

SAULI PALONIITTY

*Rakennusten lämpökuvaus miehittämättömällä
ilma-aluksella (UAV)*



Opinnäytetyö 19.05.2020

Rakennusterveysasiantuntija

RTA 2019 – 2020

Helsinki 2020

Tekijä Sauli Paloniitty	Ryhmä RTA 2019 - 2020
Opinnäytetyön ohjaaja(t) (tittelit, nimet ja työnantajat) Hannu Turunen DI, Level-2 kansainvälinen pätevyys	Sivu- ja liitesivumäärä 60 sivua
Opinnäytetyön nimi Rakennusten lämpökuvaus miehittämättömillä ilma-aluksilla (UAV)	
TIIVISTELMÄ <p>Ilmalämpökuvausta, eli miehittämättömällä ilma-aluksella tehtävää rakennusten lämpökuvausta ei ole vielä systemaattisesti käytetty kovinkaan paljoa. Tässä työssä keskitytään selvittämään ilmalämpökuvauksen käyttömahdollisuuksia rakennusten tutkimisessa.</p> <p>Selvitystyössä keskitytään kenttäkuvauksin löytämään ilmalämpökuvauksen hyödyt. Tutkimustyö jakaantuu kahteen osakokonaisuuteen; Ilmalämpökuvauksen hyödyt 1) normaalissa käyttötilanteessa, 2) rakennuksen ali- tai ylipainetilanteessa. Selvitystyötä varten on tutkittu 12 erilaista rakennusta tai rakennuskokonaisuutta. Tutkimuksessa on mukana kohteita, joihin on tehty laajat kuntotutkimukset, ilmalämpökuvauksen lisäksi. Tällöin voidaan varmistaa poikkeamien ja löydösten todenperäisyys ja ongelmien laajuus sekä syyt.</p> <p>Ilmalämpökuvaus ns. drone-lämpökuvaus mahdollistaa rakennusten lämpökuvauksen uudella tavalla. Ilmalämpökuvauksen avulla tehtiin merkittäviä löytöjä ja siitä oli hyötyä ongelmien ratkaisuisissa. Ilmalämpökuvauksella havaittiin kattorakenteiden eristevikoja ja kosteusvaurioita. Ylipaineistamalla rakennus, havaittiin merkittäviä ilmavuotoja ja laatuputteita myös uusissakin rakennuksissa. Laatuputteina havaittiin asennusvirheitä ja asennus huolimattomuuksia sekä myös suunnitteluvirheitä. Ilmalämpökuvaus on kustannustehokas ja nopea tapa selvittää kattorakenteiden ja julkisivujen kuntoa.</p>	
Avainsanat UAV lämpökuvaus, ilmalämpökuvaus, dronelämpökuvaus	Luottamuksellisuus julkinen

Author(s) Sauli Paloniitty	Class RTA 2019 - 2020
Instructor(s) Hannu Turunen DI, Level-2	Number of pages and annexes 60
Title Airborne thermography, i.e. the use of unmanned aerial vehicles (UAV) in the building research	
<p>Airborne thermography, i.e. the use of unmanned aerial vehicles (UAV`s) has not yet been systematically used very much in the building research. This work focuses on the possibilities of the use of aerial thermal imaging in the study of buildings.</p> <p>This research focuses on finding the benefits of aerial thermography through field studies. The research work is divided into two subparts: Benefits of airborne thermography 1) in normal use, 2) in under- or over-pressure of a building. Here 12 various buildings or building complexes have been studied for this study. The sites also include research targets, that have undergone extensive condition surveys, in addition to airborne thermography. This ensures the veracity of the anomalies and findings and the extent and causes of the problems.</p> <p>Aerial thermal imaging, so-called drone-based thermal imaging enables thermography of buildings in a new way. Airborne thermography had significant benefits in solving the problems and significant findings were made by the scanning. Airborne thermography revealed insulation defects and moisture damages in the roof structures. By pressurizing the building, significant air leaks and quality deficiencies were also found in the new buildings as well.</p> <p>As the lack of the quality, installation defects were found, also due to installation negligence, as well as design errors. Airborne drone based thermography is a cost-effective and a fast way to find and to define the condition of roof structures and facades.</p>	
Keywords Airborne thermography	Confidentiality public

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	8
1.1.	Lämpökuvauksen perusteet	8
1.2.	Rakennusten lämpökuvaus yleisesti	9
1.3.	UAV toiminta	11
1.4.	Ilmalämpökuvaus yleisesti Suomessa	12
1.5.	Tutkimuksen tavoite	13
2.	TUTKIMUSMENETELMÄT JA TUTKIMUSKOHTEET	14
2.1.	Ilmalämpökuvaus.....	14
2.2.	VideoDrone lämpökuvauskalusto.....	15
2.3.	Matrice lämpökuvauskalusto	17
2.4.	Käsi­käyttöinen lämpökamera	19
2.5.	Ylipaineistuksen ja alipaineistuksen käyttäminen	20
2.6.	Olosuhdemittaukset	21
2.7.	Tutkimuskohteet	22
2.8.	UAV-kuvauksen ja perinteisen lämpökuvauksen vertailu	23
3.	TUTKIMUKSIEN TULOKSET RAKENNEOSITTAIN	24
3.1.	Massiivijulkisivujen ilmalämpökuvaus	24
3.2.	Muiden umpirakenteisten julkisivujen ilmalämpökuvaus.....	26
3.3.	Tuulettuvien julkisivujen ilmalämpökuvaus	35
3.4.	Vesikattojen ilmalämpökuvaus.....	36
3.5.	Yläpohjan tuuletuksen merkitys lämpökuvaukseen ja rakenteen toimintaan.....	39
3.6.	Vesikattokuvauksissa tehdyt muut havainnot.....	44
3.7.	Ylipaineistamisen ja alipaineistamisen käyttö ilmalämpökuvauksen apuna.....	46
4.	RAKENNUSFYSIKAALINEN TARKASTELU	51
5.	TUTKIMUSTEN TULOKSET YHTEENVETO.....	53
6.	LÄMPÖKUVIEN TULKINTA	56
7.	YHTEENVETO	58
8.	KIRJALLISUUSLUETTELO	60

ESIPUHE

Lämpökuvaus on ainetta rikkomaton menetelmä, jolla voidaan arvioida rakennusten, rakenteiden ja rakennusmateriaalien toimivuutta, laatua ja kuntoa. Sitä voidaan käyttää yhtenä tutkimusmenetelmänä sekä uudisrakennusten laadunvalvontamittauksissa että vanhojen rakennusten kuntotutkimuksissa. Jotta lämpökuvauksen tulokset ja niiden tulkinta olisivat luotettavia ja asianmukaisella tasolla, vaaditaan kuvaajalta ja kuvien tulkitsijalta sekä rakennusfysiikan ja rakenteiden että lämpökameran ja sen sovellusohjelmien riittävää tuntemista. Lisähaasteita lämpökuvaukseen tuovat energiatehokkuusvaatimusten aikaansaamat rakennusten lämmöneristyskyvyn ja ilmatiiviuden parantuminen. Myös monipuoliset talotekniset järjestelmät tuovat omat haasteensa. Nämä edellyttävät aikaisempaa parempaa kokonaisuuksien hallintaa rakenteiden ja järjestelmien yhteistoimintaa selvitetessä. (Paloniitty 2016)

Lopputyön aihe on hautunut kirjoittajan mielessä jo vuosia. Rakennusten lämpökuvauksesta on julkaistu tekijän kirjoittamana 3 eri julkaisua välillä 2000-2016. Varsinainen ulkolämpökuvaus on jäänyt melko pienelle huomiolle.

Tässä työssä käsitellään lämpökuvausta miehittämättömällä ilma-aluksella. Tavoitteena on selvittää, missä ja miten lämpökuvausta voidaan hyödyntää. Tässä työssä miehittämättömällä ilma-aluksella tarkoitetaan joko radio-ohjattavaa kopteria tai lennokkia. Työssä käsitellään hieman ilma-alusten tekniikkaa ja niiden muuttuvaa lainsäädäntöä sekä sivutaan myös niiden yleisimpiä käyttötarkoituksia.

Suomessa lämpökuvaus miehittämättömällä ilma-aluksella on vasta alkumetreillä. Työni tarkoituksena on saada itselleni tietämystä ilmalämpökuvauksesta ja tulevaisuudessa tuoda ilmalämpökuvaus myös omiin palveluihini.

Tämä tutkimustyö rajautuu rakennusten lämpökuvauksen käytölle ammattilaisten näkökulmasta. Työ on tarkoitettu ensisijaisesti kokeneille rakennusten lämpökuvaajille, kuten pätevoityneille lämpökuvaajille. Tässä työssä ei keskitytä lämpökuvauksen perusasioihin, vaan tämä on jatkumoa –Rakennusten lämpökuvaus 2016- julkaisulle.

MÄÄRITELMÄT

Emissiivisyys, emissiokerroin

Pinnan kyky lähettää lämpösäteilyä. Emissiivisyys kertoo, kuinka suuri osa kappaleen lähettämästä energiasta on pinnasta lähtevää omaa energiaa. Materiaalin pinnan emissiivisyys ilmoitetaan emissio-kertoimella. Materiaalien pinnan emissiokerroin on 0–1, ja se ilmoitetaan desimaalilukuna. Käytetty emissiokerroin on esitettävä mittausraportissa.

Lämpökamera

Lämpökamera on lämpösäteilyn vastaanotin. Se mittaa kuvauskohteen pinnasta lähtevän lämpösäteilyn – infrapunasäteilyn – voimakkuutta. Lämpökamera muuttaa kohteen lämpösäteilyvoimakkuuden lämpötilatiedoksi, josta lämpökuva muodostetaan digitaalisesti.

Lämpökameran erotteluherkkyys

Lämpökameran erotteluherkkyys (NETD = Noise Equivalent Temperature Difference) tarkoittaa kameran matriisi-ilmaisimen kykyä mitata lämpötilamuutosta. Mitä parempi erotteluherkkyys on, sitä herkemmin nähdään pintojen lämpötilamuutokset. Tyypillisesti lämpökameran erottelukyky on 0,15–0,02 °C.

Lämpökameran pikselierottelukyky

Pikselierottelukyky tai paikkaerottelukyky (IFOV) kertoo mikä on pienin yksityiskohta joka voidaan havaita kameran näkökentässä.. Siihen vaikuttaa lämpökameran optiikka eli linssin aukeamiskulma sekä kuvausetäisyys. Optiikka vaikuttaa yhden pikselin kokoon riippuen kuvausetäisyydestä. Mitä parempi paikkaerottelukyky sitä kauempaa tietty yksityiskohta voidaan havaita.

Lämpökameran resoluutio

Lämpökameran resoluutio tarkoittaa matriisi-ilmaisimessa olevien mittapisteiden määrää. Resoluutio vaihtelee kameroissa hyvin paljon. Heikoimmissa kameroissa resoluutio on 80x60, jolloin mittapisteiden määrä on 4800. Edistyneimmissä kameroissa resoluutio on tällä hetkellä 1024x762, jolloin mittapisteiden määrä on 786 432. Näin ollen lämpökuvan laatu ja siten myös lämpötilatarkkuus ovat hyvin erilaisia erilaisissa kameroissa.

Lämpötilaindeksi

Lämpötilaindeksillä voidaan arvioida rakennuksen vaipan lämpötekniistä toimivuutta. Vaipan pintalämpötiloja voidaan arvioida ja verrata toisiinsa lämpötilaindeksin prosenttilukuvarvolla.

Lämpövuodot eli kylmäsillat

Lämpövuodoksi kutsutaan sellaisia rakenteessa olevia kohtia, joissa lämmönjohtuminen on selvästi suurempaa ympäröivään rakenteeseen verrattuna. Lämpövuotoja aiheutuu niin sanotuista kylmäsilloista, kuten kantavista rakenteista tai eristepuutteista. Pelkkään lämpövuotoon ei liity ilmavuotoja eli rakenteen läpi kulkeutuvia konvektiovirtauksia. Ympäristöään selvästi matalammat pintalämpötilat voivat johtua kylmäsillojen aiheuttamasta lämpövuodosta, rakenteiden läpi kulkevasta ilmavirtauksesta tai näiden yhdistelmästä. Lämpövuoto on yleisnimike, jota ei pitäisi käyttää, vaan lämpövuodot luokitellaan joko *eristevioiksi* tai *kylmäsilloiksi*.

Ilmavuoto

Rakenteessa oleva rako tai reikä josta ilma pääsee virtaamaan paine-eron vaikutuksesta sisään tai ulos. Alipainetilanteessa ulkoilma virtaa sisäänpäin. Ylipainetilanteessa sisäilma virtaa ulospäin.

LYHENTEET

UAV

Unmanned Aerial Vehicle, radio-ohjattava lennokka jolla tehdään ennalta määrättyä lentotyötä.

Multikopteri

Monimoottorinen radio-ohjattava kopteri.

Octokopteri

Kahdeksan moottorinen radio-ohjattava kopteri.

RC-lennokka

Radio Controlled eli radio-ohjattava lennokka.

1. JOHDANTO

Rakennusten lämpökuvaus on ollut Suomessa käytössä aktiivisesti jo yli 20 vuoden ajan. Yleisesti rakennusten laadunvalvonta on keskittynyt sisäpuoliseen lämpökuvaukseen. Menetelmällä on perinteisesti tutkittu tilojen asumisviihtyvyyttä, ulkovaipparakenteiden lämpöteknistä toimintaa sekä paikannettu ilmavuotoja. Menetelmää on hyödynnetty myös kosteuskartoituksissa ja kuntotutkimuksissa. Rakennusten kuvauksissa ei perinteisesti ole käytetty rakennusten ulkopuolista lämpökuvausta. Tämä on johtunut osittain siitä, ettei lämpökameroiden resoluutio ja herkkyys ole olleet riittävän hyviä. Lisäksi avaruuden taustasäteilyn heijastus häiritsee lämpökuvan tulkintaa erityisesti alhaalta kuvattaessa sekä rakennusten tuulettuvat rakenteet hankaloittaa ulkokuvien tulkintaa.

Ilmalämpökuvausta, eli miehittämättömän ilma-aluksen käyttöä (UAV) rakennusten tutkimisessa ei ole vielä systemaattisesti käytetty. Ilmalämpökuvausta on käytetty satunnaisesti kaukolämpölinjojen lämpökuvaamisessa ja muissa vastaavissa projekteissa. Ilmalämpökuvauksesta on tehty myös kaksi opinnäytetyötä vuonna 2014 ja 2017 joissa tarkastellaan sen mahdollisuuksia erilaisissa pelastustehtävissä ja teollisuuden sovelluksissa (Keränen 2017 ja Taponen 2014). UAV ratkaisut ovat kehittyneet viime vuosien aikana merkittävästi ja nykyratkaisujen käytettävyys, turvallisuus ja luotettavuus mahdollistavat laitteistojen hyödyntämisen laajamittaisesti kaikenlaisissa tehtävissä ja ympäristöissä. Perinteisen ilmakuvauslaskennan lisäksi UAV ratkaisut ovat tätä päivää mitä moninaisemmissa ympäristöissä ja käyttötarkoituksille vain mielikuvitus on rajana.

1.1. Lämpökuvauksen perusteet

Lämpökuvauksessa tutkitaan kohteen lähettämää lämpösäteilyä eli infrapunasäteilyä. Kaikki kohteet joiden lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen (-273,15 C), säteilevät lämpösäteilyä. Lämpösäteily johtuu atomien ja molekyylien värähtelystä kappaleessa eli lämpöliikkeestä. Lämpökamera vastaanottaa infrapunasäteilyä, mittaa säteilyn voimakkuuden ja muuttaa sen lämpötilajakauman mukaiseksi kuvaksi. Lämpökameroita on kahdenlaisia, mittaavia ja ei-mittaavia. Ei-mittaavia lämpökameroita käytetään suurimmaksi osaksi etsintä- ja valvontatehtävissä, joissa ei tarvita tarkkaa lämpötilaa kohteesta. Mittaavia lämpökameroita käytetään esimerkiksi teollisuudessa, jossa tarvitaan tarkkaa lämpötilatietoa kohteesta. Lämpökamera ei tarvitse valoa toimiakseen, vaan sen toiminta perustuu kohteen infrapuna-

alueella emittoiman säteilyn mittaamiseen. Lämpökamerat toimivat 8-14 μm aallonpituusalueella. Lämpökameroilla pystytään mittaamaan parhaillaan -40 C asteen lämpötiloja. Tavallisesti lasi ei läpäise tai taita lämpösäteilyä, siksi optiikkamateriaalina käytetään usein hiilipinnoitettua germaniumia. Optiikkaa vaihtamalla saadaan erilaisia näkymäalueita lämpökameralle. Suurella polttovälillä saadaan lähempi kuva kohteesta ja pienellä polttovälillä taas kauempaa otettu kuva. Lämpökamerassa erottelukyvylle tarkoitetaan pienintä lämpötilaeroa, jonka se pystyy erottamaan. Nykyään laadukkaimpien lämpökameroiden erottelukyky on jopa $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lämpökameroita on ollut saatavilla kaupallisilla markkinoilla 1960-luvulta alkaen. Suomessa rakennusten lämpökuvauksista on tehty 1970-luvun lopulta lähtien. Aina 1980-luvun loppuun asti kuvausyksiköt olivat suuria ja painavia, mutta 1990-luvun lopusta lähtien lämpökameratekniikka on mennyt suurin harppauksin eteenpäin. Kameroiden parantunut erottelukyky, koko, paino, kuvankäsittelyominaisuudet sekä oheistuotteena saatavat kuvankäsittelyohjelmistot ja hinta ovat mahdollistaneet sen, että nykyisin lämpökuvauksista käytetään aikaisempaa yleisemmin rakennusten kuvauksessa. (Paloniitty 2016)

Lämpökameroiden kehityksen hyvä seuraus on kameroiden ominaisuuksien parantuminen sekä samanaikainen halventuminen. Toisaalta hintakilpailu kameramarkkinoilla on aiheuttanut sen, että kameravalmistajat ovat tuoneet markkinoille entistä heikommilla resoluutioilla varustettuja lämpökameroita. Kameroiden edullisuus on tuonut lämpökuvaukseen toimijoita, joilla ei ole asianmukaista lämpökameraa eikä myöskään riittävää ammattitaitoa. (Paloniitty 2016)

1.2. Rakennusten lämpökuvauksista yleisesti

Lämpökameralla voidaan selvittää rakennuksista hyvin monen tyyppisiä asioita: rakennusmateriaalien ominaisuuksia, rakennusten lämpöolosuhteita ja -viihtyvyyttä, vaipan ilmanpitävyyttä, rakenteiden lämpötekniistä toimivuutta, tietyn edellytyksin kosteus- ja homevaurioita sekä talotekniikan vikoja ja puutteita. Usein lämpökuvauksen yhteydessä joudutaan tekemään myös erityyppisiä tukimittauksia muilla menetelmillä.

Kun korjausrakentaminen sekä ihmisten asumisviihtyvyyteen kohdistuvat vaatimukset lisääntyvät, tulee entistä enemmän tarvetta tutkia rakennusten lämpöviihtyvyyttä ja rakenteiden kuntoa. Hinta tai paljain silmin nähtävät pinnat eivät ole enää ainoita tekijöitä, jotka vaikuttavat

omasta asunnosta haaveilevan ostopäätökseen. Entistä enemmän kiinnitetään huomiota myös talon rakenteellisiin ominaisuuksiin, kestävyYTEEN, lämmöneristyskykyyn, tiiviyteen ja energiankulutukseen sekä elinkaarikustannuksiin.

Tarve selvittää rakennuksen sisäilmasto-oloja ja rakenteiden pintalämpötiloja voi syntyä esimerkiksi seuraavista syistä:

- Asuinrakennuksen asukkaat valittavat vedontunteesta, kylmistä pintalämpötiloista tai liian viileistä sisälämpötiloista.
- Rakennuksien omistajat kiinnittävät huomiota rakennusten energiankulutukseen ja alkavat suunnitella lämpöteknistä korjausta.
- Rakennuksessa esiintyy muuten korjaustarvetta, jonka yhteydessä pyritään parantamaan myös rakennuksen lämpöteknistä toimivuutta.
- Rakennuksessa esiintyy kosteusvaurioita tai niihin viittaavia ilmiöitä.
- Teollisuus- ja toimistorakennuksissa kiinnitetään huomiota energiakustannusten osuuteen ja halutaan selvittää mahdollisuudet säästää kustannuksissa.
- Rakennuksen käyttäjät valittavat vedosta, kylmistä pinoista, ilmanvaihdon riittämättömyydestä tai sen tehokkuudesta jne.
- Uudisrakennuksen tai peruskorjatun rakennuksen lämpöteknisen toimivuuden laatu halutaan varmistaa.

Yleensä tarve tehdä lämpötekninen kuntotutkimus tai energiakatselmus johtuu siis:

- kiinnostuksesta energiakustannusten pienentämiseen
- käyttäjien valituksista ja/tai esiintyneistä vaurioista
- halusta selvittää rakennuksen ulkovaipan lämpötekninen toimivuus (uudistuotanto).

Rakennuksen lämpökuvauksessa sisältää perustapauksessa rakennuksen ulkovaipan sisäpuolisen ja ulkopuolisen lämpökuvauksen. Kuvauksesta pyritään etsimään rakennuksen ulkovaipan viat ja puutteet, vaipan ilmapuodot, lämmöneristeiden kunto ja toimivuus sekä kylmäsillat. Poikkeamat esitetään raportissa lämpökuvina ja digikuvina ja ongelmapaikat merkitään pohjapiirustuksiin. Muita lämpökuvauksen yhteydessä mitattavia asioita ovat muun muassa sisäilman ja ulkoilman olosuhteet: lämpötila, suhteellinen kosteus, sisäilman ja ulkoilman välinen paine-ero sekä aistinvaraiset havainnot. Lämpökuvauksen ja mainittujen tukimittausten avulla päästään selvälle rakennuksen vaipan kunnosta ja lämpöoloista. Samalla saadaan viitteitä sisäilman laadusta, ilmanvaihdon toimivuudesta ja mahdollisista muista käyttäjien viihtyvyyteen liittyvistä seikoista sekä voidaan esittää selkeitä johtopäätöksiä ja ehdotuksia jatkotoimenpiteiksi.

1.3. UAV toiminta

Puhuttaessa miehittämättömästä ilma-aluksesta eli UAV:sta, tarkoitetaan käytännössä jotakin radio-ohjattavaa lennokkia tai kopteria. Virallisesti UAV:lla tarkoitetaan lennokkia, jolla tehdään ennalta määrättyä lentotyötä. Yhdysvallat on kokeillut ensimmäisen kerran näitä jo I maailmansodan aikana. Nykypäivänä suurimpaan suosioon ovat nousseet multikopterit, joita voidaan hyödyntää monissa tarpeissa. Suosituimpia multikoptereita ovat quad- ja octokopterit. Multikopteri vastaa enemmän helikopteria, mutta siinä on useampia moottoreita. Esimerkiksi quadkopterissa on neljä moottoria kun taas octokopterissa on kahdeksan moottoria. Lennokki puolestaan vastaa normaalia lentokonetta, mutta pienemmässä koossa. Octokopteri on lento-ominaisuuksiltaan paljon stabiilimpi sekä turvallisempi kahdeksan moottorin ansiosta, kuin quadkopteri. Jos octokopterista sammuu ennalta arvaamattomasta syystä yksi moottori, se ei vaikuta lentoon juurikaan. Mikäli quadkopterista sammuu yksi moottori, sitä ei saada enää hallitusti laskettua alas. Multikopterin tekniikka on monimutkaisempi verrattuna tavallisen RC-lennokin tekniikkaan. Koptereissa käytetään harjattomia sähkömoottoreita hyvän hyötysuhteen ja käyttövarmuuden takaamiseksi. Multikopterien ohjaus perustuu radio-ohjauksen lisäksi GPS-paikannukseen ja gyro-stabiloituun toimintaan. (Taponen 2014)

UAV- koneiden käyttö on lisääntynyt yleisesti kaikilla osa-alueilla. Multikoptereiden pääasiallinen käyttö on ilmakuvauksessa. Ilmakuvaus voidaan jakaa kahteen osaan, video- tai valokuvaukseen. Ilmakuvausta voidaan hyödyntää muun muassa erilaisten tapahtumien ja kiinteistöjen kuvaamisessa, sekä esimerkiksi rakennussuunnittelussa. Myös myrskytuhojen kartoittamisessa, metsä- ja maanviljelyn seurannassa voidaan hyödyntää ilmavalokuvia. Ilmasta kuvattua videokuvaa voidaan taas hyödyntää musiikki-, televisio- ja elokuvatuotannossa. Korkeiden mastojen, tuulimyllyjen ja rakennusten kuntotarkastukseen voidaan hyödyntää molempia kuvausmuotoja. Ilmakuvausta voidaan hyödyntää myös pelastustehtävissä. Tästä esimerkkinä ilmakuvauksen hyödyntäminen Laukaan ruutitehtaan räjähdysvaaratilanteessa.. Uusimpia käyttötarkoituksia multikoptereilla ovat laserkeilaus sekä tulevaisuudessa pakettien kuljettaminen. RC -lennokin käyttö ei ole yhtä suosittua kuin koptereiden, koska niiden käyttötarkoitukset ovat huomattavasti pienemmät sekä lennokki vaatii isomman tilan lentoonlähtöön. Osaa kopterilla tehtävistä ilmakuvauksista voidaan myös toteuttaa lennokilla, esim. luonnon seuranta. Lennokkia käytetään pääosin laajamittaisempiin ilmakuvaustehtäviin, esimerkiksi kartoituksessa ortokuvauksiin tai laajamittaisiin etsintätehtäviin. (Taponen 2014)

UAV -toiminnan suurimpina ongelmina on tällä hetkellä lainsäädäntö. Tällä hetkellä laissa on määrätty, että lentokorkeus pitää olla alle 150 metriä ja lentoetäisyys saa olla maksimissaan 500 metriä ja näköyhteys puolestaan jatkuvasti koneeseen. Miehitämättömän ilma-aluksen on kyettävä väistämään kaikkia muita ilma-aluksia eikä lennättäminen ole sallittua tiheästi asuttujen asuinalueiden yläpuolella. Valvotussa ilmatilassa lennättäessä asiasta on sovittava ja kommunikoidava erikseen aluelennonjohdon kanssa.

1.4. Ilmalämpökuvaus yleisesti Suomessa

Lämpökuvaus ilmasta on varsin haluttu ja kasvava palvelu tulevina vuosina myös meillä Suomessa. Tietävästi Suomessa on tällä hetkellä muutama lämpökuvaukseen erikoistunut ilmakuvaustryitys. Tehtyänä taustatutkimusta, heidän käyttökohteitaan ovat olleet kaukolämpöputkien vuotokohtien kartoittaminen, sähkölinjojen liitosten ja komponenttien ylikuumentuminen, sähköjakelukeskukset, korkeat rakennukset ja rakennusten kattojen eristyksien tarkastaminen. Myös ihmisten etsintä, palopesäkkeiden paikantaminen palopaikalta ja erilaisten prosessien tarkkailu ovat olleet kohteina. Tulevaisuudessa kuvattavia kohteita voisivat olla myös tuulivoimaloiden lapojen lämmittimet sekä aurinkopaneelit.

UAV ratkaisut ovat kehittyneet viime vuosien aikana merkittävästi ja nykyratkaisujen käytettävyys, turvallisuus ja luotettavuus mahdollistavat laitteistojen hyödyntämisen laajamittaisesti kaikenlaisissa tehtävissä ja ympäristöissä. Perinteisen ilmakuvauksen lisäksi UAV ratkaisut ovat tätä päivää mitä moninaisemmissa ympäristöissä ja käyttötarkoituksille vain mielikuvitus on rajana. UAV kuvausta voidaan käyttää seuraavissa käyttötarkoituksissa:

TUTKIMUS & TARKASTUS

- Siltarakenteet
- Rakenteet & kiinteistöt
- Sähköverkot
- Putkilinjat
- Rautatie- ja liikenneverkosto
- Vesi- ja tuulivoimalat
- Kaukolämpöverkot

ETSINTÄ & PELASTUS

- Henkilöetsintä
- Etsintäalueen kartoitukset
- Tilannetarkkailu & ohjaus
- Etäseuranta & monitorointi
- Meripelastus

- Onnettomuustutkinta

TURVALLISUUS

- Häätävastepalvelut
- Kiinteistöjen turvallisuus
- Seuranta
- Kartoitustehtävät
- Yleisötilaisuudet
- Vartiointipalvelut

MARINE

- Kartoituspalvelut
- Meteorologia
- Meritutkimus
- Hydrografia
- Tilannekartoitukset

KARTOITUS

- Rakennuskartoitus
- Maastokartoitukset
- Jääkartoitukset
- Maatalous
- Eläinkanta tutkimukset

HUMANITÄÄRISET

- Katastrofitutkimus & apu
- Turvallisuus & seuranta
- Aluekartoitukset
- Tilanneseuranta

VALTIO & VIRANOMAISET

- Poliisi & Palokunta
- Rajavartiolaitos
- Puolustusvoimat
- Onnettomuustutkinta
- Tarkkailu & Seuranta

1.5. Tutkimuksen tavoite

Työssä keskitytään selvittämään ilmalämpökuvauksen käyttömahdollisuuksia rakennusten kuvaamisessa. Hanke on käynnistynyt vuoden 2019 alussa ja kestää kevääseen 2020.

Tutkimustyö jakaantuu kahteen osakokonaisuuteen; Ilmalämpökuvauksen hyödyt: 1) normaalissa käyttötilanteessa, 2) rakennuksen ali- tai ylipainetilanteessa. Työ sisältää 12 erilaisen rakennuksen tai rakennuskokonaisuuden tutkimisen ilmalämpökuvauksella yhdistettynä sisäpuoliseen lämpökuvaukseen.

2. TUTKIMUSMENETELMÄT JA TUTKIMUSKOHTEET

2.1. Ilmalämpökuvaus

Rakennusten julkisivujen ja vesikattojen lämpökuvauksissa on tärkeää päästä tarpeeksi korkealle lämpökuvaamaan siten, että kohde pystytään lämpökuvaamaan kohtisuoraan, ja näin eliminoimaan jyrkkien kuvauskulmien aiheuttamat epätarkkuustekijät. Lämpökamerakopterilla päästään helposti ja nopeasti oikealle korkeudelle / etäisyydelle lämpökuvaamaan. Näin ollen ilmalämpökuvaus voidaan tehdä nopeasti, luotettavasti ja tarkasti, ilman jyrkkien kuvauskulmien aiheuttamia haittoja.

Käsi­käyttöisellä lämpökameralla suoritettujen vesikattojen ja korkeampien rakennuksien lämpökuvaus edellyttää, että käytössä on henkilönostin / nosturi. Kuvattaessa lämpökamerakopterista käsin vältetään tarve hidaskäyttöisille ja useissa paikoissa hankalasti operoitavien nostureiden käyttämiselle. Lämpökuvauskopterilla pääsee vaikeisiin paikkoihin kuvaamaan, joihin kiipeäminen olisi vaarallista, ja oikean kuvauskulman löytäminen nosturista, tai maasta käsin olisi mahdotonta.

Jokaisessa kohteessa, tehtiin lämpökuvauksen lisäksi olosuhdemittauksia kuten: sisäilman lämpötilojen mittauksia, suhteellinen kosteuden mittauksia, paine-ero mittauksia, ulkoilman lämpötilan mittaukset, pilvisyyden arviointi. Myös sään vaihtelut otettiin myös huomioon. Kolmessa kohteessa tutkittiin sisäilman olosuhteita tallentavalla mittalaitteella viikon ajan. Viiteen eri kohteeseen tehtiin lisäksi tiiveysmittaukset ja selvitettiin kohteiden ilmapuotoluvut. Kolmeen eri kohteeseen tehtiin lisäksi tehostettu ylipaine tutkimuksen ajaksi.

Tutkimuksissa käytettiin kolmea eri lämpökuvauskalustoa. UAV lämpökuvauksessa käytettiin kahden eri laitevalmistajan laitteistoja. Tutkimuslaitteistoilla testattiin niiden toimintaa ja tuloksia vertailtiin keskenään.

Kuvauskopterit olivat hyvin saman tyyppiset käytöltään. Kiinnostavinta oli vertailla lämpökameroiden käyttöä ja niiden antamaan kuvan laatua.

Taulukko 1. Tutkimuksissa käytettyjen lämpökameroiden tekniset ominaisuudet.

Drone lämpökamerat	Wiris 640	Matrice
Resoluutio		
Kuva	640x512	640x512
Video	640x512	336x256
Erottelukyky	0,03C	0,05C
Mittausalue	-40...+550C	-40...+550C
Mittausaallon pituus	?	7.5-13.5µm

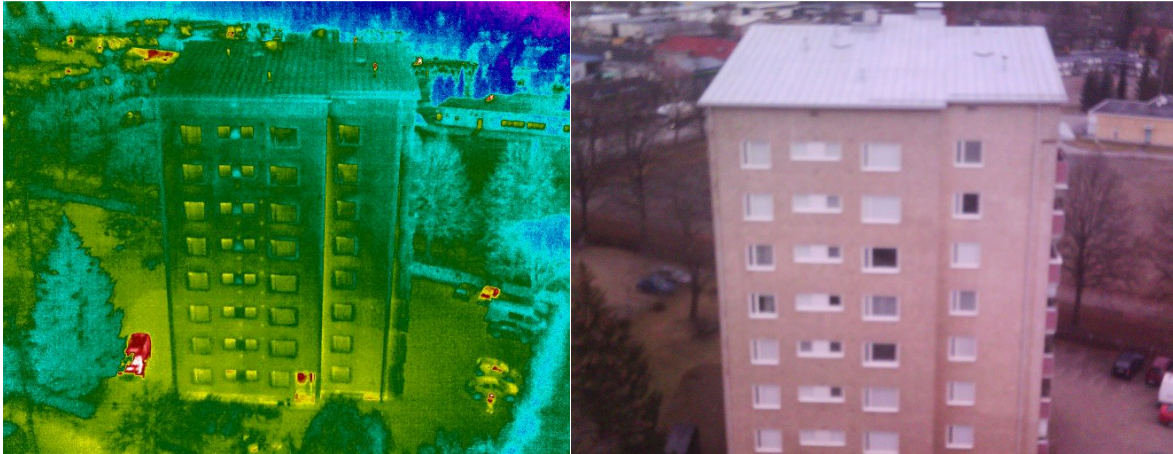
2.2. VideoDrone lämpökuvauskalusto

Pääosa tutkimuksista tehtiin Suomessa valmistetulla VideoDrone® X4S kuvauskopterilla joka on kehitetty erityisesti ammattikäyttöön.

Kopteri oli varustettu lämpökameralla, jonka resoluutio vastaa kehityksen kärkeä. Lämpökamerana oli BG WIRIS Workswell WIRIS 640 lämpökamera. Lämpökamera on Italialainen, jossa on Flirin valmistama detektori. Lämpökameraa hallitaan radio-ohjauksella lennon aikana. Sillä voidaan tallentaa kuva tai käynnistää ja sammuttaa video, sekä hallita kameran ominaisuuksia.



Kuva 1. Lämpökuvauskopteri: VideoDrone® X4S varustettuna Workswell WIRIS 640 lämpökameralla.



Kuvat 2. VideoDronen Wiris lämpökameran ottama lämpökuvakuva ja siihen kytketyn digikameran ottama valokuva.



Kuva 3. VideoDronen erillisen digikameran ottama kuva vastaavasta julkisivusta kuin kuva 2.

VideoDronessa oleva wiris lämpökamera tuottaa tarkkaresoluutioista lämpökuvaa. Lämpökameraan kytketty digikamera vastaavasti ottaa melko heikkolaatuisen digikuvan. Toisaalta kuvan tiedostokoko ei näin ollen kasva kovin suureksi ja kuvien käsittely on nopeaa. Kuvasta saa kuitenkin selvää mistä kuva on otettu.

Videodroneen erillisenä kamerana kytkettävä järjestelmäkamera, vastaavasti ottaa erittäin tarkkaa ja hyvää laatuista kuvaa. Kuvan tiedostokoko on niin suuri, että kuvaa joutuu pakkaamaan esim. raportointia varten.



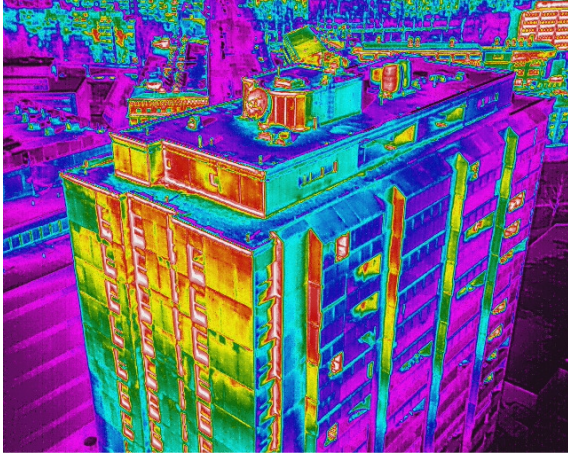
Kuva 4. Videodrone järjestelmäkameralla saadaan myös laadukkaita kuvia. Kuva on Hämeenlinnan parolantieltä keskustaän päin otettu.

2.3. Matrice lämpökuvauskalusto

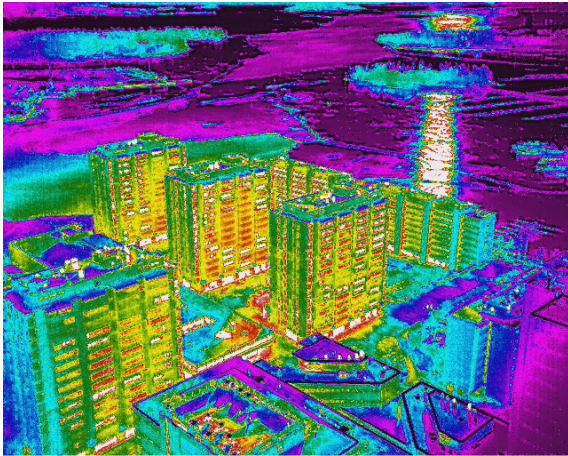
Tutkimuksissa käytettiin vertailuna myös toisen laitevalmistajan kuvauskoopteria ja lämpökameraa. Laitteiston tyyppi on: Matrice M210 RTK.



Kuva 5. Lämpökuvauskoopteri: Matrice M210 RTK varustettuna lämpökameralla,



Kuvat 6. Matrice lämpökameran ja digikameran kuvan resoluutio ja tarkkuus on optimoitu ja valokuvan koko on hieman lämpökameran kokoa suurempi, joka helpottaa kuvauspaikan havainnointia.



Kuvat 7. Matrice järjestelmällä saadaan näyttäviä kuvia. Kuva on Helsingin Merihaan asuinkorttelista.

2.5. Ylipaineistuksen ja alipaineistuksen käyttäminen

Tiiveysmittauslaitteistoja käytettiin tutkimusten apuna rakennuksen alipaineistamiseen ja ylipaineistamiseen lämpökuvauksien aikana.

Rakennuskokonaisuudet (3 kpl) paineistettiin vuoroin ylipaineiseksi tai alipaineiseksi Retrotec 6000 sarjan tiiveysmittauslaitteistoilla. Osaan rakennuksista (5kpl) tehtiin myös tiiveysmittaus ilmavuotoluvun määrittämiseksi.



Kuvat 10. Tiiveysmittauslaitteistot työmaalle menossa ja oveen asennettuna, paineistus käynnissä. Rakennus on suuri jolloin tiiveysmittauslaitteita on 4kpl.

2.6. Olosuhdemittaukset

Sisäilman olosuhteiden mittaamisessa käytettiin erilaisia mittalaitteita ja tallentavia monitoimiloggereita. Kaikissa kohteissa mitattiin vähintään ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä tuulisuus ja pilvisuus. Sään vaihteluita seurattiin sää-asemien antamista tiedoista. Sisäilmasta mitattiin vähintään lämpötila.

Osassa kohteissa tehtiin sisäilman olosuhteiden seuranta tallentavilla loggereilla. Sisäilman olosuhdeseuranta tehtiin kotimaisen ENVIC Oy:n valmistaman Multisens-dataloggerin avulla. Dataloggerit mittaavat seuraavia parametreja: paine-eroa, lämpötilaa, ilman suhteellista kosteutta, hiilidioksidipitoisuutta sekä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden määrää eli TVOC-pitoisuutta. Mittausjakso oli pisimmillään viikon. Mittausdata analysoitiin ja erityisesti kiinnostavaa oli seurata paine-eron käyttäytymistä ja sen vaikutusta lämpökuvaukseen. Tässä työssä keskitytään vain lämpökuvauksen näkökulmasta analysoimaan ja esittämään tuloksia.



Kuva 11. Sisäilmaloggerit pöydällä 3kpl.

2.7. Tutkimuskohteet

Selvitystyöhön valikoitui erilaisia ja eri-ikäisiä rakennuksia ja rakennuskokonaisuuksia. Vanhimmat kohteet olivat rakennettu 1880-luvulla ja uusimmat 2019-luvulla. Tavoitteena tutkimuskohteiden valikointiin, oli saada mahdollisimman monipuolisesti erilaisia ja eri-ikäisiä rakenteita.

Taulukko 2. Tutkimuskohteiden yhteenveto.

Rakennus- vuosi	Kohde	US / YP rakenne	Peruskorjaus- vuosi	Ilmanvaihto- järjestelmä
1880	Asuinkerrostalo 4 krs	Massiivitiili / Betoni	2010	T-P + LTO
1910	Kaupungintalo	Massiivitiili / Puu	IV 2010	T-P + LTO
1913	Asuinkerrostalo 5krs	Massiivitiili / Betoni		Painovoimainen
1940	Omakotitalo	Hirsi / Puu	1990	Painovoimainen
1960	Asuinkerrostalo	Betonivalu / Betonivalu		Poisto
1970	Rivitalo 4 taloa	Puu / Puu		Seka
1978	Asuinkerrostalo 14krs	Betonielementti/Betoni	IV 2018	T-P + LTO
1979	Asuinkerrostalo 8krs	Betonielementti/Betoni		Poisto
1980	Asuinkerrostalo 8krs	Betonielementti/Betoni		Poisto
1990	Toimistokerrostalo 8krs	Betonielementti/Betoni	2019	T-P + LTO
2010	Uimahalli	Puuelementti/Puu		T-P + LTO
2018	Kauppakeskus 1-2 krs	Peltikasetti/Puu		T-P + LTO
2019	Teollisuushalli	Peltikasetti/Peltikasetti		T-P + LTO

Vanhimmat tutkimuskohteet (3kpl) olivat massiivitiilirunkoisia, joita edustavat sen ajan tyypillistä rakentamista. Kohteista 4kpl olivat vanhemman aikakauden betonielementtirakenteisia ja 2kpl oli uudempia, paremmilla erityksillä toteutettuja betonielementtikohteita. Puurakentamista edusti 1940-luvun hirsitalo, 1970-luvun rivitalo sekä 2010 uimahalli. Lisäksi kahdessa kohteessa oli käytetty peltikasettia.

2.8. UAV-kuvauksen ja perinteisen lämpökuvauksen vertailu

Ilmalämpökuvauksen hyötyjä arvioitiin 5 eri kriteerillä jokaisessa tutkimuskohteessa. Käytetyt arviointikriteerit ovat:

- A. aikasäästö joka sisältää tutkimukseen käytetty aika suhteessa perinteiseen lämpökuvaukseen,
- B. kustannussäästö jolla arvioidaan tutkimukseen käytettyjen apuvälineiden kuten henkilönostimien ja muiden kulujen vaikutusta,
- C. työturvallisuuden parantuminen suhteessa perinteiseen lämpökuvaukseen,
- D. havainnoin selkeys jolla arvioidaan miten selkeästi havainto paikallistetaan suhteessa perinteiseen lämpökuvaukseen,
- E. muiden tutkimustarpeiden poistuminen.

Arviointiasteikkona on käytetty numeroarvosanoja 0-5. Arviointiasteikkoa on käytetty esimerkiksi seuraavilla arvosteluilla:

5 = vika havaittavissa vain UAV-kuvauksella,

4 = vika havaitaan UAV:n avulla selkeästi varmemmin kuin perinteisellä kuvauksella

3 = UAV:n avulla vikakohta havaittiin

2 = UAV kuvauksella vika voidaan havaita mutta se ei ole selkeä havainto

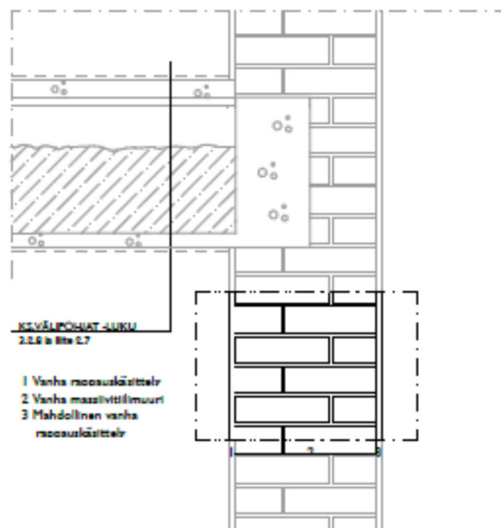
1 = Vikaa ei havaita UAV kuvauksella

0 = UAV kuvausta ei voida käyttää ollenkaan.

3. TUTKIMUKSIEN TULOKSET RAKENNEOSITTAIN

3.1. Massiivijulkisivujen ilmalämpökuvaus

Yksiaineiset massiiviset ulkoseinärakenteet ovat lämpötekniisesti helpoimpia lämpökuvattavia. Rakenteen lämpötilajakauma jakautuu tasaisesti lämmönvastuksen suhteessa koko rakenteen matkalla. Massiivirakenteet ovat yleensä myös kohtalaisen heikkoja eristykseltään. Pintavastuksen ollessa merkittävämpi suhteessa koko rakenteen lämmönvastukseen, silloin pintojen lämpötilamuutokset ovat selvemmin havaittavissa. Rakenteessa ei ole myöskään tuulettuvia osia, jotka haittaisivat lämpökuvausta. Kuvassa 12 on esitettyä tyypillinen rakenneleikkaus massiivitiilijulkisivun ja kotelovälipohjan liitoksesta.



Muurattu massiiviseinä on tehty poltetuista savitiilistä, kalkkihiekkakivistä tai muista muurauskappaleista (kevytbetoni- tai kevytsorabetoniharkoista).

Massiivisissa ulkoseinärakenteissa esiintyy hyvin harvoin diffuusion vuoksi rakenteisiin tiivistyvää kosteutta. Massiivisilla ulkoseinärakenteilla on yleensä hyvin suuri kosteudensitomiskyky. Viistosade voi imeytyä syvälle seinärakenteen sisään aiheuttamatta vauriota, sillä lämpötila- ja kosteusolosuhteiden ollessa kuivumiselle suotuisat kosteus poistuu seinän sisästä aiheuttamatta vauriota. Massiivisten ulkoseinärakenteiden halkeilun rajoittamiseen tulee kiinnittää huomiota paikallisten ilmapuottojen ja sadevesipuottojen estämiseksi. (Pentti et al., 1999).

Kuva 12. Rakenneleikkaus tyypillisestä massiivijulkisivun ja kotelovälipohjan liitoksesta. (Lähde: *Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakenteiden korjaus- opas YM 2019-18*)

Kuvassa 13 on esitettyä 1913 rakennetun asuinkerrostalon julkisivun lämpökuva ja valokuva. Lämpökuvassa havaitaan hyvin tasainen lämpötilajakauma. Ikkunoiden lämpöhäviöt ovat kohteessa suurimmat. Kohteessa on 3-lasiset ikkunat joiden eristyskyky on ulkoseinään verrattuna selkeästi huonompi. Ulkoseinän U-arvo vaihtelee yleisesti kyseisissä rakenteissa tasolla 0,5-0,8 W/m²K. Julkisivussa havaitaan lämpökuvasta erottuvana koristerappaukset sekä joitakin yksittäisiä läikkiä joissa on kylmäsilta. Julkisivurappauksessa ei ole havaittavissa lämpökuvauksessa rappausvaurioita.



Kuvat 13. 1913 rakennetun asuinkerrostalon julkisivun lämpökuva ja valokuva. Kohteessa ei havaittu vaurioita tai eristevikoja.

Kuvan 13 kohteessa tehtiin kuntotutkimuksina yläpohjan ja vesikaton toimintaan liittyvät kuntotutkimukset. Tutkimuksissa havaittiin, että rakennuksen ullakon tuuletusta oli parannettu, jonka seurauksena olosuhteet olivat muuttuneet mikrobikasvustolle otollisiksi. Myös energian kulutus oli lisääntynyt voimakkaasti. Aiheesta on kerrottu tarkemmin kappaleessa 3.4 Vesikattojen lämpökuvaus.

Kuvassa 14 havaitaan selkeästi tiilet ja saumat sekä lievää lämpötilavaihteluita julkisivun pinnassa. Kohteessa annettiin auringon paistaa tunnin ajan julkisivuun ennen lämpökuvausta, mahdollisen tiilen rapautuman selvittämiseksi. Kuvauksessa ei pystytty kuitenkaan luotettavasti arvioimaan mahdollisia pakkasvaurioita.



Kuvat 14. Massiivitiili julkisivun lämpökuva ja valokuva. Kohteessa ei havaittu vaurioita tai eristevikoja. Kuvassa näkyy auringon aiheuttamaa lämpöjälkeä.

Lämpökuvaus soveltuu hyvin massiivitiilijulkisivujen lämpökuvaukseen ja sillä voidaan havaita selkeät kylmäsillat, eristeviat ja kosteusvauriot. (Paloniitty 2016)

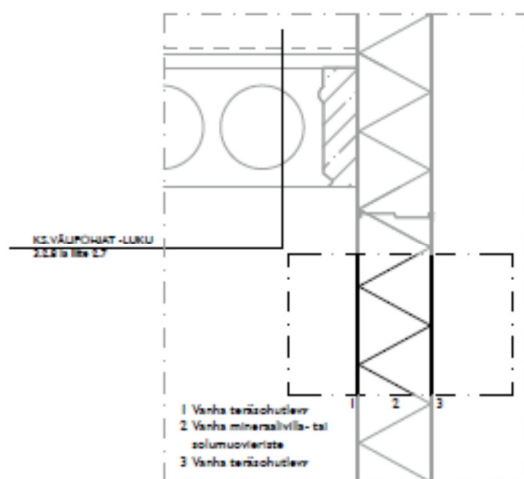
UAV lämpökuvaus antaa paremmat ja tehokkaammat mahdollisuudet myös massiivijulkisivujen lämpökuvaukseen.

Rapattujen julkisivujen kuntotutkimuksessa, lämpökuvaus edellyttää vielä laajempaa tutkimista ja testaamista. Timo Kauppisen kokemuksen mukaan keski-Euroopassa tehdyissä rappausjulkisivuissa on saatu lämpökuvauksella esiin rappauksen vaurioita, erityisesti silloin kuin ulkoilman olosuhteissa tapahtuu muutoksia, esim. silloin kun julkisivuun paistavan auringon vaikutus alkaa tai loppuu.

3.2. Muiden umpirakenteisten julkisivujen ilmalämpökuvaus

Muita tuulettumattomia ulkoseinärakenteita on monen tyyppisiä. Yleisimmät eri aikakauden, tuulettumattomat tai hyvin heikosti tuulettuvat rakenteet, ovat mm.:

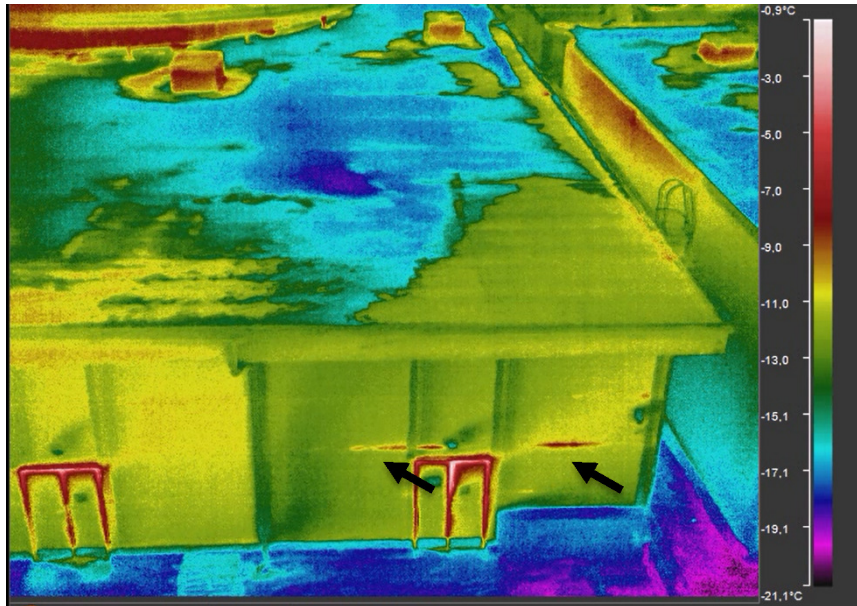
- Peltikasettiseinät joissa, rakenne on pelti-eriste-pelti eristeenä, voi olla mineraalivillaa tai polyuretaania. Peltikasettiseiniä on käytetty yleisesti 1980-luvulta tähän päivään.
- Eristetyt vanhat tiilirakenteet joissa, rakenne voi olla tiili-eriste-tiili, tai tiili-eriste-betoni joita, on käytetty 1950-luvulta asti ja niiden rakentaminen tuulettumattomana on vähentynyt 1990-luvulla.
- Eristetyt betonirakenteet joissa, rakenne voi olla betoni-eriste-betoni. Tämä edustaa tyyppillistä betonielementtiaikakautta 1960-1980 luvuilla.
- Hirsirakennukset eri versioineen, joissa voi olla lisäeristyksiä sekä sisäpuolella että/taik ulkopuolella. Hirsirakenteet olivat yleisimpi ennen 1940-lukua, mutta niitä tehdään koko ajan enenemässä määrin uusiakin.



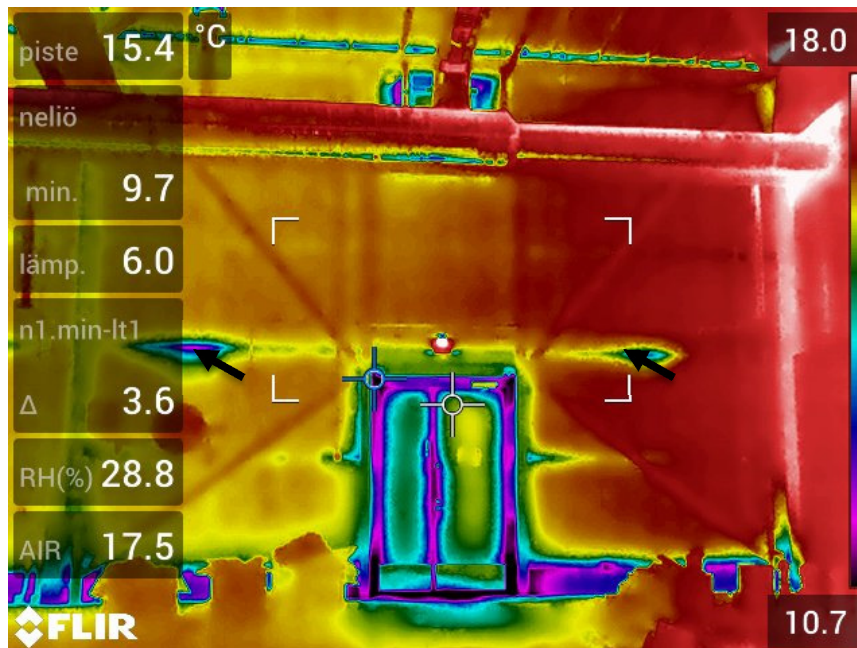
Ulkoseinärakenteena voi olla käytetty myös pelti-lämmön-eriste-pelti-rakennetta eli teräspintaisia sandwich-elementtejä. Ulkoseinärakenteissa vuotokohta syntyy tyyppillisesti rakenteen saumakohtiin, sillä elementtien saumatiiviste voi rikkoontua alla olevan metallipinnan lämpötilamuutoksista johtuvien muodonmuutosten ja liikkeiden vuoksi. Tyyppillisesti rakenteen vesivuotoja on pyritty tilkitsemään erilaisin elastisin tiivistysmassoin tehdyin saumauksin, mutta myös nämä saumat halkeavat lämpötilamuutoksista johtuvien pakkoliikkeiden vuoksi.

Kuva 15. Rakenneleikkaus tyyppisestä pelti-eriste-pelti ulkoseinän ja ontelolaattavälipohjan rakenneliitoksesta. (Lähde: Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakenteiden korjaus- opas YM 2019-18)

Kuvasta 16 havaitaan selkeästi pelti-polyuretaani-pelti ulkoseinän sauman ilmavuoto. Kohde on uudiskohde johon on tutkimusta varten tehty +30Pa ylipaine erillisellä tiiveysmittauspuhaltimella. Saumavuodot varmistettiin sisäpuolisella lämpökuvauksella ja alipaineistuksella kuva 17. Rakennuksen ilmavuotoluku oli $q_{50} 2,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Rakennukseen jouduttiin teettämään tiivistyskorjauksia takuuajan puitteissa.



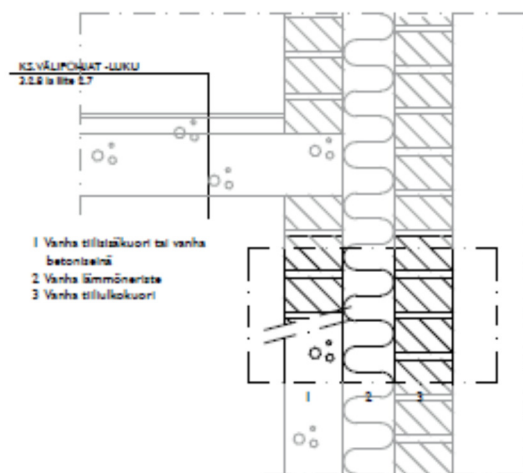
Kuva 16. 2019 rakennetun pelti-uretaani-pelti ulkoseinän sauman ilmavuoto havaitaan selkeästi kun rakennus on ylipaineistettuna +30Pa. Katolla havaitaan sulavaa lunta.



Kuva 17. kuvan 16 kohta sisäpuolelta kuvattuna -30Pa alipainetilanteessa.

Umpinaisissa peltikasettiseinissä havaitaan hyvin eri paine-erotilanteissa ilmavuodot sekä UAV lämpökuvauksella että perinteisellä lämpökuvauksella. UAV lämpökuvauus mahdollistaa nopeasti ison ja korkean rakennuksen kuvauksen, edellyttäen rakennukseen vallitsevan ylipaineen.

Eristetyt vanhat tiilirakenteet, joissa rakenne voi olla tiili-eriste-tiili tai tiili-eriste-betoni, ovat tyypillisiä 1950-1090 –lukujen rakenteita. Rakenteet ovat yleisesti toteutettu tuulettumattomina tai heikosti tuulettuvina. Niiden lämpökuvauus on myös rakennusfysikaalisesti luotettavaa puuttuvan ilmaraon tai tuulettumattoman ilmaraon takia. Julkisivussa voi olla rappauspinta tai se voi olla puhtaaksi muurattua sekä se voi olla betonipintainen. Myös tiililaatta ja klinkkeri voi olla julkisivuna. Klinkkeripintaisissa julkisivuissa tulee huomioida mahdollisen lasituksen aiheuttama tasoheijastus lämpökuvauksessa.



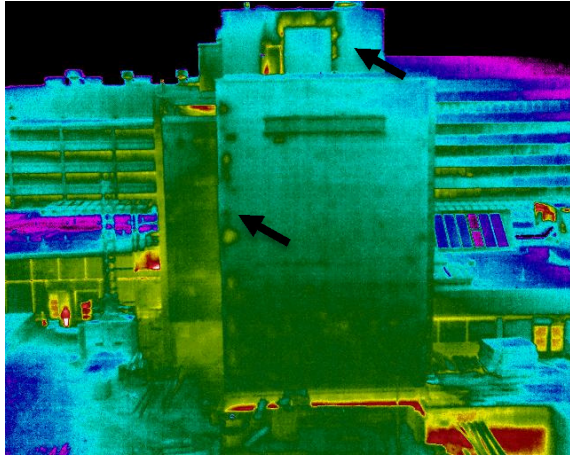
Tiiliverhotuissa ulkoseinärakenteissa ei ennen 1980-lukua ole käytetty tuuletusväliä julkisivuverhouksen takana. Rakenteen kuivuminen sateen jälkeen on hyvin hidasta tuuletusvälin puuttumisen vuoksi. Tuulettumattomissa tiili-villa-tiili/betoni-rakenteisissa seinissä on tyypillisesti käytetty lämmöneristeenä mineraalivillaa. Ikkunoiden apukarmit sijaitsevat myös tyypillisesti mineraalivillakerroksessa.

Kun viistosade on niin voimakas ja pitkäaikainen, että tiiliverhoukset ei kykene enää imemään kaikkea vettä itseensä, syntyy tiiliverhouksen pintaan tuulen ja gravitaation vaikutuksesta liikkuva vesikalvo. Sadetta voi ohjautua julkisivun epätiiviykskohdista rakenteen sisään. Tiili-villa-tiili/betonirakenteen heikosta kuivumiskyvystä johtuen ulkokuoren saumoista ja ikkunaliittymistä kulkeutuneet vuotovedet ovat tyypillisesti aiheuttaneet kosteus- ja mikrobivaurioita lämmöneristeisiin, ikkunan apukarmeihin ja tilkkeisiin sekä ikkunan karmirakenteisiin.

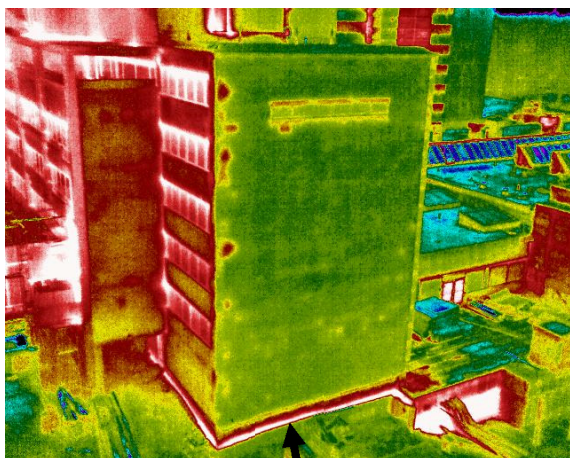
Ilman tuuletusväliä toteutetuissa tiili-villa-tiili/betoniseinissä seinän alaosa ei ole avoin, jolloin ulkokuoren taustapinnalla alaspäin valuva vesi jää pitkäksi aikaa kostuttamaan lämmöneriste-, runko- ja sokkelirakenteita.

Tyypillisesti rakenteen ilmanpitävyys on ollut heikko johtuen epätiiviyksistä ikkuna- ja oviliittymistä. Lisäksi puhtaaksi muurattujen tiilisiäkuoren saumojen ilmanpitävyys on tyypillisesti heikko.

Kuva 18. Rakenneleikkaus tiili-villa-tiili ulkoseinän ja välipohjan liitoksesta.



Kuvasarja 19. Lämpökuvasta havaitaan tiilijulkisivun vasemmassa nurkassa eristevirheitä..

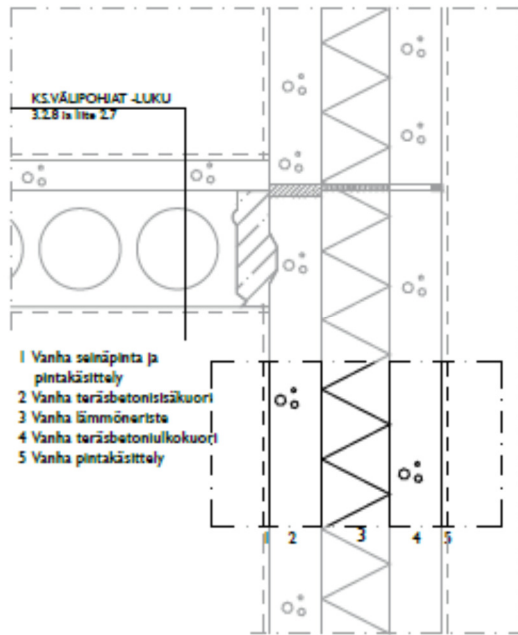


Kuvasarja 20. Lämpökuvasta havaitaan sokkeli selkeästi muuta rakennettä lämpimämpänä.

Kuvasarjassa 19-20 havaitaan korkean toimistokerrostalon päätyseinässä eristevirheitä. Kohteessa ei ole tehostettua paine-eroa, vaan kuvaus on tehty normaalissa käyttöympäristössä. Lisäksi kuvasta havaitaan iv-konehuoneen oven lämpövuodot. Eri kuvauskulmia käyttämällä saadaan poikkeamiin varmuus ja siten heijastuksen mahdollisuus poistettua. Lämpökuvista havaitaan myös sokkelirakenteen lämpövuodot.

Sokkeleissa on hyvin tyypillistä maan pinnan yläpuolella olevan lämpimämpi vyöhyke. Sokkeli toimii lämmönjohtimena lämpimästä maaperästä sekä niissä on myös yleisesti heikompi eristys. Erityisesti vanhemmassa rakennuskannassa sokkeleissa ei ole sokkelihalkaisua.

Tiili-villa-tiili rakenteissa havaitaan myös helposti kosteuden aiheuttamia lämpötilamuutoksia. Viistosateen rasittamana rakennuksen nurkat ovat usein sateen jälkeen kastuneet.



Betonisandwich-elementtien korjaustarpeet liittyvät yleensä julkisivun korrosio- ja pakkasrapautumavaurioihin, joita ei käsitellä tässä oppaassa. Betonisandwich-elementtien lämmöneristetila ei tutkimusten (Pessi et al., 1999) mukaan ole suotuisa kasvualusta mikrobeille. Elementtien eristetilaa syntyy mikrobivaurio lähinnä silloin, kun ulkokuoren vesitiiviydessä on erittäin merkittäviä puutteita, esimerkiksi elementtien väliset vuotavat saumat ja liittymärakenteet. Purkukorjaus mikrobivaurion poistossa poistaa vauriot aina, mutta se voi olla ylimitoitettu korjaus julkisivun muuhun vauriotilanteeseen (korrosio, pakkasrapautuma) nähden.

Rakennuksen sisäilman kannalta betonisandwich-elementtiseinissä ongelmakohtia ovat tyypillisesti elementtien väliset liitokset, joiden kautta rakenteissa olevat epäpuhtaudet voivat kulkeutua ilmavirtausten mukana sisäilmaan. Tällaisia kohtia ovat muun muassa puutteellisesti toteutetut, erityisesti vaakasaumojen juotosvalut sekä ikkuna- ja oviliitokset. Lisäksi ongelmallisia kohtia voivat olla läpiviennit.

Kuva 21. Rakenneleikkaus tyypillisestä massiiviulkoseinän ja kotelovälipohjan liitoksesta. (Lähde: Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakenteiden korjaus- opas YM 2019-18)



Kuvat 22. Betonisandwich-elementin saumoissa havaitaan melko suuret lämpötilaerot.

Kuvissa 21 ja 22 esiintyvässä kohteessa tavoitteena oli lämpökuvata kattorakenteet lämpövuotojen selvittämiseksi. Kattorakenne on heikosti tuulettuva puurakenne. Kuvauksessa havaittiin kuitenkin merkittävimmät lämpövuodot räystäsrakenteessa sekä julkisivun betoni-elementtisaumoissa. Lämpötilaerot ovat noin 1 C astetta, joka on julkisivussa melko suuri lämpötilaero, ulkoilman ollessa -2 C astetta. Taulukosta 3 havaitaan, että 1 asteen lämpötilamuutos julkisivussa edellyttää rakenteen U-arvon muutoksen 0,23 W/m²K tasoon 1,28 W/m²K. Tämä käytännössä tarkoittaa, että 200 mm eristeen lämmönjohtavuus on silloin tasolla 0,45 W/K.

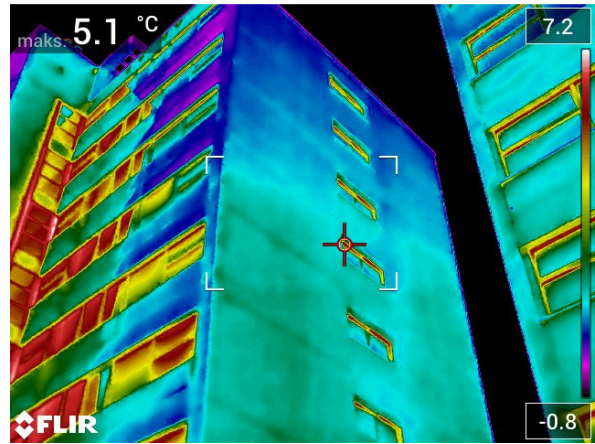
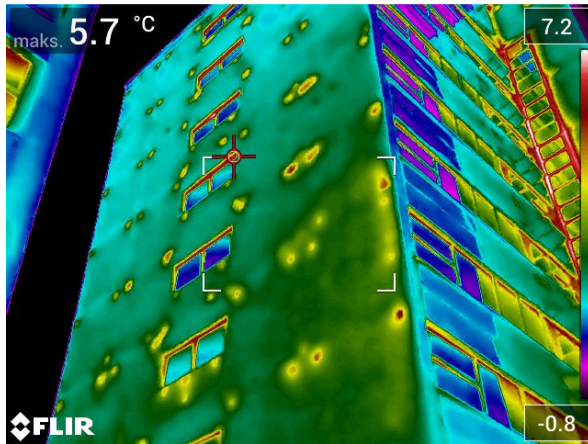
Rakenteen lämpötilajakauma ja U-arvo ehjällä eristeellä.						
	Paksuudet	Lamda	Lämmönvastus [paksuus/Lamda]	Prosentti- osuus	Lämpötila muutos	Lämpötila
Sisäilma						22
Sisäpinta			0,13	0,0300	0,72	21,28
Betoni	0,1	1,2	0,083	0,0192	0,46	20,82
Eriste	0,2	0,05	4,000	0,9224	22,14	-1,32
Betoni	0,1	1,2	0,083	0,0192	0,46	-1,78
Ulkopinta			0,04	0,0092	0,22	-1,78
Ulkoilma						-2
Yhteensä			4,337			
U-arvo			0,23			

Taulukko 3a. Laskelma eristeiden lämmönjohtavuuden ja U-arvon muuttumisesta, silloin kun ulkopinnan pintalämpötila muuttuu 1 C asteen, ulkoilman ollessa -2 C astetta. Ehjä seinä hyvällä eristeellä.

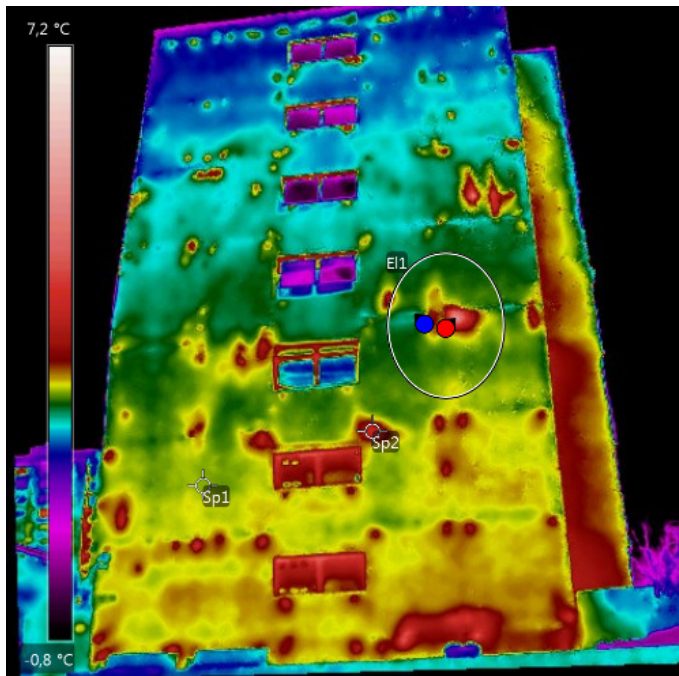
Rakenteen lämpötilajakauma ja U-arvo heikolla eristeellä.						
	Paksuudet	Lamda	Lämmönvastus [paksuus/Lamda]	Prosentti- osuus	Lämpötila muutos	Lämpötila
Sisäilma						22
Sisäpinta			0,13	0,1664	3,99	18,01
Betoni	0,1	1,2	0,083	0,1067	2,56	15,45
Eriste	0,2	0,45	0,444	0,5690	13,66	1,79
Betoni	0,1	1,2	0,083	0,1067	2,56	-0,77
Ulkopinta			0,04	0,0512	1,23	-0,77
Ulkoilma						-2
Yhteensä			0,781			
U-arvo			1,28			

Taulukko 3b. Laskelma eristeiden lämmönjohtavuuden ja U-arvon muuttumisesta, silloin kun ulkopinnan pintalämpötila muuttuu 1 C asteen, ulkoilman ollessa -2 C astetta. Vaurioitunut seinärakenne, jossa eristeiden lämmöneristyskyky on alentunut merkittävästi.

Laskelmassa (Taulukko 3) voidaan myös todeta, että lämpökuvassa hyvin selkeästi näkyvät lämpötilamuutokset, aiheutuvat hyvin merkittävistä lämmöneristeen virheistä.



Kuvat 23. Kahden vierekkäisen 1970-luvun asuinkerrostalon päätyseinän lämpökuvat. Oikean puoleisessa julkisivussa pintalämpötilajakauma on hyvin tasainen ja eristevikoja ei havaita. Vasemman puoleisessa kuvassa havaitaan selkeitä eristevirheitä. Kuvien skaala on sama ja kuvat ovat otettu samaan aikaan, joten ne ovat vertailukelpoisia keskenään.



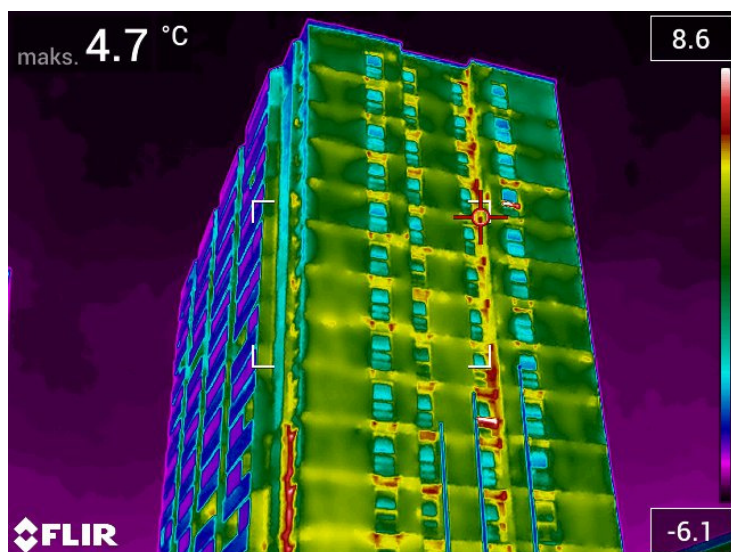
Parametrit

Emissiivisyys	0,92
Etäisyys	30,0 m
Heijastunut lämpötila	0,0 °C
Ilman lämpötila	0,0 °C
Suhteellinen kosteus	90,0%

Mittaukset

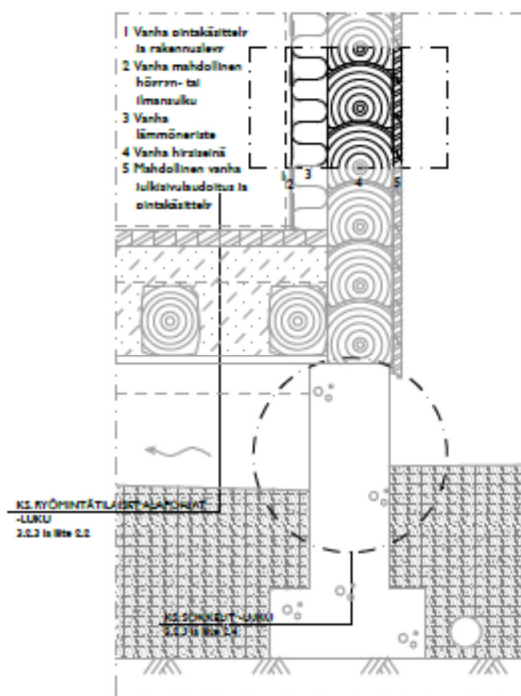
Sp1	2,6 °C
Sp2	3,7 °C
E1	
Maks.	5,6 °C
K-arvo	2,6 °C
Min.	2,2 °C

Kuvat 24. 1980-luvun kerrostalon päädyssä on merkittävät eristepuutteet. Pintalämpötilaerot ovat 1-1,5 C astetta.



Kuva 25. Tasainen lämpötilajakauma, ei eristevirheitä tai puutteita.

Tuulettumattomia tai heikosti tuulettuvia rakenteita ovat myös monet vanhat hirsirakenteet.



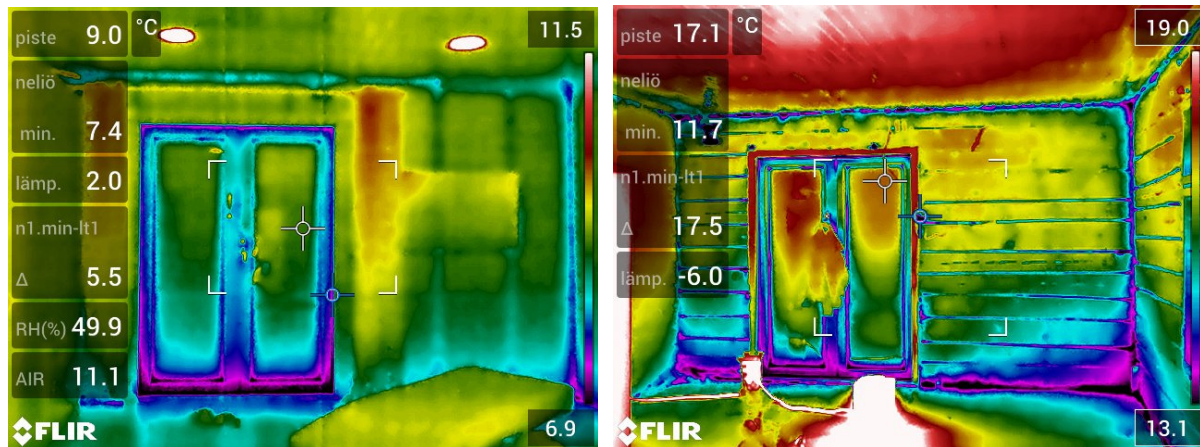
Hirsiulkoseinän tyypillisiä vaurioita ovat alimman hirsikerran lahovauriot, vesivuodoista johtuvat ikkunan alapuolisten hirsien lahovauriot sekä mahdollisen julkisivuverhouksen lahovauriot. Vaurioita voivat aiheuttaa myös virheellisesti tehty sisäpuolinen lisälämmöneristys, minkä seurauksena hirren sisäpintaan tiivistyy kosteutta ja käytettyihin lisälämmöneristeisiin tai hirsirakenteisiin syntyy mikrobivaurio.

Pääperiaatteena lisälämmöneristämättömien hirsirakennusten korjauksissa on, että lahonneet puuosat korvataan uudella puurakenteella. Tässä oppaassa keskitytään tilanteisiin, joissa hirsiseinän sisäpuolinen lisälämmöneristys on mikrobivaurioitunut. Kohteessa, jossa ei ole alun perin ollut lisälämmöneristystä, voidaan soveltaa myös tässä esitettyjä korjaustapoja.

Kuva 26. Rakenneleikkaus tyypillisestä massiivihirsiulkoseinän ja alapohjan liitoksesta. (Lähde: Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakenteiden korjaus- opas YM 2019-18)

Tutkimuskohteena oli myös yksi omakotitalo, jonka rakenteet ovat vastaavat kuin kuvassa 23. Kohteessa tehtiin lämpökuvaukset ja tiiveysmittaukset. Mielenkiintoinen yksityiskohta todettiin lisäeristysvaikutuksesta rakennuksen ilmapuotolukuun. Kohteessa oli tehty 1990-luvulla sisäpuolinen lisäeristys 50 mm siten että eristeen sisäpuolella oli höyrinsulkumuovi ja

kipsilevy. Talon mitattu ilmavuotoluku oli lisäeristeen ja muovin kanssa $4,5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Kohteessa purettiin lisäeristys ja muovit, siten että kaikki seinät jäivät hirsipinnalle. Ilmavuotoluku oli purkutöiden jälkeen $5,0 \text{ m}^3/\text{hm}^2$. Kuvasarjassa 24 on esitetty ilmavuotopaikannuksen yhteydessä otetut lämpökuvat ulkoseinästä lisäeristeen kanssa ja sen purkamisen jälkeen.



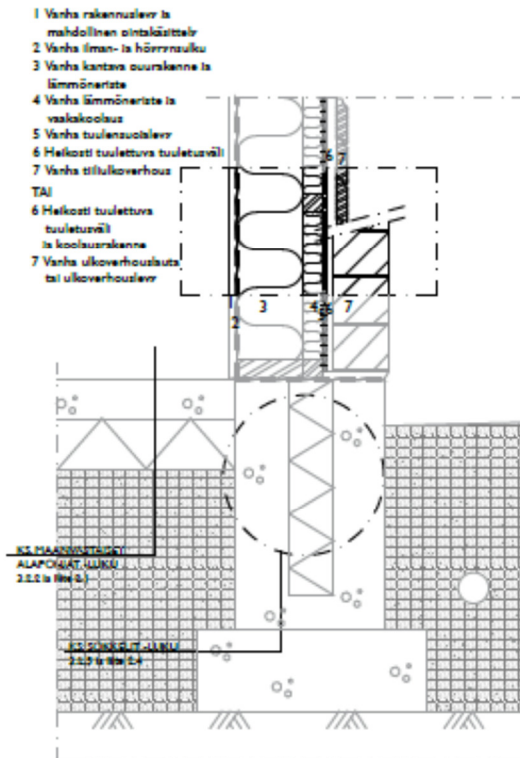
Kuvasarja 27. Ilmavuotopaikannuslämpökuvat hirsiseinästä lisäeristeellä ja muovilla sekä eristeiden purkamisen jälkeen.

Tämä yksittäinenkin tapaus vahvistaa sen käsityksen, että höyrinsulkumuovilla tai ilmansulkupaperilla ei ole ratkaisevaa merkitystä, jos siitä ei saada täysin yhtenäistä koko rakennusvaipan alueella. Kohteen hirsiseinien ilmanpitävyys on ratkaiseva ja ennen kaikkea hirsien väliin tehty tilkitseminen.

Tuulettumattomien ja heikosti tuulettuvien ulkoseinien ulkopuolinen lämpökuvaus antaa hyvän kuvan rakenteen lämpöteknisestä toiminnasta ja pienetkin poikkeamat voidaan havaita.

3.3. Tuulettuvien julkisivujen ilmalämpökuvaus

Tuulettuvien julkisivujen lämpökuvaamisessa on haasteena ulkoverhouksen takana oleva tuuletustila. Tuuletustila katkaisee lämpöenergian johtumisen sisältä ulkoverhoukseen. Tällöin ulkoverhouksen pintalämpötilaan ei synny muutoksia vaikka eristyksissä olisi puutteita.



Yllä olevassa kuvassa on esitetty tyypillinen puurunkoinen seinärakenne, jossa julkisivuna on joko kuorimuri tai kevyt verhous. Kosteusaurioituneissa puurunkoisissa tiiliverhoissa ulkoseinärakenteissa laastipurseet ovat tyypillisesti tukkineet tuuletusvälin. Nämä laastipurseet ja mahdollisesti sisäänpäin viettävät muuraussiteet voivat johtaa kosteutta julkisivurakenteesta tuulensuojalevyn pintaan ja edelleen lämmöneristetilaan aiheuttaen näin mikrobikasvun riskin. Vesi voi laastipurseita pitkin myös imeytyä kapillaarisesti tuulensuojalevyyn ja siitä edelleen runkorakenteisiin.

Puuverhouksen laho- ja homeauriot alkavat yleensä kohdista, joissa vesi pääsee lautojen poikkipintojen kautta imeytymään puurakenteen sisään. Lisäksi tyypillinen ongelmatilanne syntyy, kun puu- tai levyverhouksen epätiivisiä liitos- tai saumakohdista vesi päätyy tuuletusväliin ja puutteellisesti toteutettujen vedenpoistorakenteiden vuoksi tuuletusväli ei pääse kuivumaan. Tällöin seinän alaosan rakenteet voivat mikrobivaurioitua.

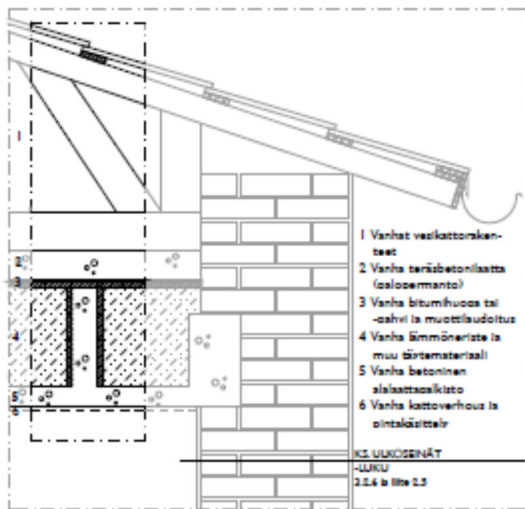
Kuva 25. Rakenneleikkaus tyypillisestä puurunkokouloseinästä ja perustusliitoksesta. (Lähde: Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakenteiden korjaus- opas YM 2019-18)

Tuulettuvissa julkisivuissa on käytännössä monella tavalla tuulettuvia julkisivuja. Suomessa on tehty eri aikakausina tuuletusraot yleisesti seuraavan aikakausijaottelun mukaan:

- Tuulettumattomat ilmaraat -1960
- Heikosti tuulettuvat ilmaraat -1970/1980
- Hyvin tuulettuvat ilmaraat 1990-

3.4. Vesikattojen ilmalämpökuvaus

Rakennuksen yläpohjan märkä eriste on tehokkaasti paikannettavissa muutama tunti aurinkoisen päivän jälkeen suoritetulla ilmalämpökuvauksella. Märkä eriste pysyy runsaamman lämpökapasiteettinsa johdosta kuivaa eristettä pidempään lämpöisenä auringonlaskun jälkeen ja on näin ollen paikannettavissa lämpökamerakopterilla. Soveltuu etenkin suurien, tasahuopakattoisten rakennusten yläpohjien tutkimiseen. Kevät ja syksy ovat parhaita suoritusajankohtia, päivän ja yön lämpötilaerojen ollessa suurimmillaan, ja kattojen ollessa kuivia sekä lumettomia.

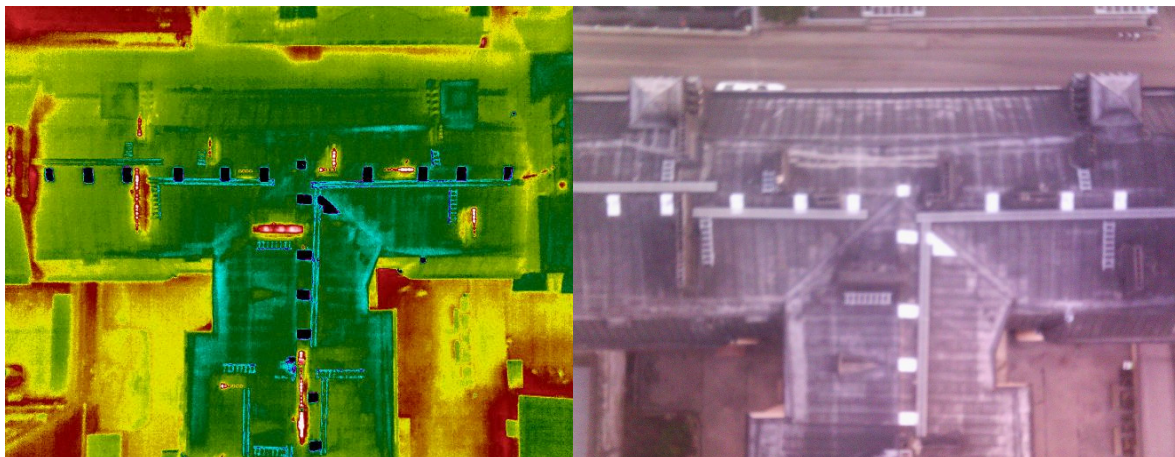


Yllä olevassa kuvassa on esitetty tavanomainen yläpohjarakenne, jossa betonirakenteisen yläpohjan päällä on korkea kylmä ullakkotila ja puuristikoihin tukeutuva vesikattorakenne. Yläpohjan lämmöneriste vaihtelee rakennusaikakauden mukaan orgaanisista täyttömateriaaleista mineraalivilla- ja kevytsoraeristykseen.

Rakenteen vaurioituminen on tyyppisesti seurausta vesikaton vuotamisesta tai rakenteen sisällä kulkevasta ja ikääntyvästä talotekniikasta, esimerkkinä kosteuden tiivistyminen kylmää valurautaista viemäriputkea vasten tai muut putkiin liittyvät vuodot. Lisäksi orgaaniset täytöt sekä muottilaudoitukset ovat voineet kosteusvaurioitua jo rakentamisen aikana.

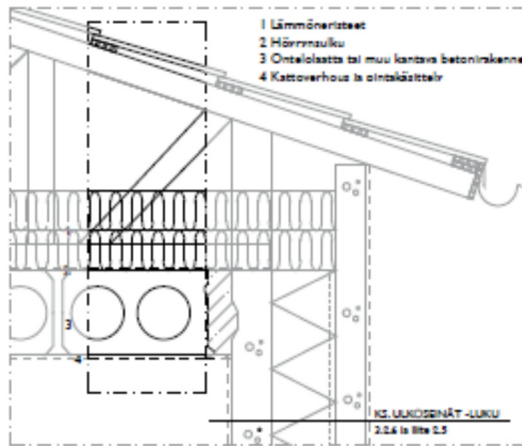
Yläpohjarakenteen korjaustavasta riippumatta tulee ottaa huomioon katemateriaalin jäljellä oleva käyttöikä sekä mahdollinen korjaustarve ja suorittaa vesikattoon liittyvät tarvittavat korjaustoimet.

Kuva 26. Rakenneleikkaus massiiviulkoseinän ja tuulettumattoman ullakon liittoksesta.



Kuvat 27. 1913 rakennetun asuinkorttelin vesikaton lämpökuva ja valokuva. Lämpökuvassa havaitaan mustana eli kylmänä hiljattain asennetut sinkkipintaiset alipaineventtiilit, koska ne ovat matalaemissiivisiä ja heijastavat energian avaruudesta heikon pilvipeitteen läpi. Lämpökuvassa havaitaan myös poistoilmahormit joista on suurimmat lämpöhäviöt.

Kuvien 27 esimerkikohteessa ongelmana oli jääpuikkojen muodostuminen ajoittain räystäälle. Ongelmaan oli puututtu ja asennettu katolla 41kpl alipaineventtiileitä sekä avattu räystäältä laudoituksia ullakon ilmanvaihdon tehostamiseksi. Korjausten jälkeen rakennuksen lämmitysenergiakulutus kasvoi tuntuvasti sekä ullakolla olevissa häkkivarastoissa ihmisten tavarat alkoivat homehtumaan ja haisemaan. Varsinainen jääpuikkojen muodostuminen väheni, mutta ei poistunut kokonaan. Kohteessa tehtiin UAV-lämpökuvauksen lisäksi ullakkokuvaukset sekä vesikaton rakennusfysikaalinen tarkastelu. Tutkimuksen mukaan todettiin, että ullakon tuuletuksen tehostaminen lisäsi energian kulutusta sekä mahdollisti homeen kasvuolosuhteet. Alkuperäisen tuulettumattoman ullakon lämpötila pysytteli selkeästi lämpimämpänä, kuin ulkoilma, jolloin homeen kasvuolosuhteita ei ole muodostunut. Oikea tapa korjata jääpuikkojen muodostumista on asentaa sulanapitokaapeleita jalkaränneihin ja syöksytorviin.



Yllä olevassa kuvassa on esitetty nykyaikaisempi yläpohjarakenne, jossa ontelolaatan tai muun kantavan betonirakenteen päällä on lämmöneristeet ja kattomuotoon liittyvät puurakenteet. Lämmöneristeinä on tyypillisesti käytetty mineraalivillaa tai puhallusvillaa.

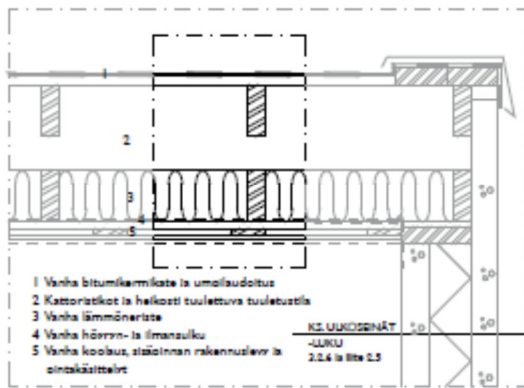
Rakenteen vaurioituminen on tyypillisesti seurausta vesikatteen vuotamisesta tai ilmavuodoista rakenteen sisälle. Tyypillisiä vuotopaikkoja ovat yläpohjan ja ulkoseinän liitos, elementtien saumat, jotka betonirakenteiden kuivumisen tai muiden liikkeiden takia saattavat halkeilla ja muodostaa ilmavuotoreitit lämmöneristeeseen. Ongelmat korostuvat korkeissa tiloissa sekä tiloissa, joissa on ylipainetta tai runsasta kosteuden tuottoa sisäilmaan.

Yläpohjarakenteen korjaustavasta riippumatta tulee ottaa huomioon vesikaton jäljellä oleva käyttöikä sekä mahdollinen korjaustarve ja suorittaa vesikattoon liittyvät tarvittavat korjaustoimet.

Kuva 28. Rakenneleikkaus tyypillisestä betoniulkoseinän ja tuulettuvan harjakaton liitoksesta. (Lähde: Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakenteiden korjaus- opas YM 2019-18)

Hyvin tuulettuvien harjakattojen lämpökuvauksella ei yleisesti saada tuloksia aikaiseksi. Hyvin tuulettuvissa yläpohjissa katteen alapuolella oleva ilma seuraa hyvin lähellä ulkoilmaa, ja siten ilmasta lämpökuvattavaan vesikatteen pintaan ei muodostu lämpöjälkiä, vaikka eristeissä tai varsinaisessa katon ilmansulussa olisi puutteita.

Hyvin tuulettuvien yläpohjien kosteusteknisessä toiminnassa on myös havaittu haasteita. Tuulettutilan ilma on käytännössä ulkoilmaa, jolloin mikrobikasvun mahdollisuus rakenteiden pinnoilla on olemassa, erityisesti ilmaston muuttuessa lämpimämmäksi ja kostemmaksi. Uusimpien suunnitteluohjeiden mukaan yläpohjan lämmöneristeestä osa tulisikin asentaa vesikatteen suuntaisesti heti sen alle.

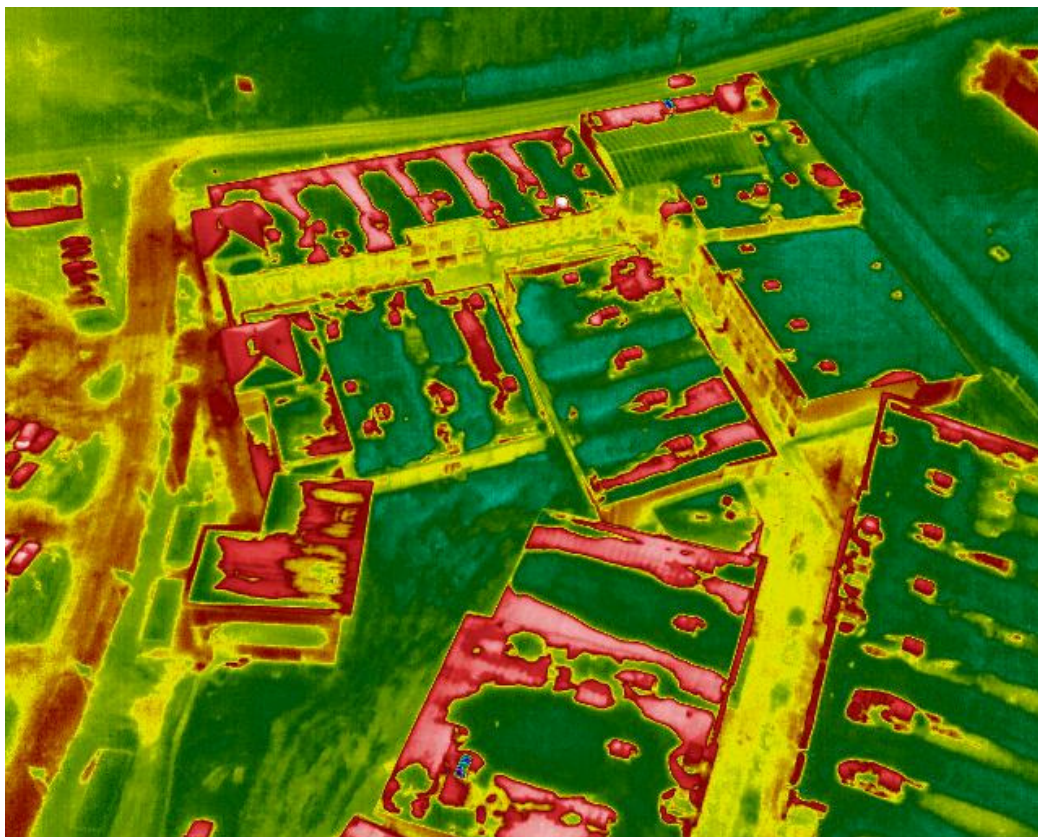


Yllä olevassa kuvassa on esitetty tyypillinen lievästi tuulettuva loivakatto, ns. tasakatto, jonka kantava runko on puurakenteinen. Lämmöneristeenä rakenteessa on usein mineraalivilla, jonka alla on höyrynsulkumuovi. Katemateriaalina on ponttilaudoituksen päälle tehty usein monikerroksinen bitumikermikate. Umpilaudoituksen ja lämmöneristeiden väliin jäävä ilmatila on yleensä hyvin lievästi tuulettuva.

Rakenteen vaurioituminen liittyy tyypillisesti joko vesikaton vuotoihin tai höyrynsulkukerroksen puutteelliseen tiivyyteen, minkä seurauksena sisäilmasta rakenteeseen kulkeva ja tiivistyvä kosteus johtaa rakenteen vaurioitumiseen. Yläpohjarakenteen korjaustavasta riippumatta tulee ottaa huomioon vesikaton jäljellä oleva käyttöikä sekä mahdollinen korjaustarve ja suorittaa vesikattoon liittyvät tarvittavat korjaustoimet.

Kuva 29. Rakenneleikkaus tyypillisestä betoniulkoseinän ja loivasti kaatavan tuulettuvan katon liitoksesta. (Lähde: Kosteus- ja mikrobivaurioituneen rakenteiden korjaus- opas YM 2019-18)

Loivissa katoissa tuuletustila on sen verran pienempi, että katon eristeen puutteet ovat paremmin havaittavissa lämpökuvauksen avulla. Matalissa ja loivissa tuuletustiloissa ilman liike on maltillisempaa ja lämpövuodot aiheuttavat helposti vesikatteen ulkopintaan havaittavia lämpöjälkiä.



Kuva 30. Lämpökuvaa kauppakeskuksen vesikatoista. Kattorakenteena on loiva heikosti tuulettuva puurakenne. Vesikatteenä on bitumihuopa.

Kuvassa 30 havaitaan hyvin selkeästi vesikattojen lämpövuotoalueet, vaikka kuva on otettu hyvin kaukaa ja korkealta. Punaiset alueet ovat kohtia joissa on suuremmat lämpövuodot ja joissa lumi on alkanut sulamaan nopeammin.

Kuvan 30 kohteessa tehtiin ulkopuolisen lämpökuvauksen lisäksi sisäpuoliset lämpökuvaukset normaali tilanteessa sekä tehostetussa alipaineessa. Kohteessa tehtiin kuvauksen perusteella myös rakenneavauksia ja muita mittauksia ongelmien selvittämiseksi. Kohteessa havaittiin selkeitä työvirheitä.

3.5. Yläpohjan tuuletuksen merkitys lämpökuvaukseen ja rakenteen toimintaan

Yläpohjien lämpökuvauksien yhteydessä havaittiin, että kuvauksen tuloksiin vaikuttaa todellisuudessa hyvin moni asia. Siksi asiaa lähdettiin tutkimaan hieman tarkemmin. Tässä kappaleessa esitellään erään kauppakeskuskohteen tutkimustuloksia. Kohteessa on tutkittu kaikkiaan 12 eri rakennusta ja niiden ilmanpitävyyttä, ilmavuotoja ja yläpohjien rakennusfysikaalista toimintaa.

Kohteessa on erityisenä ongelmana jääpuikkojen muodostuminen rakennuksen räystäällä. Kuva 31.



Kuvat 31. Jääpuikkojen muodostuminen rakennuksen räystäälle ja julkisivuun oli erityinen havaittava ongelma.

Kohteissa tehtiin tiiveysmittaukset. Kohteiden mitatut ilmavuotoluvut ovat välillä 1,13...2,50 q50 m³/(hm²). Nykyisten (2019) määräysten mukaan hyväksi ilmavuotoluvuksi katsotaan 1 m³/(hm²) ja sen alle. Taulukossa 1 on ilmavuotoluvut listattuna rakennuksittain.

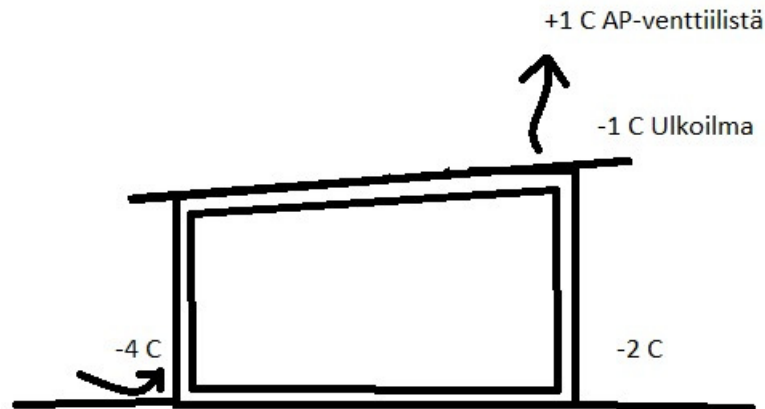
Taulukko 4. Ilmavuotoluvut kauppakeskuksen eri rakennuksista

Rakennus	q ₅₀ -luku
A	1,98
M	1,66
L	2,03
DEF	2,44
C	1,13
B	2,50
G	1,88
H	1,49
J	1,48
I	2,23
K	1,45
V	2,16

Yläpohjan tuulettumista tutkittiin mittaamalla lämpötiloja tuuletusvälistä sekä ulkotilasta. Mittaukset suoritettiin sellaiseen rakennukseen, jossa oli erityisesti ilmennyt jääpuikko-ongelmia räystäällä. Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty mittaustulokset lämpötila ja RH-tietoina sekä ilman absoluuttinen kosteus.

Taulukko 5. Tuulettustilan ilman olosuhdetiedot sekä periaatepiirros mittaustilanteesta.

	Lämpötila C	Suht. kosteus RH %	Absoluut- tinen kosteus g/m ³	Kyllästys- kosteus g/m ³
Ulkoilma alhaalla	-4	65	2,34	3,60
Ulkoilma sisäpiha	-3,1	61	2,35	3,86
Ulkoilma katolla	-0,1	60	2,89	4,81
Alipaineventtiili 1	-0,5	75	3,51	4,68
Alipaineventtiili 2	0,1	77	3,76	4,88
Alipaineventtiili 3	1,6	73	3,96	5,43
Alipaineventtiili 4	0,5	83	4,17	5,02
Alipaineventtiili 5	-0,5	72	3,37	4,68

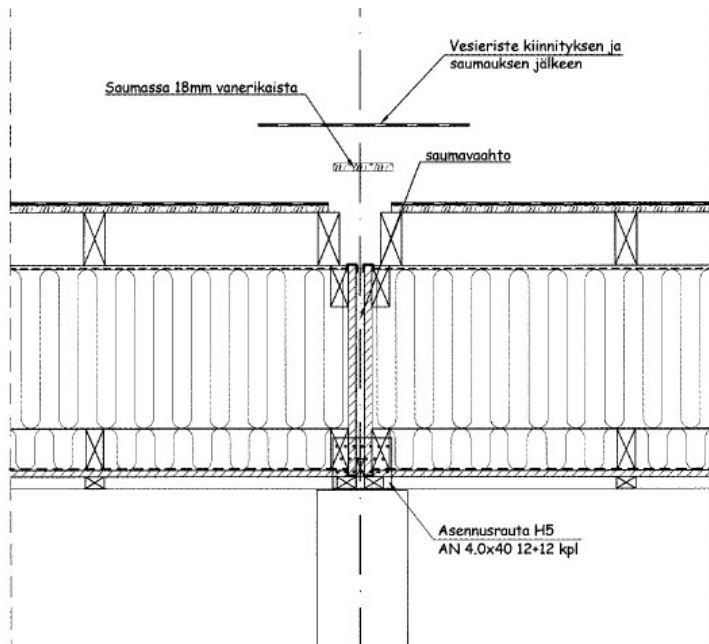


Taulukosta ilmenee, että tuuletusilman absoluuttinen kosteus alipaineventtiililtä mitattuna on jokaisessa mittauspisteessä korkeampi kuin ulkoilman abs. kosteus. Tämä kosteuslisä on todennäköisesti peräisin sisäilmasta, joka yläpohjan vuotokohtien kautta kulkeutuu tuuletustilaan.

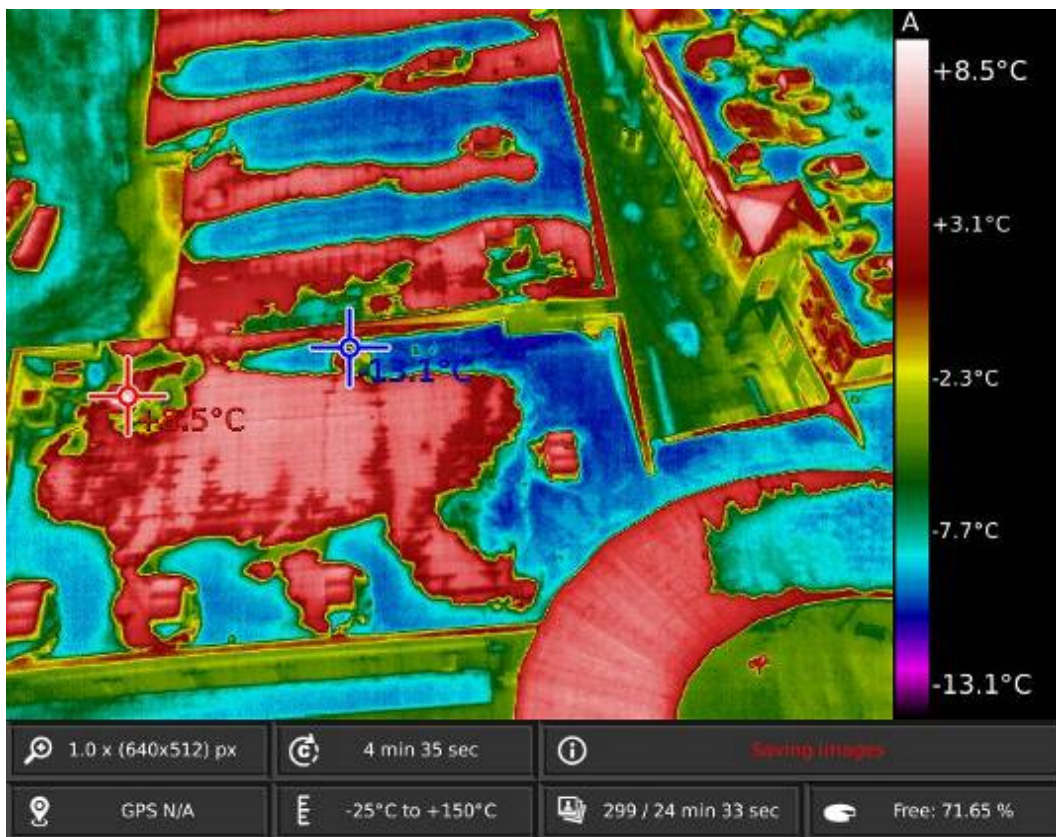
Tuuletusilma otetaan rakennuksen pohjoispuolelta, jossa ulkoilman lämpötilaksi mitattiin -4 Celsiusastetta. Alipaineventtiilit sijaitsevat katolla, missä lämpötilaksi mitattiin -0,1 Celsiusastetta. Alipaineventtiileistä tulevan ilman lämpötila vaihteli mittauspisteittäin -0,5...+1,6 asteen välillä. Toisin sanoen tuuletusilma lämpenee tuuletusvälissä 4,5...5,6 Celsiusastetta. Tämän seurauksena lämpimämpi ilmavirta sulattaa katolle satanutta lumikerrosta, jolloin sulava lumi valuu sopivissa olosuhteissa alaräystäälle ja jäätyy.

Kattorakenteiden tarkemmalla tutkimisella ja koeavauksilla todettiin, että yläpohjan tuuletus oli erityisen heikko kantavien liipapuupalkkien kohdalla. Kantavan liipapuupalkin rakenneleikkaus on esitetty kuvassa 32. Palin kohdalla on alaräystäällä toisen suuntainen koolauslankku, jossa ilman virtaaminen lähes estyy. Tästä seuraa se ilmiö, että jääpuikot muodostuvat erityisesti palkkien kohdalle. Ongelma paljastuu hyvin myös ilmalämpökuvista kuvat 33.

Rakenteista havaittiin selviä laatuvirheitä, jotka vaativat korjaustoimenpiteitä. Myös fyysiset tekijät, joita ei ole osattu huomioida suunnittelussa, aiheuttavat ei-toivottuja ilmiöitä (jääpuikot).



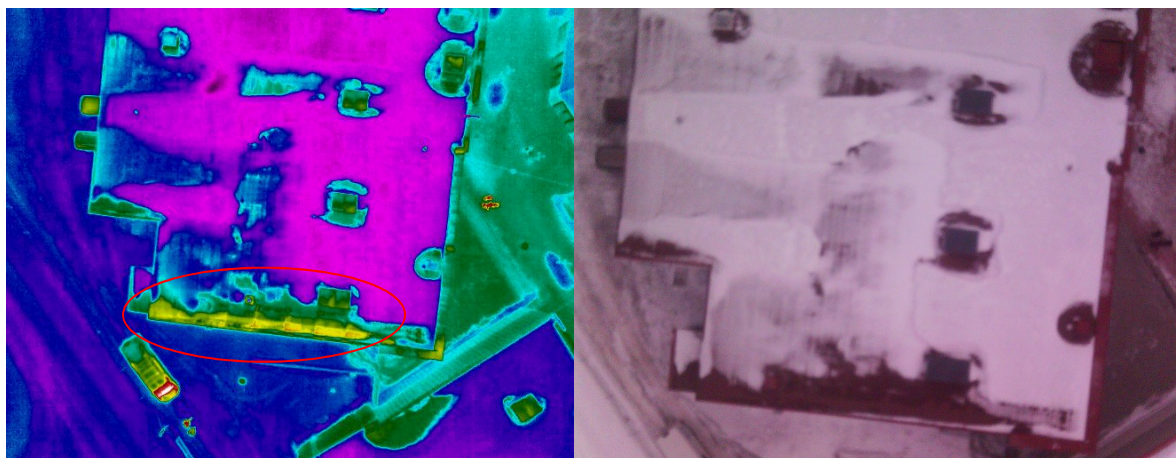
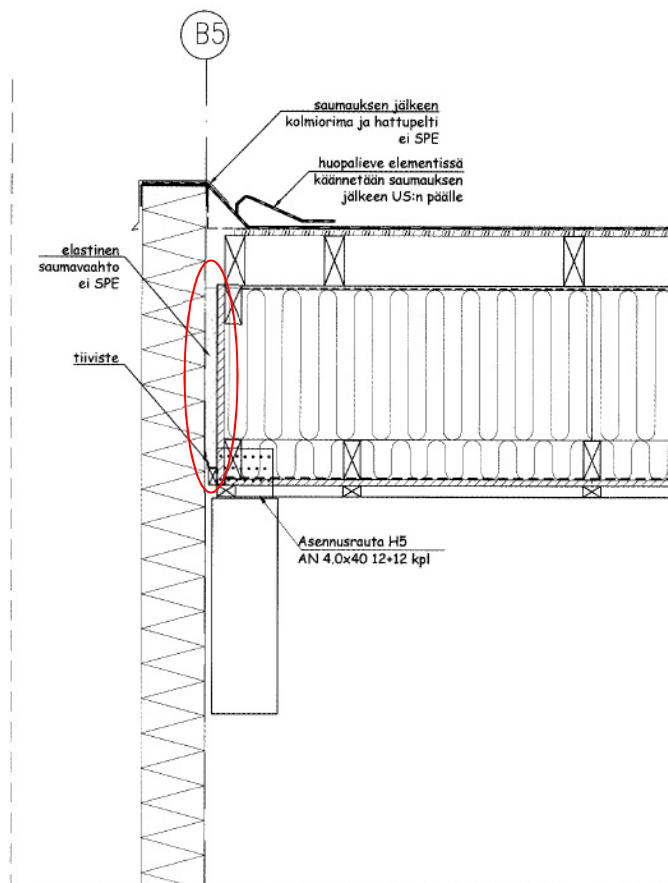
Kuva 32. Rakenneleikkaus heikosti tuulettuvasta loivasta puurakennekatoista liimapuupalkin kohdalta. Katon tuuletus on estynyt liimapuupalkin kohdalla.



Kuva 33. Lämpökuva rakennuksen katosta. Heikko tuuletus on punaisilla kohdilla.

Kohteessa havaittiin tuuletuksen vaihteluiden lisäksi myös rakenteellisia laatuvirheitä. Rakennuksen päätydetali ja lämpökuva kyseisestä päädyestä on esitetty kuvissa 34.

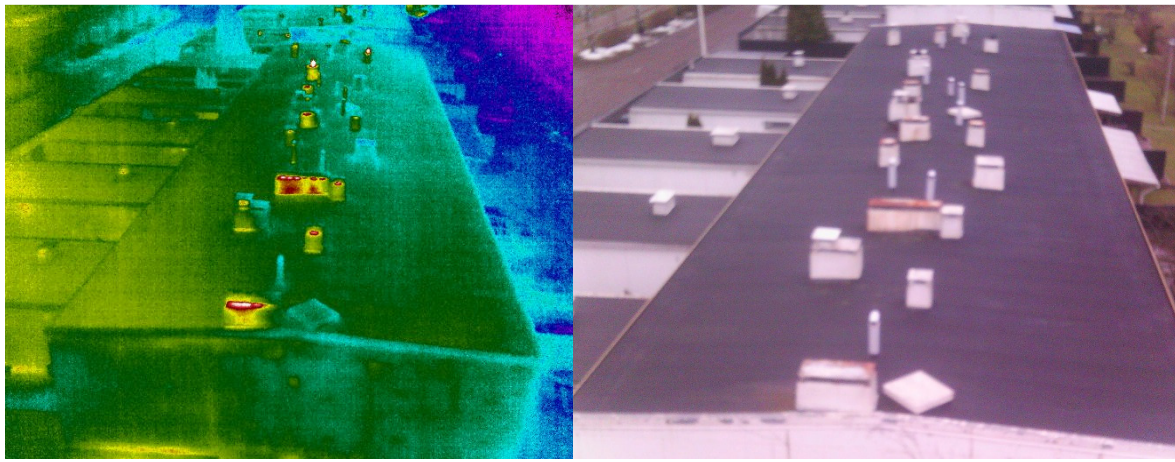
Lämpöjälki aiheutuu ilmavuodosta, joka on seurausta puutteellisesta uretaanivaahdotuksesta elementtisaumassa. Päätyyn tehtiin rakenneavaus, jossa todettiin uretaanivaahdotuksen jääneen pois kokonaan.



Kuvat 34. Lämpökuva paikallisesta rakennuksen päädyn suuresta lämpövuodosta, jossa havaittiin uretaanieristeen puuttuminen saumasta. Yllä kuva rakenteesta jossa eristevika.

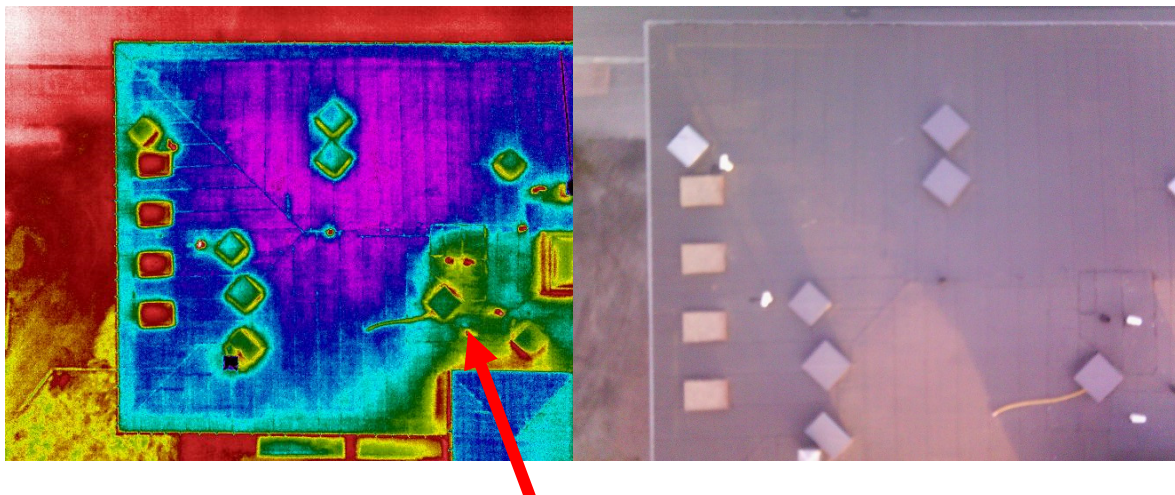
3.6. Vesikattokuvauksissa tehdyt muut havainnot

Lämpökuvauksissa monissa kohteissa ei havaittu varsinaisia ongelmia. Kuva 35 kohteessa on esitetty lämpökuva 1970-luvun rivitalon katosta. Kohteen kuvaus tehtiin osana taloyhtiön energiaohjelmaa, jolla haluttiin selvittää mahdolliset energiakulutukseen vaikuttavat puutteet. Kuvauksen perusteella voitiin todeta, että yläpohjassa ei ole eristevirheitä. Yläpohja on heikosti tuulettuva ja kuvausolosuhteet olivat hyvät, joten asia voitiin todeta pelkän kuvauksen perusteella.



Kuva 35. 1970-luvun rivitalon yläpohjissa ei havaittu lämpövuotoja.

Kosteusvaurioiden paikantaminen yläpohjista on mahdollista myös lämpökuvauksen avulla. Kuvassa 36 on esitetty kuvat kohteesta, jossa epäillään kosteusongelmaa. Kuvauksen perusteella päätettiin avata vesikatto nuolen osoittamasta kohdasta.



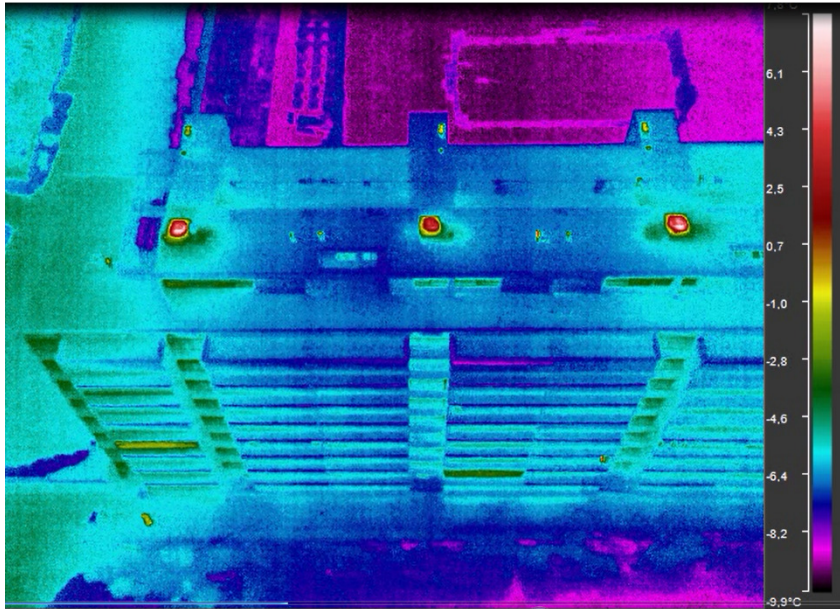
Kuva 36. Kerrostalon yläpohjan mahdollisen kosteusvaurion paikantaminen. Kuvauksen perusteella päätettiin avata vesikatto nuolen osoittamasta kohdasta.

Kattoavauksessa paljastui kyseisessä kohdassa viemärin tuuletusputki jota ei johdettu katolle. Putkesta oli virrannut kosteaa ilmaa vuosia paputilaan ja aiheuttanut kosteusvaurion.



Kuvat 37. Vesikatto ennen katon suojausta ja avausta sekä katon avauksen jälkeen. Kattoavauksessa paljastui kyseisessä kohdassa viemärin tuuletusputki, jota ei johdettu katolle. Putkesta oli virrannut kosteaa ilmaa vuosia paputilaan ja aiheuttanut kosteusvaurion.

Vesikattojen lämpökuvauksessa havaittiin myös merkittävämpänä poikkeamana vesikatolla sijaitsevien poistoilmahuippareiden kautta syntyvät lämpövuodot. Poistoilmassa ei ole lämmöntalteenottoa. Kuva 38.



Kuva 38. Asuinkerrostalon poistohuippareiden lämpöhäviöt. Poistoilmassa ei ole lämmöntalteenottoa.

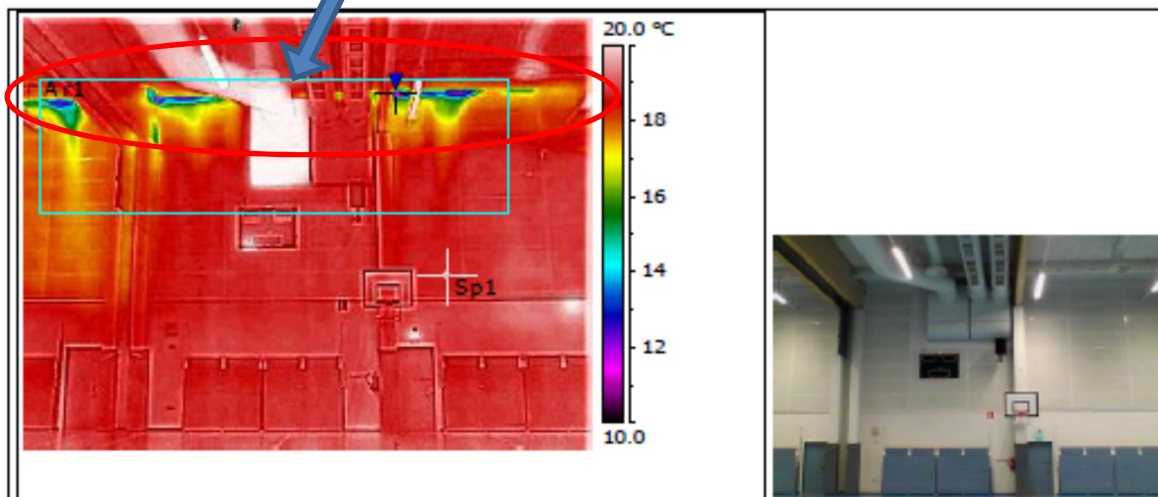
3.7. Ylipaineistamisen ja alipaineistamisen käyttö ilmalämpökuvauksen apuna

Tutkimuksissa käytettiin apuna koko rakennuksen ylipaineistamista ilmavuotojen paikantamiseksi. Ylipaineistamista käytettiin kaikkiaan viidessä eri kohteessa. Yleisesti voidaan todeta, että tehostettu suuri ylipaine (+30...+50Pa) tasoa tuo esiin tehokkaasti ilmavuodot ulkopuolelta tehtävässä lämpökuvauksessa.

Seuraavassa esimerkissä, joka koskee liikuntahallia ja uimahallia, on esitetty tutkimusten tulokset sen eri vaiheissa. Kohde on 9 vuotta vanha ja ongelmana on ollut erityisesti suuri energiakulutus sekä ajoittain tapahtuva veden tippuminen katosta sisätiloihin.

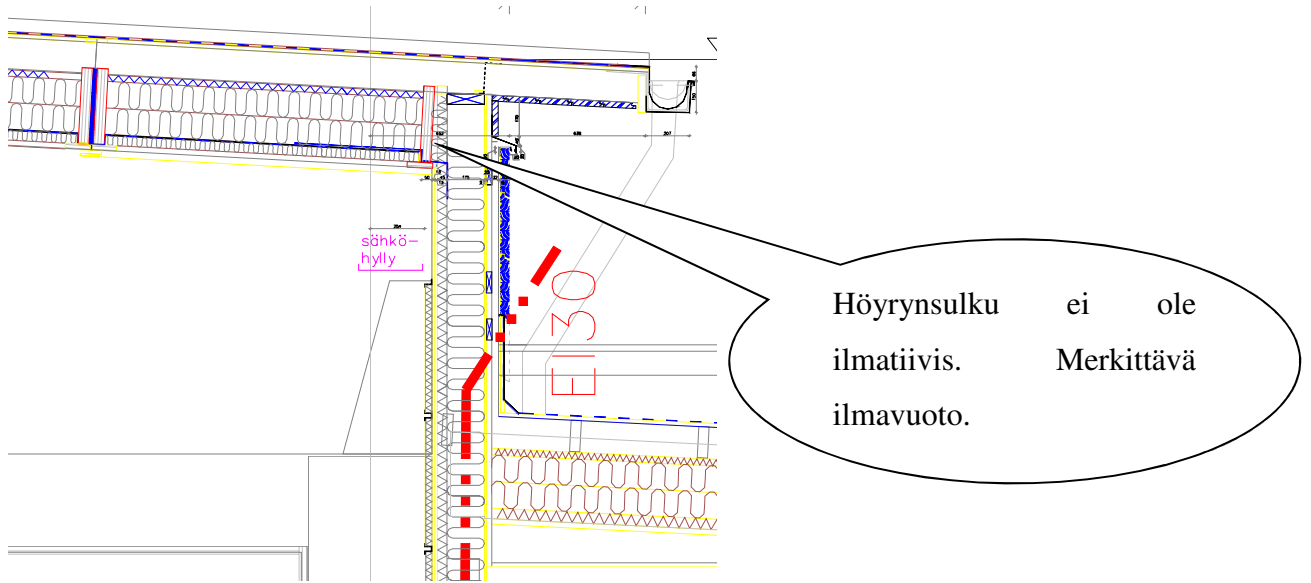


Kuva 39. Lämpökuvassa havaitaan selkeät ilmavuodot liikuntasalin reuna-alueilla. Kohde on ylipaineistettu +50Pa ylipaineeseen puolen tunnin ajaksi.







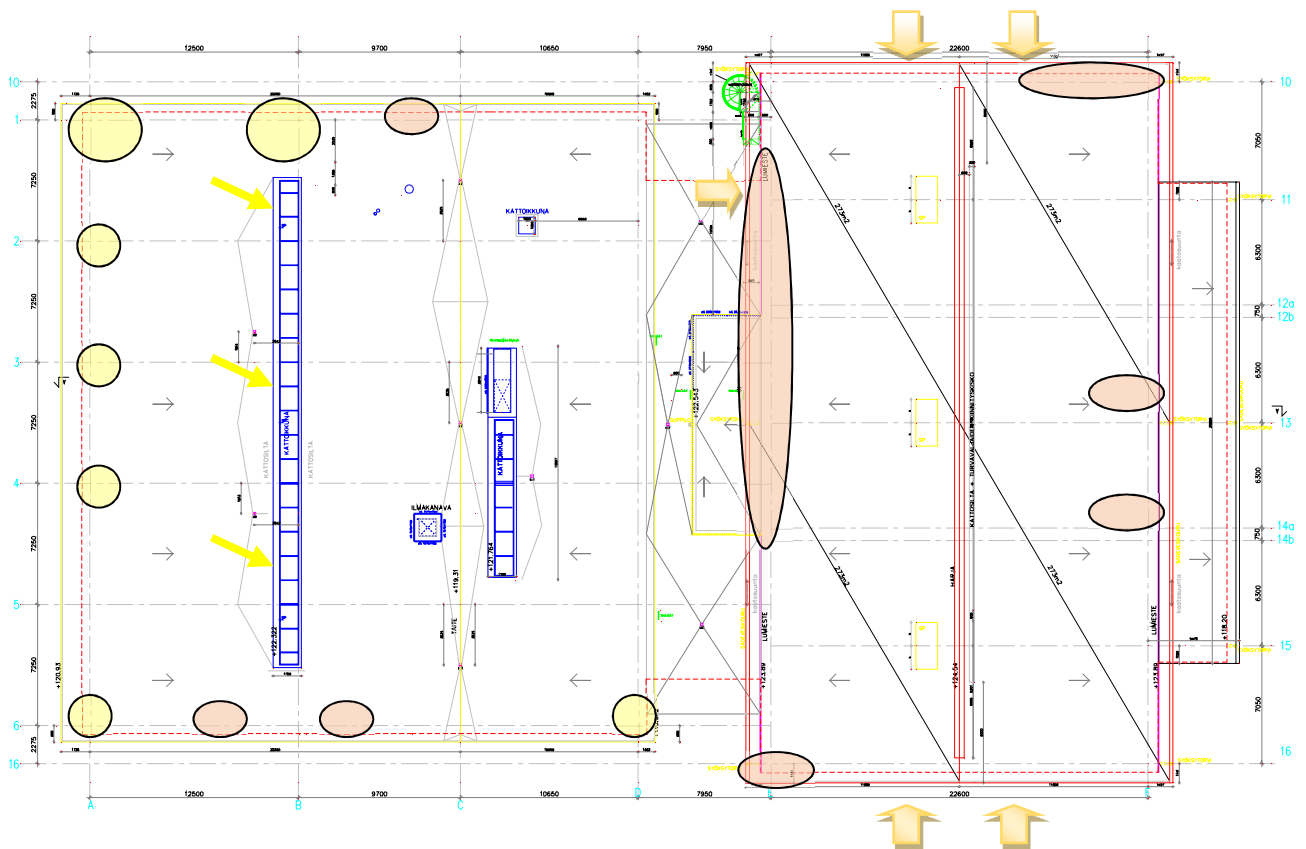
Kuva 40. Sama kohta sisäpuolelta kuvattuna alipainetilanteessa.

Tutkimuksen mukaan kattorakenteissa ja seinärakenteissa on eristevikoja sekä ilmavuotoja. Oleellimmat rakenteelliset puutteet on esitetty seuraavissa kuvissa.

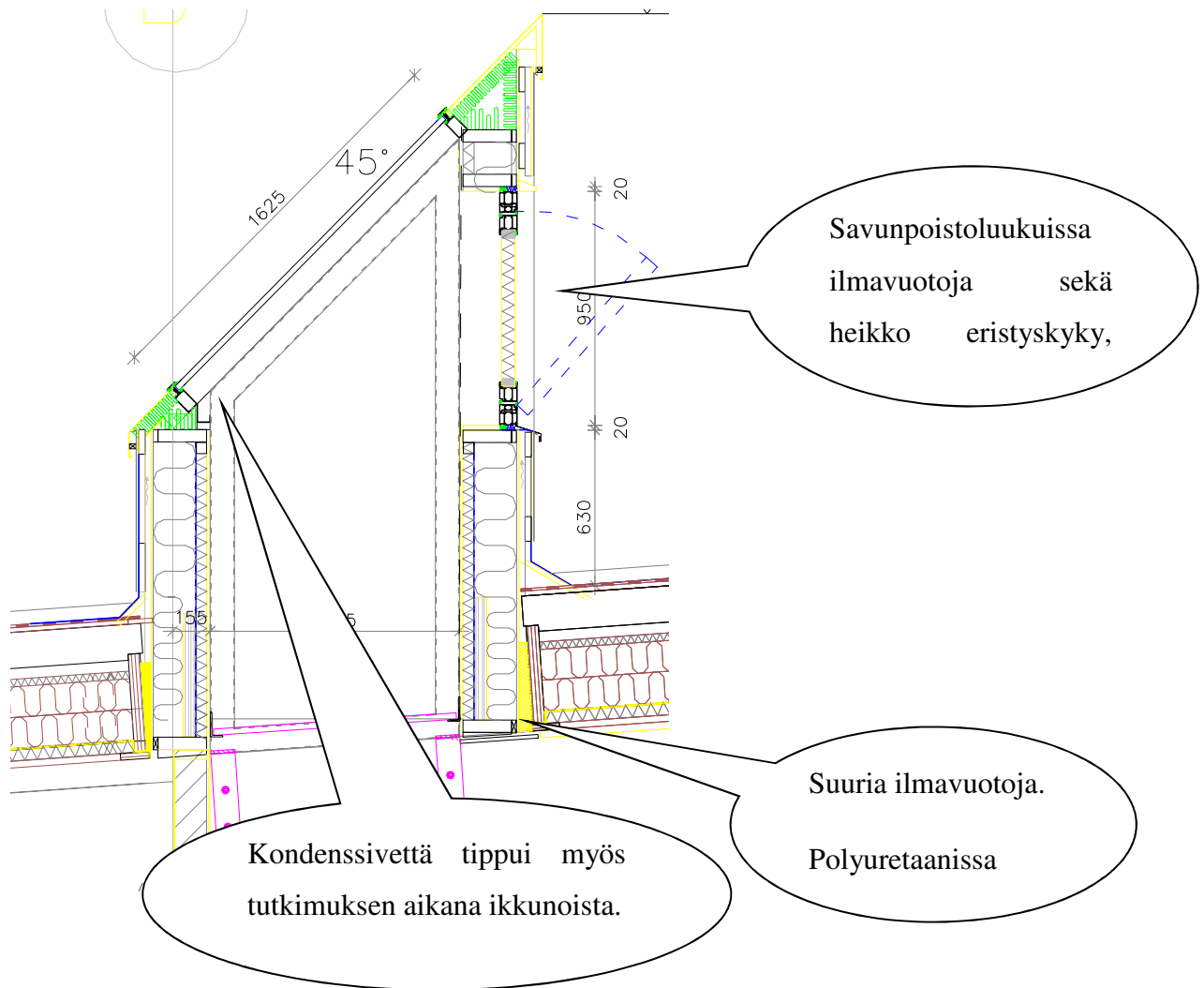


Kuva 41. Kuvien 39-40 rakenneliitos ja sen ongelmat.

- Eristevika = 
- Ilmavuoto katossa = 
- Ilmavuoto seinän ja katon liitoksessa = 
- Ilmavuoto seinässä = 



Kuva 42. Uimahallin ja liikuntahallin kuvauksen tulokset. Ongelmat ovat laajamittaiset.



Kuva 43. Uimahallin ongelmakohdat kattorakenteissa.

Liikuntasalin rakenteissa on huomattavia ilmavuotoja sekä eristevikoja. Suurimmat ilmavuodot ovat yläpohjan ja ulkoseinien liitoksessa sekä ulkoseinien elementtisaumoissa pilareiden takana. Eristevikaa on vain yläpohjan ja ulkoseinän liitoksen kohdalla. Ulkoseinien ja yläpohjien keskialueet (ns. ehjän rakenteen kohdat) ovat eristykseltään ja ilmatiiviydeltään kunnossa. Raportoituja ilmavuotoja ja eristevikoja voidaan pitää merkittävänä. Niistä voi aiheutua kosteuden tiivistymisriskiä rakenteille, jääpuikkomuodostumista sekä ne lisäävät energiakulutusta.

Kuntosalin yläpohjassa havaittiin vain kattoikkunan linjassa ja kotelon kohdalla merkittävä ilmavuoto. Muilta osin kuntosalin rakenteiden eristyskyky ja tiiveys vastaa hyvää rakentamistapaa.

Uimahallin yläpohjan ja ulkoseinän liitoksissa havaittiin jonkin verran kohtalaisia eristevikoja. Niiden lämpötila ei muuttunut eri painesuhdetilanteissa, joka kertoo ongelman olevan

eristepuutteissa. Uimahallin yläpohjassa ei havaittu laajamittaisesti merkittäviä ilmavuotoja. Pääasialliset rakenteelliset ilmavuodot ovat uimahallin puolella kattoikkunalinjassa sekä liimapuupalkkien kohdalla.

Tehostetussa eri painesuhteessa tehtävä lämpökuvaus antaa käsityksen, että rakennuksen tiiveys ja eristeiden asennushuoleellisuus ei vastaa rakennuksen käytön edellyttämiä vaatimuksia ja käyttöolosuhteita. Eristepuutteet aiheuttavat kattorakenteiden lämpenemisen ja sitä kautta lisää jääpuikkojen muodostumista. Ilmavuodot vastaavasti aiheuttavat lämpimän kostean sisäilman kulkeutumisen yläpohjan rakenteisiin, aiheuttaen rakenteiden jäätymistä, kastumista ja kosteusvaurioita. Uimahallin sisäilman kosteuslisä sekä savupiippuilmiön aiheuttama ylipaine on tavanomaisesti niin suuri, että yläpohjan tulisi olla täysin ilmatiivis. Suosituksena on korjata löydetyt ulkoseinien ja yläpohjien eristepuutteet ja ilmavuodot. Uimahallin kattoikkunoiden ja savunpoistoluukkujen kondenssiongelman on syytä harkita mahdollisia ratkaisuja.

Ilmavuotojen paikantaminen lämpökuvauksen avulla edellyttää aina painesuhteiden hallintaa ja tarvittaessa on tehtävä tehostettu paine-ero. Alipaineella havaitaan sisäpuolisella kuvauksella ilmavuodot ja vastaavasti ylipaineistamalla havaitaan ulkopuolisella kuvauksella ilmavuodot. Painero ei välttämättä tarvitse olla kovin suuri jos lämpötila-ero on riittävä ja paine-eron on annettu vaikuttaa riittävän pitkään.

Ilmavuotojen paikantamiseen ohjeena voidaan antaa seuraavia vaatimuksia:

- a. Lämpötilaeron tulisi olla vähintään 5 C astetta. Suositeltavaa kuitenkin vähintään 10 C.
- b. Paine-eron tulisi olla vähintään 15Pa. Suositeltavaa kuitenkin vähintään 30Pa.
- c. Paine-eron tulisi vaikuttaa, ennen lämpökuvausta, vähintään 30 min. Suositeltavaa kuitenkin vähintään 60 min.

4. RAKENNUSFYSIKAALINEN TARKASTELU

Rakennusfysikaalisesti rakenteen ulkopinnan lämpötilamuutos on melko vähäinen ulkopinnan alhaisen pintavastuksen ansiosta. Kirjallisuudessa esitetään ulkopinnan pintavastukseksi 0,04 W/K, joka perustuu käytännön mittauksiin sekä laboratorio-olosuhteissa tehtyihin mittauksiin. Rakenteen ulkopinnasta energia vapautuu ulkoilmaan melko helposti tuulen aiheuttaman konvektion sekä vapaan säteilyolosuhteen (avaruuteen ja ympäristöön vapautuva energia säteilemällä) takia.

Kun tarkastellaan erilaisten poikkeamin aiheuttamaa ulkopinnan pintalämpötilamuutosta laskelmin sekä lämpökameroiden erottelykykyä, niin havaitaan että rakenteessa tulee olla melko suuria poikkeamia, että ne voidaan havaita. Lämpökameroiden erottelukyky on tasolla 0,03 C astetta, mutta käytännön mittaustilanteessa se on tasolla 0,05 C astetta.

Rakennusfysikaalinen laskelma osoittaa taulukossa 6 miten rakenteen U-arvon ja eristeen lämmönjohtavuuden pitää muuttua, jotta 0,05 C asteen lämpötilamuutos on mahdollinen.

Taulukko 6. Laskelma rakenteen lämmöneristyskyvyn muutoksesta, silloin kun ulkopinnan pintalämpötila muuttuu 0,05 C astetta, joka vastaa normaalia lämpökameran erottelykykyä.

Rakenteen lämpötilajakauma ja U-arvo tyypillisellä eristeellä.						
	Paksuus	Lambda	Lämmönvastus [paksuus/Lambda]	Prosentti- osuus	Lämpötila muutos	Lämpötila
Sisäilma						20
Sisäpinta			0,13	0,0312	0,62	19,38
Eristerakenne	0,2	0,05	4,000	0,9592	19,18	0,19
Ulkopinta			0,04	0,0096	0,19	0,19
Ulkoilma						0
Yhteensä			4,170			
U-arvo			0,24			
Rakenteen lämpötilajakauma ja U-arvo kun lämpötila muuttuu 0,05 C astetta.						
	Paksuus	Lambda	Lämmönvastus [paksuus/Lambda]	Prosentti- osuus	Lämpötila muutos	Lämpötila
Sisäilma						20
Sisäpinta			0,13	0,0400	0,80	19,20
Eristerakenne	0,2	0,065	3,077	0,9476	18,95	0,25
Ulkopinta			0,04	0,0123	0,25	0,25
Ulkoilma						0
Yhteensä			3,247			
U-arvo			0,31			
ULKOPINNAN LÄMPÖTILAMUUTOS						0,05

Rakennusfysikaalisen tarkastelun perusteella voidaan todeta ulkopuolisen lämpökuvauksen luotettavaksi ja lämpökameroiden erottelukyvyn olevan sillä tasolla, että melko pienetkin rakenteen poikkeamat voidaan havaita. Taulukossa 6 tehdyssä laskelmassa havaitaan, miten rakenteen u-arvon muutos 0,24 tasosta 0,31 tasoon, vaikuttaa ulkopinnan pintalämpötilaan 0,05C asteen muutoksen.

5. TUTKIMUSTEN TULOKSET YHTEENVETO

Jonkin asteisia eristevikoja havaittiin lähes kaikissa tutkituissa kohteissa. Niitä oli julkisivuissa sekä kattorakenteissa. Eristevikaan liittyi hyvin usein myös ilmavuotoa.

Ilmavuodon erottaminen eristeviasta vaatii aina painesuhteiden muuttamisen ja kahteen kertaan tehtävän lämpökuvaamisen. Ilmavuotojen paikantaminen onnistuu tehokkaasti, kun rakennukseen tehdään reilu (+30...+50Pa) ylipaine. Ilmavuotoja havaittiin kaikissa kohteissa. Kahdessa kohteessa havaittiin kattorakenteiden kosteusvauriot. Toisessa kohteessa yläpohjan papu-tilaan oli jäänyt viemärin tuuletusputki, joka oli kastellut eristeet. Toisessa kohteessa hallin vesikatteessa oli vesivuotoja.

Tutkittujen 13 kohteen yleistiedot ja mittaustiedot ovat koottu *taulukkoon 7*. *Taulukkoon 8* on koottu tutkimusten höyty arvosanalla 0...5, sekä oleellimmat löydökset.

Taulukko 7. Tutkimuskohteiden yleistiedot.

Rakennusvuosi	Kohde	US / YP rakenne	Peruskorjausvuosi	Ilmanvaihtojärjestelmä
1880	Asuinkerrostalo 4 krs	Massiivitiili / Betoni	2010	T-P + LTO
1910	Kaupungintalo	Massiivitiili / Puu	IV 2010	T-P + LTO
1913	Asuinkerrostalo 5 krs	Massiivitiili / Betoni		Painovoimainen
1940	Omakotitalo	Hirsi / Puu	1990	Painovoimainen
1960	Asuinkerrostalo	Betonivalu / Betonivalu		Poisto
1970	Rivitalo 4 taloa	Puu / Puu		Seka
1978	Asuinkerrostalo 14 krs	Betonielementti/Betoni	IV 2018	T-P + LTO
1979	Asuinkerrostalo 8 krs	Betonielementti/Betoni		Poisto
1980	Asuinkerrostalo 8 krs	Betonielementti/Betoni		Poisto
1990	Toimistokerrostalo 8 krs	Betonielementti/Betoni	2019	T-P + LTO
2010	Uimahalli	Puuelementti/Puu		T-P + LTO
2018	Kauppakeskus 1-2 krs	Peltikasetti/Puu		T-P + LTO
2019	Teollisuushalli	Peltikasetti/Peltikasetti		T-P + LTO

Taulukko 8a. Tutkimusten höyty ja oleelliset löydökset. Oliko UAV lämpökuvauksesta merkittävää hyötyä kiinteistön omistajalle? Arvosana 0=ei hyötyä, arvosana 5=merkittävä hyöty jota ei muilla ainetta rikkomattomilla menetelmillä olisi löydetty.

Kohde	Vallitseva Alipaine mittauksen aikana	Vallitseva Ylipaine mittauksen aikana	Sisäpuolinen lämpökuvauksen tulos	Ilmavuotoluku	Oliko UAV lämpökuvauksesta merkittävää hyötyä kiinteistön omistajalle? 0...5
Asuinkerrostalo 4 krs	-5...-8				5
Kaupungintalo	-50		Kyllä	3,4	4
Asuinkerrostalo 5 krs		9	Ullakkokuvaus		4
Omakotitalo	-50	50	Kyllä	4,5	2
Asuinkerrostalo	-20		Kyllä		2
Rivitalo 4 taloa					4
Asuinkerrostalo 14 krs	-5...-15		3 asuntoa		3
Asuinkerrostalo 8 krs					3,5
Asuinkerrostalo 8 krs					2,5
Toimistokerrostalo 8 krs			Kyllä	1	2
Uimahalli	-50	50	Kyllä	noin 1,5	5
Kauppa-keskus 1-2 krs	-20...-50	50	Kyllä	1...2,5	4,5
Teollisuushalli	-50	50	Kyllä	0,8	4

Taulukko 8b. Tärkeimmät havainnot kohteen tutkimuksista.

Kohde	Löydökset
Asuinkerrostalo 4 krs	Katon kosteusvaurioiden paikantaminen. Ongelma-alue havaittiin.
Kaupungintalo	Lähtötiedot peruskorjausta varten. Eristevika vesikatolla.
Asuinkerrostalo 5 krs	Ullakon lämpövuodot + poistoilman lämpöhäviöt
Omakotitalo	Tiiveys ei muuttunut höyrynsulun purkamisen jälkeen
Asuinkerrostalo	Ikkuna-asennuksen laadunvarmistus. Ei löydöksiä alipaineen takia.
Rivitalo 4 taloa	Yläpohjan eristevirheiden paikantaminen. Räystään lämpövuodot.
Asuinkerrostalo 14 krs	Yhdessä elementtisaumassa havaittiin lieviä eristevikoja.
Asuinkerrostalo 8 krs	Poistoilmahuippareiden kautta syntyvät lämpövuodot. Rakennuksen päädyissä melko suuria eristevirheitä.
Asuinkerrostalo 8 krs	Poistoilmahuippareiden kautta syntyvät lämpövuodot.
Toimistokerrostalo 8 krs	Ei merkittäviä löydöksiä. Julkisivussa eristevikoja.
Uimahalli	Merkittäviä eristevikoja yläpohjan ja ulkoseinien elementtisaumoissa sekä ilmavuotoja liitoksissa.
Kauppa-keskus 1-2 krs	Merkittäviä eristevikoja yläpohjan elementtisaumoissa sekä ilmavuotoja elementtiliitoksissa.
Teollisuushalli	Vesikatkon vuotopaikkojen havainnointi. Vuotopaikat havaittiin.

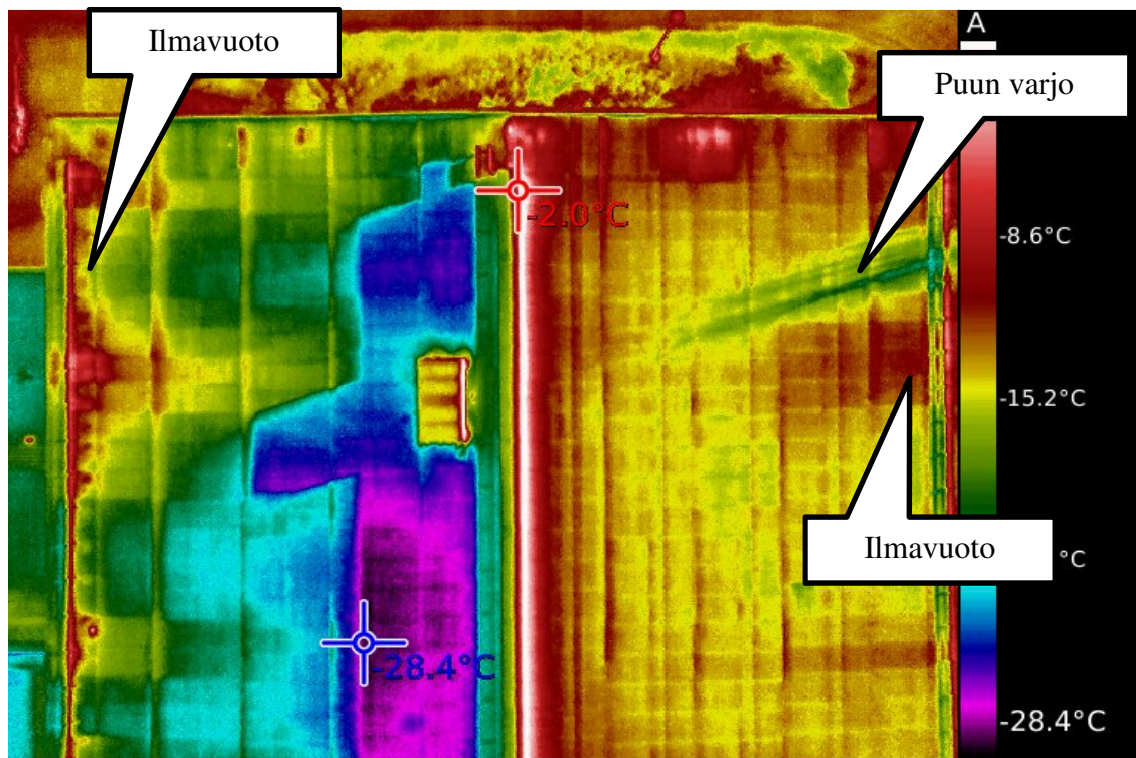
Taulukko 8c. UAV-kuvauksen ja perinteisen lämpökuvauksen vertailutaulukko. UAV-kuvauksen ja perinteisen lämpökuvauksen vertailut. Ilmalämpökuvauksen hyötyjä arvioitiin 5 eri kriteerillä jokaisessa tutkimuskohteessa.

Rakennusvuosi	Kohde	Aikasäästö	Kustannussäästö	Työturvallisuus	Havainnon selkeys	Muiden tutkimusten poistuminen	Keskiarvo
1880	Asuinkerrostalo 4 krs	5	4	5	2	3	3,8
1910	Kaupungintalo	5	4	5	4	5	4,6
1913	Asuinkerrostalo 5krs	5	5	5	3	2	4
1940	Omakotitalo	2	2	3	5	2	2,8
1960	Asuinkerrostalo	1	1	5	0	1	1,6
1970	Rivitalo 4 taloa	4	4	5	4	3	4
1978	Asuinkerrostalo 14krs	5	4	5	4	3	4,2
1979	Asuinkerrostalo 8krs	5	3	5	5	4	4,4
1980	Asuinkerrostalo 8krs	5	4	5	4	4	4,4
1990	Toimistokerrostalo 8krs	3	3	5	4	3	3,6
2010	Uimahalli	5	5	5	5	4	4,8
2018	Kauppakeskus 1-2 krs	5	5	5	5	3	4,6
2019	Teollisuushalli	4	4	5	1	2	3,2

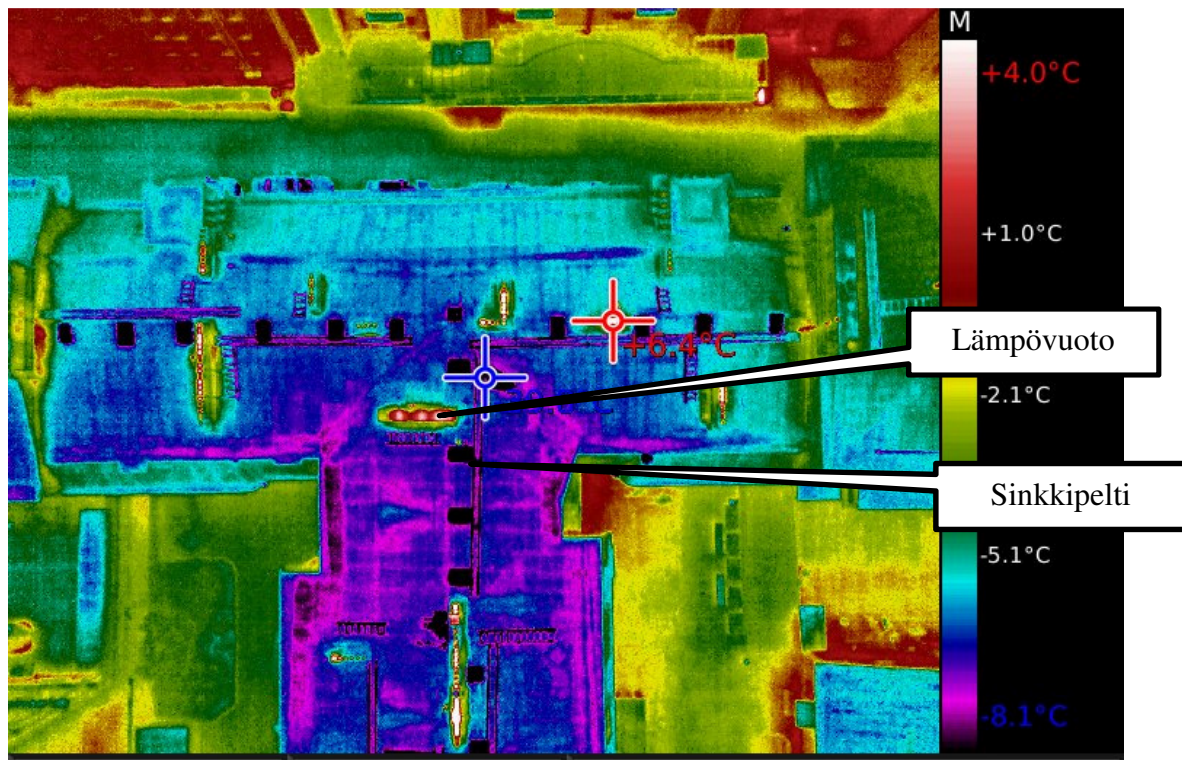
Vertailutaulukossa 8c on pyritty ottamaan puolueettomasti kantaa eri osatekijöihin ja arvioitu menetelmän hyötyjä suhteessa perinteiseen lämpökuvaukseen sekä muihin tutkimusmenetelmiin.

6. LÄMPÖKUVIEN TULKINTA

Tutkimuksissa vahvistui käsitys, että matalaemissiivisten pintojen lämpökuvaaminen onnistuu vain pilvisellä säällä ja silloin kun kattopinnasta alkaa jäähärmä sulamaan. Tämän tyyppisiä pintoja ovat mm. sinkitty pelti, kiiltävä kupari ja alumiini. Avaruuden taustasäteilyllä ja auringon säteilyenergialla on suuri merkitys katto- ja julkisivujen pintalämpötilaan ja siten koko rakenteen lämpökäyttäytymiseen. Tämän takia molemmat säteilyilmiöt ovat otettava ammattitaitoisesti huomioon tulosten tulkinnassa.



Kuva 44. Esimerkilämpökuva jossa näkyy auringon säteilyn aiheuttamia lämpöjälkiä sekä ilmavuotojen aiheuttamia jälkiä. Kohteessa on ylipaine +50Pa.



Kuva 45. 1910-luvun asuinkerrostalon kattolämpökuva. Mustat alueet ovat katon alipainetuulettimia sinkkipelistä tehtynä. Vaaleat kohdat ovat poistoilmahormien lämpöhäviöt.

Julkisivukuvauksissa on huomioitava pintojen heijastukset, kuten ikkunalasien ja lasitettujen klinkkerilaattojen tasoheijastus. Erilaiset metallipinnoitteet julkisivuissa ovat matalaemissiivisiä, joiden pintalämpötiloja ei pystytä luotettavasti määrittämään lämpökuvauksella.

7. YHTEENVETO

UAV lämpökuvaus soveltuu hyvin rakennuksen kokonaisvaltaiseen lämpökuvaukseen. Menetelmä on nopea ja riittävän tarkka, jolla voidaan havainnoida kokonaisvaltaisesti rakennuksen lämpöhäviöitä, eristevirheitä, kostuneita rakenteita jne.

Maasta käsin tehtävällä ulkokuvauksella saadaan kohtalaisen hyvin matalien rakennusten julkisivukuvaukset toteutettua pilvisellä sääolosuhteella.

UAV lämpökuvaus mahdollistaa kattojen lämpökuvauksen ja korkeiden rakennusten julkisivukuvaus myös erilaisilla sääolosuhteilla, kunhan sään vaihtelut otetaan kuvauksen tulkinnassa huomioon.

Suurten rakennusten ylipaineistaminen ja UAV lämpökuvaus on tehokas menetelmä kattorakenteiden ilmavuotojen paikantamiseen. Kosteusvaurioituneet kattorakenteen voidaan havaita myös UAV lämpökuvauksella.

Ilmavuotojen paikantaminen lämpökuvauksen avulla edellyttää aina painesuhteiden hallintaa ja tarvittaessa on tehtävä tehostettu paine-ero. Alipaineella havaitaan sisäpuolisella kuvauksella ilmavuodot ja vastaavasti ylipaineistamalla havaitaan ulkopuolisella kuvauksella ilmavuodot. Painero ei välttämättä tarvitse olla kovin suuri jos lämpötila-ero on riittävä ja paine-eron on annettu vaikuttaa riittävän pitkään.

Ilmavuotojen paikantamiseen ohjeena voidaan antaa seuraavia vaatimuksia:

- I. Lämpötilaeron tulisi olla vähintään 5 C astetta. Suositeltavaa kuitenkin vähintään 10 C.
- II. Paine-eron tulisi olla vähintään 15Pa. Suositeltavaa kuitenkin vähintään 30Pa.
- III. Paine-eron tulisi vaikuttaa, ennen lämpökuvausta, vähintään 30 min. Suositeltavaa kuitenkin vähintään 60 min.

Sisäkuvauksella voidaan parhaiten arvioida sisätilojen asumisviihtyvyyttä. Asuintiloissa olevien yksittäisten ilmavuotojen paikantamiseen ja vakavuuden arviointiin, sisäpuolinen lämpökuvaus on tarkempi kuin UAV lämpökuvaus.

Ulkolämpökuvien kuvaaminen ja tulkinta vaatii paljon enemmän ammattitaitoa ja kokemusta, kuin sisäkuvauksien toteuttaminen.

Eri lämpökameroiden ja menetelmien (käsikuvaus ja UAV-lämpökuvaus kahdella eri laitteistolla) tuottaa samaa tietoa ja niitä voidaan pitää luotettavana.

Luotettavan ilmalämpökuvauksen tekemiseen vaaditaan riittävän hyvälaatuista lämpökameraa (resoluutio ja erottelukyky) sekä kokenutta lämpökuvauksen osaajaa, jolla on lisäksi hyvin vahva rakennusalan osaaminen. Rakennusten lämpökuvauksesta on oppikirja, jonka sisältö kokonaisuudessaan on oltava hallinnassa, UAV lämpökuvauksen onnistumiseksi.

8. KIRJALLISUUSLUETTELO

Keränen Henri: Miehitämättömien ilma-alusten käyttö lämpökuvauksessa. Metropolia Ammattikorkeakoulu (AMK) Kone-ja tuotantotekniikka, Insinöörityö 2017.

Paloniitty Sauli, Paloniitty Juho, Haimilahti Jouni: Rakennusten lämpökuvaus. julkaisu 2016. Rakennusteollisuus 2016.

RT 14-10239 Rakennuksen lämpökuvaus- RT kortti. Rakennusteollisuus 2005.

Taponen Teemu: Lämpökuvaus miehitämättömällä ilma-aluksella, Automaatiotekniikan koulutusohjelma, Insinöörityö 2014.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Valovirta, I., Mikkilä, A. & Jokisalo, J. 2005a. Puurunkoisten pientalojen kosteus- ja lämpötilaolosuhteet, ilmanvaihto ja ilmatiiviys. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti 131. 102 s. + 10 liites.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä, A. & Käkelä, P. 2005b. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Talonrakennustekniikan laboratorio, Tutkimusraportti 129. 101 s. + 211 liites.

Vinha, J., Korpi, M., Kalamees, T., Jokisalo, J., Eskola, L., Palonen, J., Kurnitski, J., Aho, H., Salminen, M., Salminen, K. & Keto, M. 2009. Asuinrakennusten ilmanpitävyys, sisäilmasto ja energiatalous. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 140. 148 s. + 19 liites.

Vinha J., Laukkarinen A., Mäkitalo M., Nurmi S., Huttunen P., Pakkanen T., Kero P., Manelius E., Lahdensivu J., Köliö A., Lähdesmäki K., Piironen J., Kuhno V., Pirinen M., Aaltonen A., Suonketo J., Jokisalo J., Teriö O., Koskenvesa A., Palolahti T. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristyksen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. 2013. Tampere, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan laitos, Rakennetekniikka, Tutkimusraportti 159. 354 s. + 43 liites.

Ympäristöopas 2016. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. toim. Pitkäranta M. Ympäristöministeriö. Helsinki

Ympäristöministeriön julkaisu 2019:18. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. toim. Weijo I, Lahdensivu J, Turunen T, Ahola S, Sistonen E, Vornanen-Winqvist C, Annila P. Ympäristöministeriö. 2019.

Björkholtz D., 1987. Lämpö ja kosteus: rakennusfysiikka. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki.

STM. Asumisterveysasetus 545/2015.

Valvira. Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeet. Osa I-V. 2016.