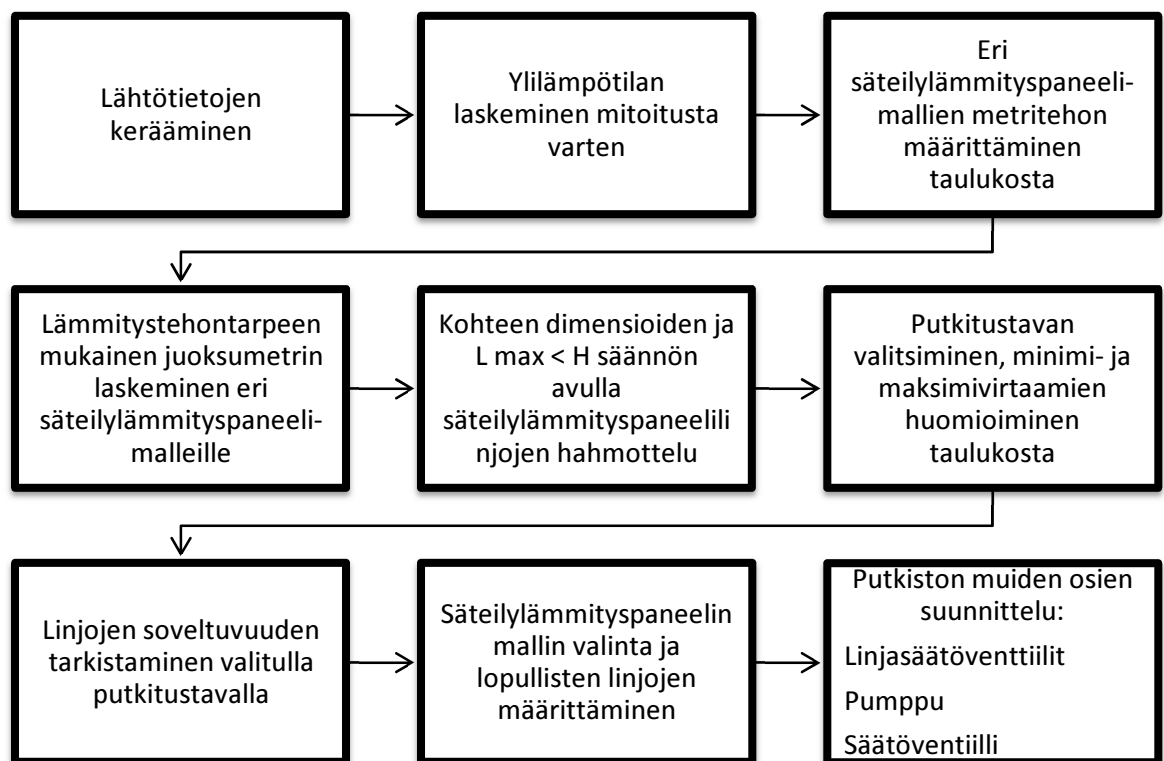
Sopivaksi säteilylämmityspaneeliksi energiataloudellisuuden kannalta valittaisiin suoraan WP2-120- tai WP3-120-mallit, kuten luvussa 5.3 esitetyissä tutkimustuloksissa osoitettiin. Leveämpi säteilylämmityspaneeli tuottaa prosentuaalisesti enemmän säteilylämpöä kokonaislämpötehonluovutuksesta kuin pienemmät mallit. WP2-120 eroavuus

WP3-120:een energiataloudellisuudessa on se, että WP2-120:n pintalämpötila voi olla keskiarvoltaan pienempi, koska säteilylämmityspaneelin läpi kulkevat putket ovat kauempana toisistaan, jolloin säteilylämmityspaneelin pintalämmötila ei ole yhtä yhtenäisen kuin WP3-120-mallissa. Fraccaro ilmoittaa WP2-120-mallin kokonaislämpötehosta 71 %:n olevan lämpösäteilyä, ja WP3-120-mallin 72 % [3].

WP2-120-malli kuitenkin voittaa asennushelpoudessaan ja mahdollistaa yhtenäisemmän ulkonäön kokonaisuutena. WP2-120-säteilylämmityspaneelilinjat sekä putkitukset on esitetty liitteessä 7, WP3-120 esitettynä liitteessä 6. WP3-120:een pitäisi asentaa enemmän jakotukkeja ja putkitustyylin D asentamisessa paneeleita ei voitaisi suoraan asentaa sarjaan, ja linja täytyisi rakentaa osista, jotka on yhdistetty toisiinsa jakotukkien väliin asennettavilla paluu- ja menoputkilla.

7.9 Suunnittelun kulku lohkokaaaviona

Säteilylämmitysjärjestelmän suunnitteluprosessi on esitetty lohkokaaaviona kuviossa 4.



Kuvio 4. Säteilylämmityspaneelijärjestelmän suunnitteluprosessi [3]

7.10 Aluekohtainen lämmitys

Alueellisella lämmityksellä tarkoitetaan tilannetta, jossa esimerkiksi varastohallissa on alueita, joissa haluttu ilmanlämpötila on erilainen. Tällaisia alueita voivat olla pakkaus-/lähetysalue, jossa työntekijät työskentelevät pitkiä aikoja. Sopiva lämpötila +18 °C. Taasen pelkästään varastotilassa, jossa tavaroiden keräily suoritetaan nopeasti ja työntekijän viettämä aika on lyhyt, voi sopiva lämpötila olla +15 °C. Varastohallissa, jossa varastoaluetta ja pakkaus-/lähetysaluetta ei ole erotettuna väliseinillä, on hyvin vaikeata luoda eri lämpötilaisia alueita ilmalämmityksellä taikka muulla tavalla, jossa lämmitys perustuu pakotettuun konvektioon ja sekoittavaan ilmanvaihtoon. Näissä ongelmaksi muodostuu helposti se, että varaston ja pakkausalueen lämpötilat pääsevät sekoittumaan, eikä pakkausalueelle saada haluttua lämpötilaa. Mahdollisuutena olisi kuitenkin puhaltaa ylälämpöistä ilmaa suoraan pakkausalueen oleskeluvyöhykkeelle, mutta tämä voi aiheuttaa epämiellyttävää vedon tunnetta suuren ilmannopeuden takia. Lämpimämpi ilma myös nousee nopeammin yläpohjaa kohden, myös energiataloudellisuus kärsii.

Säteilylämmitysjärjestelmää käyttäen voidaan suunnitteluvaiheessa luoda erilämpöisiä alueita. Säteilylämmitysjärjestelmän etuna on se, että lämpösäteily lämmittää alueen esineistöä, joka puolestaan lämmittää tämän ympäröivää ilmaa. Vaikka esineistön lämmittämä ilma pääsee sekoittumaan keskenään varaston ja pakkausalueen kesken, pysyy kuitenkin esineistön ja rakenteiden lämpötila korkeampana pakkausalueella, jolloin ihminen kokee ympärillä olevan lämpötilan korkeammaksi. [2, s. 8.]

Säteilylämmityspaneelilinjojen ohjaaminen eri alueilla pystytään hoitamaan paikallissäädöllä, jossa esimerkiksi varastoalueen ja pakkausalueen linjoja säädetään omilla säätöventtiileillä, joita ohjataan alueilla olevilla termostaattiantureilla.

8 Päätelmät

Tässä työssä tehdyt selvitykset sekä mitoitukset osoittavat sitä, että vesikiertoinen säteilylämmitysjärjestelmä on hyvä ja toimiva lämmönjakojärjestelmä korkeissa ja laajoissa tiloissa. Järjestelmän energiataloudellisia hyötyjä ovat matala ilman lämpötilakerrostuminen, korkea operatiivinen lämpötila oleskeluvyöhykkeellä, mahdollisuus toimivaan aluelämmitykseen ja se seikka, että suurin osa lämpötehosta siirtyy lämpösäteilyinä, joka sitoutuu tilan rakenteisiin ja esineistöön, mikä mahdollistaa tasaisemman ilmanlämpötilan.

Säteilylämmitysjärjestelmien mahdollisimman hyvää energiataloudellisuutta tavoiteltaessa, tulee ottaa huomioon säteilylämmityspaneelien mitoitus sekä järjestelmän suunnittelu. Mitä enemmän säteilytehon prosentuaalista osuutta kokonaislämmitystehosta kasvatetaan, sitä paremmin järjestelmä luovuttaa lämpöä oleskeluvyöhykkeelle ja vähemmän konvektiona katonrajaan. Tähän pystytään vaikuttamaan helposti varsinkin säteilylämmityspaneelin mitoituksella. Parhaimmillaan lämpösäteilyn osuus voi olla yli 75 %, ja huonoimmillaan se voi olla alle 30 % (WP3-040 asennettuna 90 °:n kulmaan). [3]

Vesikiertoinen säteilylämmitysjärjestelmä on hyvä vaihtoehto, kun olemassa olevien kohteiden lämmitysjärjestelmään ollaan uusimassa. Lämmitysenergiakuluissa saadaan suhteellisen varmasti säästöä, jos kyseessä on ilmalämmityksen kiertoilmalämmityksen vaihtaminen säteilylämmitysjärjestelmään.

9 Yhteenveto

Tämän työn tarkoituksena oli etsiä ja tutkia lisää tietoa vesikiertoisista säteilylämmitys-järjestelmistä Seroco Oy:lle. Materiaalia vesikiertoisista säteilylämmitysjärjestelmistä suomen kielellä löytyi erittäin niukasti, ja lähestulkoon kaikki näitä koskevat lähteet olivat englanninkielisiä. Myöskään yleistä suunnitteluohjetta järjestelmille ei löytynyt suomeksi.

Työssä esimerkkijärjestelmänä käytettiin Seroco Oy:n maahantuomaa Fraccaron WP-sarjan vesikiertoisia säteilylämmityspaneeleita. WP-sarjan mallit ovat kattoon asennettavia, ja niiden energiataloudellisuus on riippuvainen lämpösäteilyn ja konvektion osuuksista kokonaislämmitystehosta. Suhteellisesti eniten lämpösäteilyä luovuttanutta, voidaan pitää energiataloudellisimpana, koska tässä mallissa suurin osa tehosta ohjautuu lämpösäteilynä oleskeluvyöhykkeelle eikä konvektiona katon rajaan. Lämmönsiirto-tekniikan laskentakaavojen avulla ja julkaistujen tutkimusten perusteella voitiin määrittää, että lämpösäteilyn osuus oli suurimmillaan, kun säteilylämmityspaneeli oli mahdollisimman leveä ja sen pintalämpötila mahdollisimman korkea. Huomattiin myös, että säteilylämmityspaneelin asentaminen muuhun kuin vaakatasoon aiheutti konvektion osuuden lisääntymisen.

Kenttämittaukset eivät antaneet haluttuja tuloksia osittain syystä, että säteilylämmitys-paneelien läpi virtaavaa lämmitysvettä säätelevä säätöventtiilin lämpötilamittarit puutuivat kokonaan. Tämä aiheutti sen, että huoneen lämpötila oli huomattavasti haluttua korkeampi. Ilman lämpötilan kerrostuminen saatiin mitattua ja arvoksi saatiin hiukan suurempi arvo kuin REHVA-yhdistyksen tutkimukset antoivat. Tähänkin löytyi mahdollinen vaikuttava tekijä säteilylämmityspaneelien kaltevasta asennuksesta, joka nosti konvektion osuutta lämmönluovutuksesta ja täten myös kasvatti katonrajassa olevan ilman lämpötilaa.

Suunnitteluohjeet laadittiin esimerkkikohteen avulla, jonka kautta esiteltiin suunnittelu-projektin eteneminen, sekä suunnitteluun liittyvät rajoitukset. Ohjetta voidaan käyttää Fraccaron WP-sarjan säteilylämmityspaneelijärjestelmän suunnitteluun.

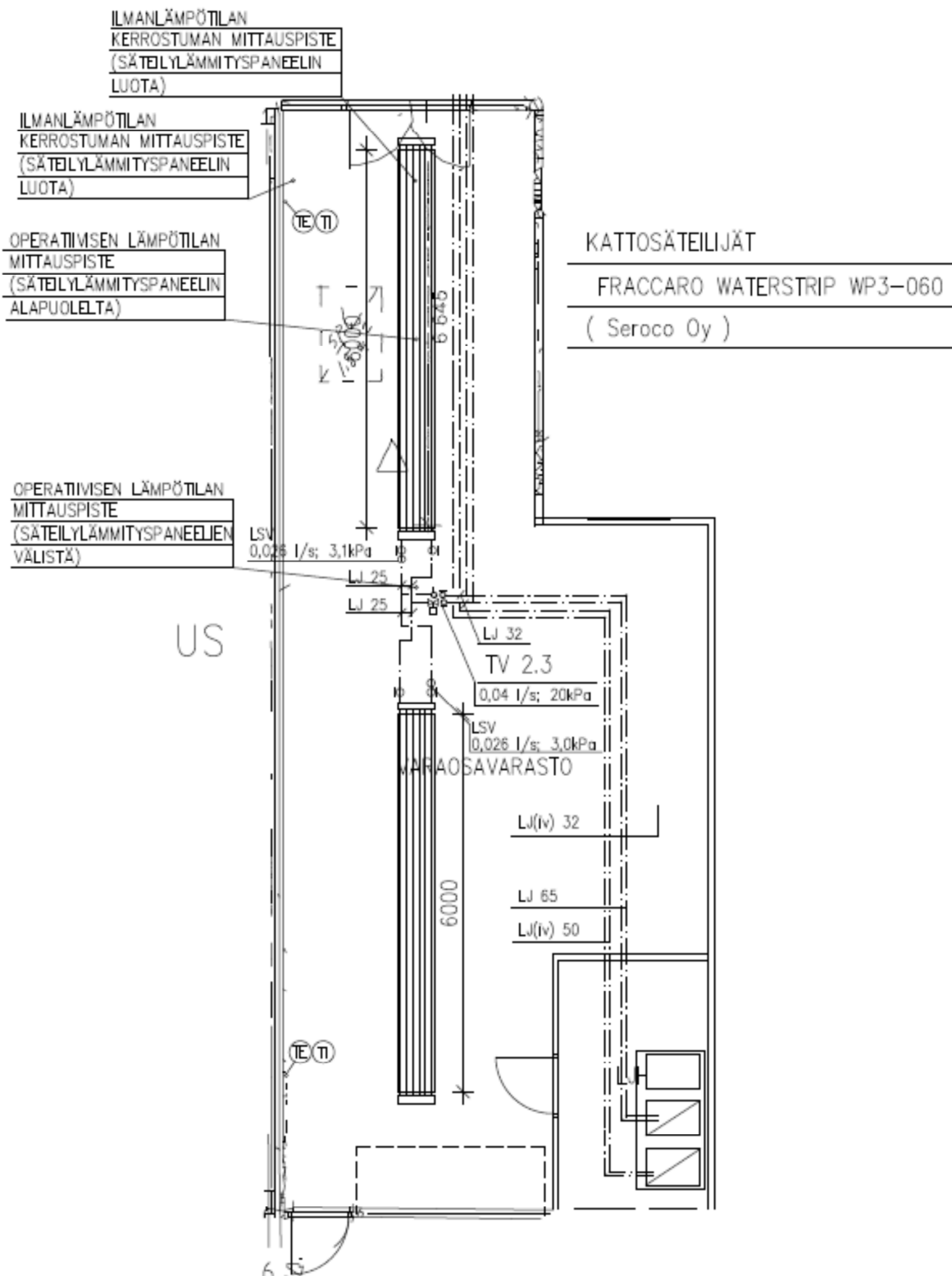
Lähteet

- 1 Seppänen Olli. 1995. Rakennusten lämmitys. Suomen LVI-yhdistysten liitto ry.
- 2 Kattolämmityksen opas. 2001. Lindab Climate division.
- 3 Waterstrip Hot water radiant panels. 2011. Fraccaro
- 4 Bengston H. Harlan. 2011. Convection Heat Transfe Coefficient Estimation. Verkkodokumentti. SunCam. <<http://s3.amazonaws.com/suncam/npdocs/119.pdf>>. Luettu 15.3.2012.
- 5 Kabele Karel. 2011. Energy efficient heating and ventilation of large Halls. REHVA Federation of European heating, ventilation and air-conditioning associations.
- 6 Babiak Jan, Olesen W. Bjarne, Petráš Dušan. 2009. Low temperature heating and high temperature cooling. REHVA Federation of European heating, ventilation and air-conditioning associations.
- 7 Rakennusten energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta, ohjeet. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa D5. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 8 Rakennuksen lämmöneristys, määräykset. 2007. Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa C3. Helsinki: ympäristöministeriö.
- 9 Air properties. 2012. Verkkodokumentti. The engineering toolbox. <http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html>. Luettu 15.3.2012.

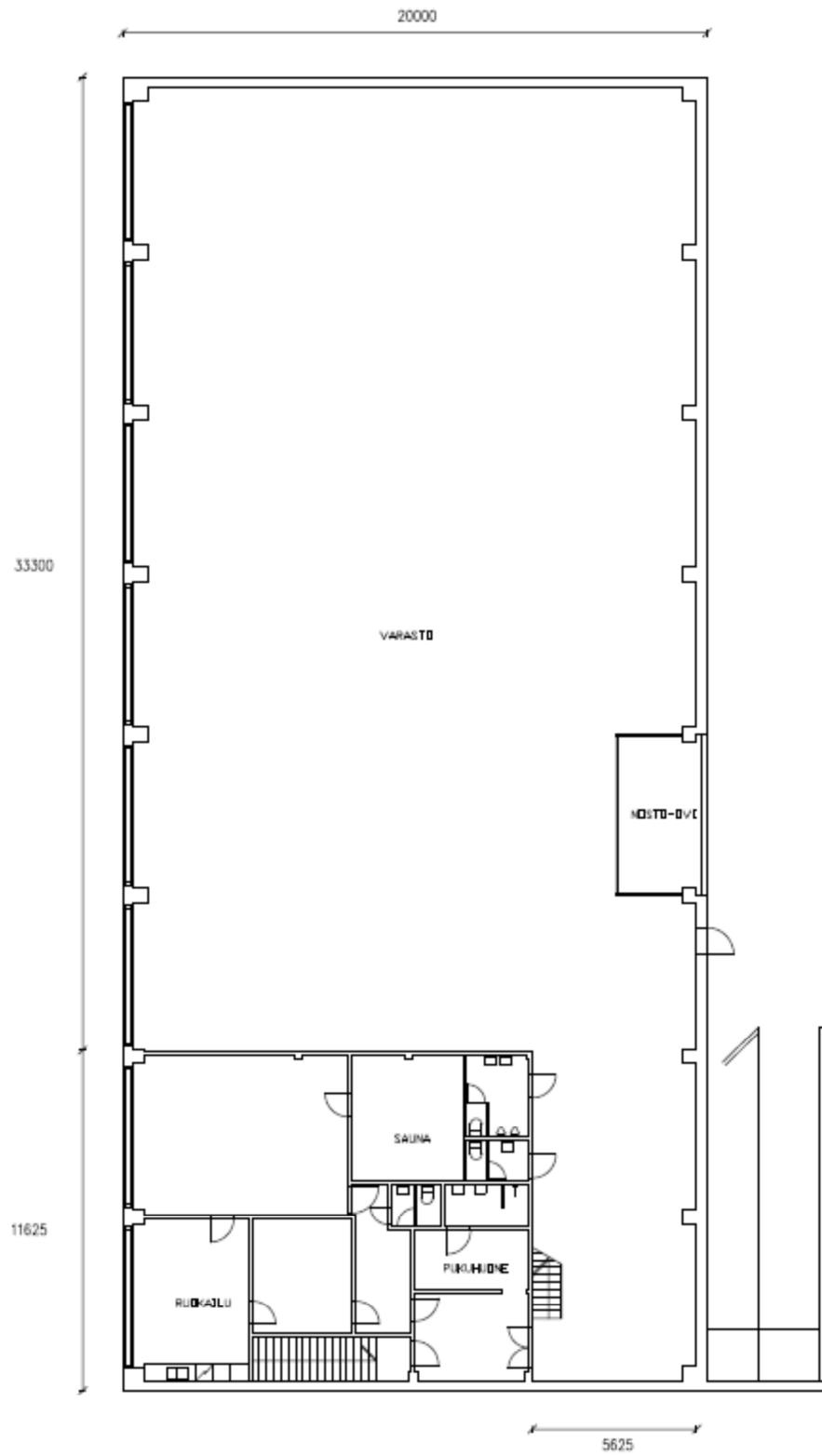
Ilman aineominaisuuksia [9]

Lämpötila °C	tiheys kg/m ³	Ominaislämpö- kapasiteetti kJ/kgK	lämmön- johtavuus W/Km	viskositeetti x 10 ⁻⁶ m ² /s	Lämpölaajenemis- kerroin x 10 ⁻³ 1/K	Prandtlin luku
-150	2,793	1,026	0,0116	3,08	8,21	0,760
-100	1,980	1,009	0,0160	5,95	5,82	0,740
-50	1,534	1,005	0,0204	9,55	4,51	0,725
0	1,293	1,005	0,0243	13,3	3,67	0,715
20	1,205	1,005	0,0257	15,11	3,43	0,713
40	1,127	1,005	0,0271	16,97	3,20	0,711
60	1,067	1,009	0,0285	18,9	3,00	0,709
80	1,000	1,009	0,0299	20,94	2,83	0,708
100	0,947	1,009	0,0314	23,06	2,68	0,703
120	0,898	1,013	0,0328	25,23	2,55	0,700
140	0,854	1,013	0,0343	27,55	2,43	0,695
160	0,815	1,017	0,0358	29,85	2,32	0,690
180	0,779	1,022	0,0372	32,29	2,21	0,690
200	0,746	1,026	0,0386	34,63	2,11	0,685
250	0,675	1,034	0,0421	41,17	1,91	0,680
300	0,616	1,047	0,0454	47,85	1,75	0,680
350	0,566	1,055	0,0485	55,05	1,61	0,680
400	0,524	1,068	0,0515	62,53	1,49	0,680

Mäkelän auton varaosavaraston pohjakuva ja mittauspisteet



Esimerkkikohteen pohjakuva



Fraccaron WP-sarjan säteilylämmityspaneelien mitoitusaulukko [3]

"WP" series – thermal emissions of the panels per linear meter

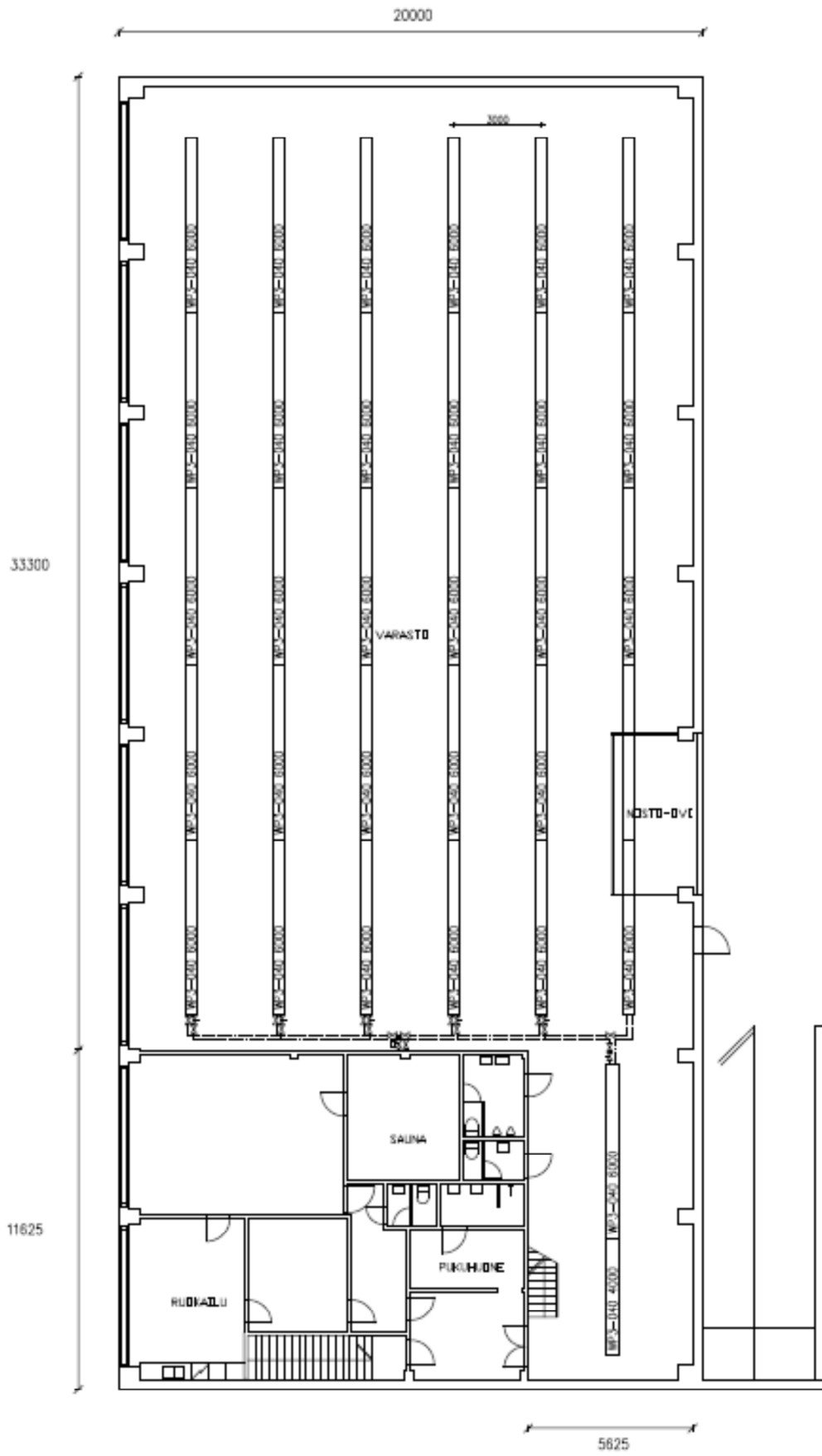
	Mod. WP2 (150 mm)			Mod. WP3 (100 mm)			
	WP2-060	WP2-090	WP2-120	WP3-040	WP3-060	WP3-090	WP3-120
ΔT_m [°K]	W/m	W/m	W/m	W/m	W/m	W/m	W/m
30	144	202	272	123	172	246	317
32	156	218	293	133	186	266	343
34	167	235	315	143	200	285	368
36	179	251	336	153	214	306	394
38	190	267	358	163	228	326	420
40	202	284	380	173	242	346	446
42	214	301	402	184	257	367	472
44	226	318	424	194	271	388	499
46	238	335	447	204	286	409	526
48	250	352	470	215	301	430	553
50	262	369	492	226	316	451	581
52	275	387	515	236	331	473	608
54	287	404	539	247	346	495	636
56	300	422	562	258	361	516	664
58	312	440	585	269	377	538	692
60	325	458	609	280	392	561	720
62	337	476	632	291	408	583	749
64	350	494	656	302	423	605	777
66	363	512	680	313	439	628	806
68	376	531	704	325	455	650	835
70	389	549	728	336	471	673	864
72	402	567	752	348	487	696	894
74	415	586	777	359	503	719	923
76	428	605	801	370	519	742	953
78	441	624	826	382	536	766	982
80	454	642	850	394	552	789	1012
82	468	661	875	405	568	812	1042
84	481	680	900	417	585	836	1072
86	494	699	925	429	602	860	1102
88	508	719	950	441	618	884	1133
90	521	738	975	453	635	907	1163
92	535	757	1000	465	652	931	1194
94	549	777	1026	477	669	956	1225
96	562	796	1051	489	686	980	1256
98	576	816	1077	501	703	1004	1286
100	590	835	1102	513	720	1028	1318
102	604	855	1128	525	737	1053	1349
104	617	875	1154	537	754	1078	1380
106	631	895	1179	549	771	1102	1412
108	645	915	1205	562	789	1127	1443
110	659	935	1231	574	806	1152	1475
112	673	955	1257	586	823	1177	1507
114	687	975	1284	599	841	1202	1538
116	701	995	1310	611	859	1227	1570
118	716	1015	1336	624	876	1252	1602
120	730	1035	1362	636	894	1277	1635

Fraccaron WP-sarjan jakotukkien mitoitus taulukko [3]

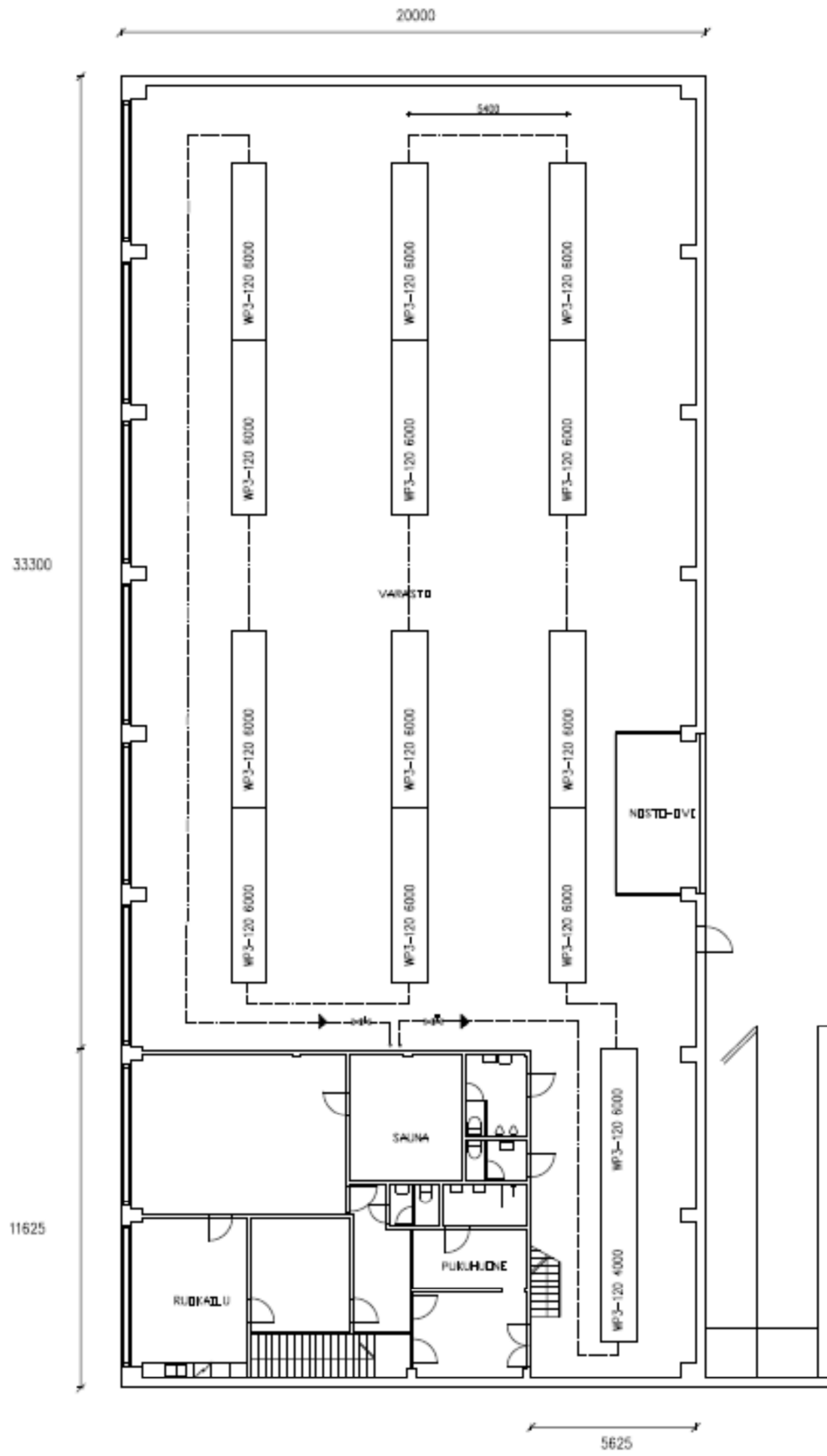
"WP" series – thermal emission for a couple of collectors

	Mod. WP2 (150 mm)			Mod. WP3 (100 mm)			
	WP2-060	WP2-090	WP2-120	WP3-040	WP3-060	WP3-090	WP3-120
ΔT_m [°K]	W	W	W	W	W	W	W
30	97	146	183	64	95	153	198
32	105	158	198	69	103	165	214
34	113	170	213	74	111	177	231
36	122	182	228	80	119	190	248
38	130	195	244	85	127	203	265
40	139	207	260	91	135	215	282
42	147	220	276	96	144	228	299
44	156	233	292	102	152	241	317
46	165	248	308	107	160	254	335
48	174	259	325	113	169	268	353
50	183	272	342	119	178	281	371
52	192	286	358	125	186	294	389
54	202	299	375	131	195	308	406
56	211	313	392	136	204	321	427
58	220	327	410	142	213	335	445
60	230	341	427	148	222	349	464
62	239	355	444	154	231	363	484
64	249	369	462	161	240	377	503
66	259	383	480	167	249	391	522
68	268	397	498	173	258	405	542
70	278	412	516	179	268	419	561
72	288	426	534	185	277	433	581
74	298	441	552	192	287	448	601
76	308	455	570	198	296	462	621
78	318	470	589	204	306	477	642
80	329	485	607	211	315	491	662
82	339	500	626	217	325	506	682
84	349	515	645	224	334	521	703
86	360	530	663	230	344	535	723
88	370	545	682	237	354	550	744
90	380	560	701	243	364	565	765
92	391	576	721	250	374	580	786
94	402	591	740	256	384	595	807
96	412	606	759	263	394	610	828
98	423	622	779	270	404	626	850
100	434	638	798	277	414	641	871
102	445	653	818	283	424	656	893
104	455	669	837	290	434	671	914
106	466	685	857	297	444	687	936
108	477	701	877	304	455	702	958
110	488	717	897	311	465	718	980
112	499	733	917	318	475	733	1002
114	511	749	937	324	486	749	1024
116	522	765	957	331	496	765	1046
118	533	781	977	338	506	780	1068
120	544	797	998	345	517	796	1091

WP3-040-esimerkkikohteen suunnittelu ja putkitustyyli D



WP3-120-esimerkkikohteen suunnittelu ja putkitustyyli B



Säteilylämmityspaneelien painehäviötaulukko [3]

Model	Circuit type B					Circuit type D					Circuit type B			Circuit type D		
	WP2-060 WP3-040	WP2-090 WP3-060	WP2-120	WP3-090	WP3-120	WP2-060 WP3-040	WP2-090 WP3-060	WP2-120	WP3-090	WP3-120	WS2-600 WS3-400	WS2-900 WS3-600	WS3-900	WS2-600 WS3-400	WS2-900 WS3-600	WS3-900
n° tubes	4	6	8	9	12	4	6	8	9	12	4	6	8	4	6	8
Water flow [l/h]	Flow resistance (mm H ₂ O/m)															
200						2,66	1,30	0,78	0,65					0,72		
225						3,26	1,60	0,96	0,81					0,88		
250	0,58					3,92	1,92	1,16	0,97	0,56				1,06		
275	0,69					4,64	2,28	1,38	1,15	0,68				1,26	0,62	
300	0,80					5,42	2,66	1,60	1,34	0,78				1,46	0,72	
350	1,05					7,10	3,48	2,10	1,76	1,02				1,92	0,94	0,57
400	1,33	0,65				8,98	4,38	2,65	2,23	1,30				2,44	1,20	0,72
450	1,63	0,80				11,06	5,42	3,26	2,73	1,60				2,99	1,46	0,84
500	1,96	0,96	0,58			13,30	6,52	3,93	3,29	1,92				3,60	1,76	1,06
550	2,32	1,14	0,69			15,74	7,70	4,64	3,89	2,28	0,63			4,26	2,08	1,26
600	2,71	1,33	0,80	0,65		18,34	8,98	5,42	4,54	2,65	0,73			4,96	2,44	1,47
650	3,12	1,53	0,92	0,75		21,12	10,34	6,24	5,22	3,06	0,84			5,72	2,80	1,69
700	3,55	1,74	1,05	0,85		24,06	11,78	7,10	5,95	3,48	0,96			6,52	3,20	1,92
750	4,01	1,96	1,18	0,96	0,58	27,16	13,30	8,02	6,72	3,93	1,09			7,36	3,60	2,17
800	4,49	2,19	1,33	1,08	0,65	30,44	14,90	8,99	7,52	4,38	1,22	0,60		8,24	4,04	2,43
900	5,53	2,71	1,63	1,33	0,80	37,44	18,34	11,06	9,26	5,42	1,50	0,73		10,14	4,96	2,99
1000	6,65	3,26	1,96	1,60	0,96	45,08	22,08	13,31	11,14	6,52	1,80	0,88		12,20	5,98	3,60
1100	7,87	3,85	2,32	1,89	1,14	53,30	26,12	15,74	13,18	7,70	2,13	1,04	0,63	14,44	7,08	4,26
1200	9,17	4,49	2,71	2,20	1,33	62,12	30,44	18,34	15,36	8,98	2,48	1,22	0,73	16,82	8,24	4,97
1400	12,03	5,89	3,55	2,89	1,74	81,50	39,92	24,06	20,15	11,78	3,26	1,60	0,96	22,08	10,82	6,52
1600	15,22	7,45	4,49	3,65	2,19	103,08	50,50	30,43	25,49	14,90	4,12	2,02	1,22	27,92	13,68	8,24
1800	18,72	9,17	5,53	4,49	2,71	126,82	62,12	37,44	31,36	18,34	5,07	2,48	1,50	34,34	16,82	10,14
2000	22,54	11,04	6,65	5,41	3,26	152,66	74,78	45,07	37,76	22,08	6,10	2,99	1,80	41,34	20,26	12,21
2200	26,65	13,06	7,87	6,40	3,85	180,54	88,44	53,31	44,65	26,12	7,22	3,54	2,13	48,90	23,96	14,44
2400	31,06	15,22	9,17	7,45	4,49	210,42	103,08	62,13	52,03	30,44	8,41	4,12	2,48	56,98	27,92	16,83
2600	35,76	17,52	10,56	8,58	5,17	242,26	118,68	71,53	59,91	35,04	9,69	4,74	2,86	65,60	32,14	19,37
2800	40,75	19,96	12,03	9,78	5,89	276,00	135,20	81,49	68,26	39,92	11,04	5,41	3,26	74,74	36,62	22,07
3000	46,01	22,54	13,58	11,04	6,65	311,64	152,66	92,01	77,07	45,08	12,46	6,10	3,68	84,40	41,34	24,92
3200	51,54	25,25	15,22	13,37	7,45	349,14	171,02	103,08	86,34	50,50	13,96	6,84	4,12	94,56	46,32	27,92
3400	57,30	28,09	16,93	13,76	8,29	388,44	190,29	114,60	96,06	56,18	15,53	7,61	4,59	105,20	51,53	31,06
3600	63,41	31,06	18,72	15,22	9,17	429,55	210,43	126,82	106,23	62,13	17,17	8,41	5,07	116,33	56,99	34,35
3800	69,74	34,16	20,59	16,74	10,09	472,44	231,43	139,49	116,83	68,33	18,89	9,25	5,58	127,94	62,68	37,77
4000	76,33	37,39	22,54	18,32	11,04	517,07	253,30	152,66	127,87	74,79	20,67	10,13	6,10	140,03	68,60	41,34
4200	83,18	40,75	24,56	19,96	12,03		276,01	166,35	139,34	81,49	22,53	11,04	6,65	152,59	74,75	45,05
4400	90,27	44,22	26,65	21,66	13,06		299,56	180,55	151,23	88,44	24,45	11,98	7,22	165,60	81,13	48,89
4600	97,62	47,82	28,82	23,43	14,12		323,94	195,24	163,53	95,64	26,44	12,95	7,81	179,08	87,73	52,87
4800	105,21	51,54	31,06	25,25	15,22		349,13	210,42	176,25	103,08	28,49	13,96	8,41	193,01	94,55	56,99
5000	113,05	55,38	33,38	27,13	16,35		375,14	226,10	189,38	110,76	30,62	15,00	9,04	207,39	101,59	61,23
Max. flow	8000	12000	16000	18000	24000	4000	6000	8000	8000	12000	14100	21200	28200	7000	10600	14100
Min. flow	260	400	540	620	820	130	200	270	310	410	330	500	680	165	250	340