



Karelia-ammattikorkeakoulu
Rakennusinsinööri (AMK)

Painumattoman hirsirakenteen painumat ja ilmatiiveys

Nico Räty

Opinnäytetyö, Kesäkuu 2022

www.karelia.fi



OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2022
Rakennustekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600 (vaihde)

Tekijä(t)
Nico Rätty

Nimeke
Painumattoman hirsirakenteen painumat ja ilmatiiveys

Toimeksiantaja
Karelia-ammattikorkeakoulu

Tiivistelmä

Opinnäytetyön toimeksiantajana on Karelia-ammattikorkeakoulu. Työssä tarkastellaan painumattomasta lamellihirrestä valmistetun koerakenteen painumista ja sen vaikutusta rakenteen ilmatiiveyteen. Rakenteen ilmatiiveyttä mitataan Minneapolis Blower Door DG-100 - painekoelaitteistolla ja lisäksi rakenteen ilmapuotokohdat todennetaan lämpökamera kuvauksin. Painumaa seurataan siirtymäantureilla, joita koerakenteeseen on asennettu kolme kappaletta. Näiden lisäksi rakenteesta löytyy useita lämpötilan ja suhteellisen kosteuden antureita.

Koerakenne on Pellopuu Oy:n toimittama noin 7m² lattiapinta-alaltaan oleva hirsirakenus, josta löytyy kolmea eri nurkkasalvostyyppiä sekä kahta erikorkuista hirttä. Ilmatiiveysmittaukset suoritetaan SFS-EN ISO 9972:2015-standardin mukaisesti ja lämpökamerakuvaus toteutetaan RT 14-11239:2016-ohjekortin mukaisesti.

Lopputuloksena todetaan, että hirsirakenteen painumisen syyllä on merkitystä tiiveyteen: kun painuminen johtuu hirsien kokoonpuristumisesta ja hirsisaumoissa olevasta väljyydestä, rakenne tiivistyy. Kun taas rakenteen painuminen johtuu kuivumisen aiheuttamasta kutistumasta voi rakenteen saumoissa tapahtua väljistymistä.

Kieli
suomi

Sivuja 47
Liitteet 3
Liitesivumäärä 12

Asiasanat

hirsirakentaminen, ilmatiiveys, lämpökuvaus, painuma



THESIS
June 2022
Degree Programme in Construction Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author (s)
Nico Rätty

Title
Settlings and air tightness of the undepressed log structure

Commissioned by
Karelia University of Applied Sciences

Summary

The thesis was commissioned by Karelia University of Applied Sciences. The work examined the settling of an experimental structure made of non-settling lamella logs and its effect on the airtightness of the structure. The air tightness of the structure was measured with Minneapolis Blower Door DG-100 pressure test equipment, and in addition, the air leaks of the structure was verified by thermal imaging. The settling was monitored by displacement sensors fitted in three pieces in the test structure. In addition to these, there were several temperature and relative humidity sensors in the structure.

The test structure was a log building with a floor area of approximately 7 m² supplied by Pellopuu Oy, where you can find three different types of joints and two logs of different heights. Airtightness measurements were performed in accordance with the SFS-EN ISO 9972: 2015 standard and thermal imaging were performed in accordance with the RT 14-11239: 2016 instruction card.

As a result, it is stated that the cause for the settling of the log structure is relevant for the tightness: when the settling is due to the looseness in the log joints, the structure tightens. On the other hand, when the settling of the structure is due to shrinkage caused by drying, loosening can occur in the structure.

Language
Finnish

Pages 47
Appendices 3
Pages of Appendices 12

Keywords

log construction, airtightness, thermal imaging, settling

Sisältö

1	Johdanto	5
2	Hirsirakentaminen	6
2.1	Puun ominaisuudet	7
2.2	Painuma	10
3	Ilmatiiveys	10
3.1	Tiiveyden varmistus	11
3.2	Ilmatiiveys hirsitaloissa	12
3.3	Ilmatiiveyden mittaaminen	12
4	Lämpökuvaus	14
4.1	Laitteisto	14
5	Tutkimuskohde	15
5.1	Rakenne	16
6	Ensimmäinen vaihe.....	17
6.1	Kuormitus ja painumat	18
6.2	Ensimmäisen vaiheen tiiveysmittaus	20
7	Toinen vaihe	21
7.1	Muodonmuutokset ja painuma	21
7.2	Kuvaajan tarkastelu	23
7.3	Lämpökamerakuvaus	26
7.4	Toisen vaiheen tiiveysmittaus	30
8	Yhteenveto.....	32
9	Pohdinta.....	33
	Lähteet.....	35

Liitteet

- Liite 1. Seinäkaaviot
- Liite 2. Mittaustulokset
- Liite 3. Lämpökamerakuvat

1 Johdanto

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää lamellihirsistä valmistetun koerakenteen painumakäyttäytymistä lämpö- ja kosteusolosuhteiden muuttuessa ja sen vaikutusta rakenteen ilmatiiveyteen. Koerakenteessa käytettiin kahta erikorkuista lamellihirttä ja kolmea erilaista nurkkasalvostyyppiä, joiden painumaeroja sekä ilmatiiveyttä pyrittiin selvittämään ja vertailemaan keskenään.

Hirsirakenteisen seinän ilmatiiveys perustuu pitkälti hirsien välisen varauksen ja nurkkasalvosten muotoiluun sekä niissä käytettävien tiivistysmateriaalien toimintaan. Rakennuksen ilmatiiveyteen vaikuttavat lisäksi hirteen liittyvien rakenteiden, kuten ylä- ja alapohjan väliset liitokset ja niitä lävistävien osien tiiveys.

Painumaton hirsirakenne vai painumaton hirsi. Markkinoilla on hirsirakenneljärjestelmiä, joissa painumattomuus perustuu asennustekniikoihin. Lisäksi on hirsirakenteita, joissa painumattomuus perustuu itse hirren painumattomuuteen. Näiden välinen ero on, että painumaton hirsi ei itsessään painu, mikä voidaan toteuttaa ainakin ristiin liimatulla hirsituotteella, jossa keskimäinen hirsilamelli on asetettu pystyyn, jolloin minimoidaan puun ominaisuuksista johtuva kosteuskutistuma. Asennusteknisesti toteutettu painumatonrakenne perustuu taas hirsien alhaiseen kosteuspitoisuuteen ja hirren profiilin muotoiluun. Kun tähän yhdistetään asennusaikana hirsien yhteen ruuvaus, jolla saumaväleistä otetaan jo asennusaikana kaikki väljyys pois, ei rakenne enää juurikaan painu.

Koerakenteesta mielenkiintoisen tekee se, että kyseessä on painumaton hirsi, jonka painumattomuus ei perustu ristiin liimaukseen vaan hirren profiilin muotoiluun ja siihen, että keskilamellina on käytetty erikoiskuivattua liimapalkkia. Tästä huolimatta puu on materiaalina altis kosteudenvaihteluille, jonka vaikutuksia painumaan ja sitä kautta ilmatiiveyteen tutkimuksessa pyrittiin selvittämään.

Koerakenteen tutkimukseen on toimittanut Pellopuu Oy. Tutkimuksen toimeksiantajana toimii Karelia-ammattikorkeakoulu.

2 Hirsirakentaminen

Hirsirakentaminen on merkittävä osa suomalaista kulttuuria, niin metsienhoidon ja puuntyöstötaidon kuin asumisenkin näkökulmasta. Suomalaista maisemaa koristavatkin useat hirsirakennukset vapaa-ajan asuntoina järvien rannoilla sekä maaseudulla ja taajamissa tavallisten perheiden koteina.

Nykyään tavoitellaan vihreämpää tulevaisuutta ja ympäristöystävällisempiä asu-
misenratkaisuja, mikä peilautuu vahvasti rakennusten energiankulutukseen ja
energiatehokkuuteen, joita voidaan hallita talotekniikan menetelmillä. Raken-
nusten ympäristövaikutuksia mitataan hiilijalanjäljellä, joka sisältää rakentami-
sesta ja käytönaikaisesta energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt. (Puuinfo
2022). Kun halutaan entistäkin pienempää hiilijalanjälkeä, täytyy puuttua raken-
tamisen aikaisiin päästöihin. Tällöin huomio kiinnittyy rakennusmateriaaleihin ja
suomalaisen metsän antimiin. Tämä on osaltaan näkynyt kiinnostuksen kas-
vuna hirsirakenteisiin asuntoihin.

Monelle ajatus ”hirsitalossa asuminen” herättää mielikuvan perinteisestä pyörö-
hirsisestä mökistä yhdessä lausahduksen ”painuu niin kauan, kunnes räystäät
ottaa maahan” saattamana. Nykyisin on kuitenkin tarjolla hirsijärjestelmiä ja
hirsituotteita, joilla saadaan moderniin asumiseen soveltuvia, rakennusmääräyk-
set täyttäviä, energiatehokkaita ja vähähiilisiä rakenneratkaisuja, jotka soveltu-
vat niin mökkirannoille kuin kaupunkien keskuksiin.

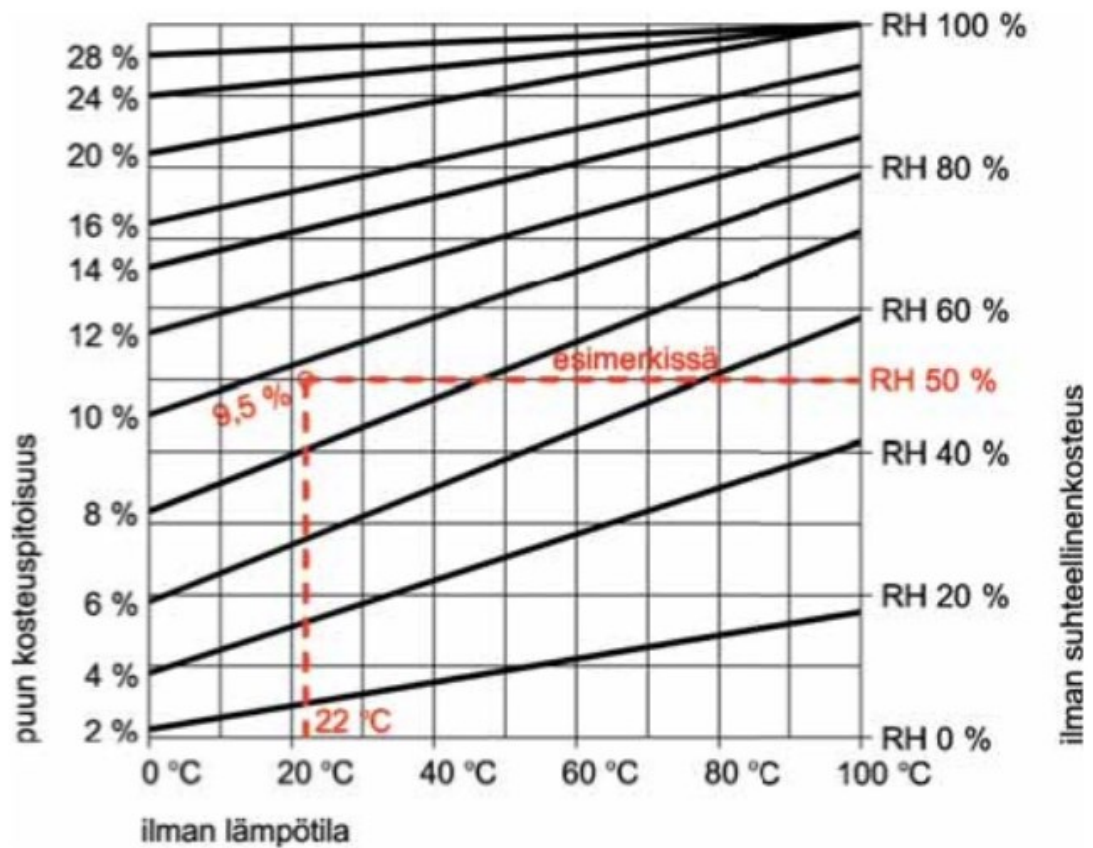
Haasteena hirsirakentamisessa on painuvien rakenteiden yhteensovittaminen
painumattomien rakenteiden kanssa. Tällöin joudutaan käyttämään liukuvia,
painuman sallivia rakenneosia, sekä kierrejalkoja pilareiden ja palkkien alla.
Näiden lisäksi täytyy rakenteeseen jättää painumavaroja muun muassa ovien,
ikkunoiden ja väliseinien liittymissä. Tähän ratkaisuna on kehitetty painumatto-
mia hirsituotteita sekä painuvista hirsistä valmistettuja painumattomia rakenne-
järjestelmiä.

2.1 Puun ominaisuudet

Hirsi eli puu on sekä anistrooppinen, että hygroskooppinen materiaali. Anistrooppisena materiaalina hirren ominaisuudet vaihtelevat tarkasteltavan suunnan mukaan, mikä vaikuttaa hirren kosteuskäyttäytymiseen ja lujuusominaisuuksiin. Puun kuivumisen aiheuttama kutistuminen on suurempaa kohtisuoraan syitä vasten, kuin puun syiden suunnassa. Hygroskooppisena materiaalina hirsi kykenee sitomaan ja luovuttamaan kosteutta ilman suhteellisen kosteuden vaihtelun mukaan. (Puuinfo 2020.)

Puulajilla on merkitystä puun kosteuskäyttäytymiselle. Männyn kuivuessa puun soluseinämiä huokosten läpät jäävät avonaiseksi pintapuussa, jolloin hygroskooppinen käyttäytyminen on nopeampaa verraten kuuseen, jonka huokosten läpät sulkeutuvat puun kuivuessa. Tällä ominaisuudella on myös vaikutusta puun kyllästettävyyteen ominaisuuksiin. Puun lujuus- ja jäykkyysominaisuudet paranevat puun kuivuessa. Tämä perustuu siihen, että puun kuivuessa soluseinämät liikkuvat lähemmäksi ja kiinnittyvät toisiinsa. Kuusen ja männyn välisillä lujuus- ja jäykkyysominaisuuksilla ei ole juurikaan eroa. (Puuinfo 2020.)

Puu pyrkii tasapainokosteustilaan, joka riippuu ilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta (Kuva 1). Tasapainokosteuden saavuttaminen on hidas prosessi ja Suomen ilmasto-oloissa ei juuri huomata vuorokauden aikana muutoksia. Kosteusvaihtelut ulottuvat hirsiseinässä noin 5 cm:n syvyydelle seinärakenteen molemmin puolin. Näin ollen, kun massiivisen seinärakenteen sisäosa saavuttaa tasapainokosteustilan, pitäisi kosteuden pysyä seinän sisällä lähes muuttumattomana pitkiäkin aikoja. (Hirsirakentamisen perusteet, 8.)



Kuva 1. Puun tasapainokosteus (Rakentajainkalenteri 2016, 486).

Wood Handbook, Wood as an Engineering material-kirjan osassa neljä käsitellään kosteuden suhdetta puun ominaisuuksiin. Oppaassa on annettu kaava (kaava 1) puun tasapainokosteuden määrittämiseen puulajista riippumatta.

$$EMC(\%) = \frac{1800}{w} \left[\frac{kh}{1-kh} + \frac{k_1kh + 2k_1k_2k^2h^2}{1+k_1kh + k_1k_2k^2h^2} \right] \quad (1)$$

$$W = 349 + 1,29T + 0,0135T^2$$

$$K = 0,805 + 0,000736T - 0,00000273T^2$$

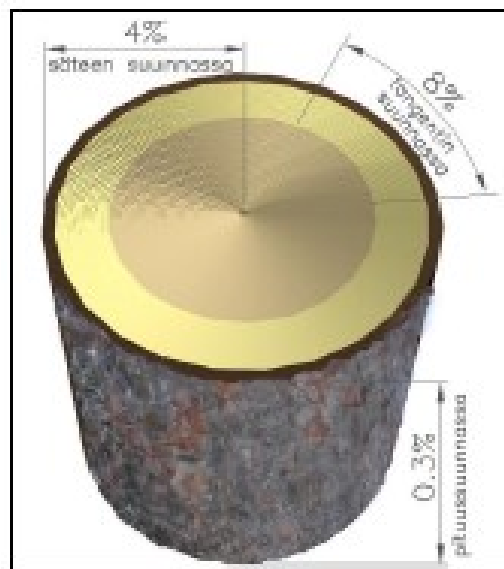
$$K_1 = 6,27 - 0,00938T - 0,000303T^2$$

$$K_2 = 1,91 + 0,0407T - 0,000293T^2$$

Kaava 1. Tasapainokosteuden määrittäminen (FPL 2010,4-3.)

Kaavassa h merkitsee suhteellisen kosteuden arvoa. Muut kertoimet ovat lämpötilan eri kertoimia silloin kun arvot määritellään celsiusasteita käyttäen $T=^{\circ}\text{C}$. Esimerkiksi lämpötilan ollessa 20°C ja ilman suhteellinen kosteuden ollessa 50 %, puun tasapainokosteus olisi noin 10 %.

Hirsirakenteissa kosteuseläminen näkyy rakenteen painumina ja puun halkeiluna. Pyörö- ja höylähirsillä painuminen johtuu hirren säteen suuntaisesta kutistumasta ja halkeilu puun tangentin suuntaisesta kutistumasta, joka on kaksinkertainen verrattuna säteen suuntaiseen kutistumaan. Tästä havainne piirros alla (Kuva 2.). Näistä muodonmuutoksista aiheutuu puun vetolujuuden ylittäviä sisäisiä jännityksiä, joiden seurauksena puuhun syntyy halkeamia. (Hirsirakentamisen perusteet, 7.)



Kuva 2. Kosteuselämisen aiheuttama muodonmuutos. (Hirsirakentamisen perusteet, 8).

2.2 Painuma

Puurakenteiden painumiseen vaikuttavat monet ilmiöt, kuten puun kokoonpuristuma kuormitettuna, väljyys varauksissa ja kuivumisen aiheuttama kutistuma. Näistä suurin osa johtuu kuitenkin edellä mainitusta puun kosteuspitoisuuden muutoksista. (Puuinfo 2016, 8.)

Teollisesti valmistettujen lamellihirsien koneellisen työstön tarkkuus ja esikuivaus yhdistettynä tarkkaan asennustyöhön pienentävät hirsien painuman noin 10 mm:iin seinämetriä kohden. Hirsirakenteissa kokoonpuristuma näkyy pääasiassa seinärakenteen varausten ja niiden välisten tiivisteiden painumisena. Painumisen aiheuttamaan tiivistymiseen vaikuttaa olennaisesti varauksen muoto ja siinä käytettävä saumatiiviste. Painumattomassa lamellihirressä keskimäinen hirsilamelli on asetettu pystyyn, näin painumattoman hirsirakenteen painuminen on samaa luokkaa rankarakenteisten seinien kanssa. (Hirsirakentamisen perusteet, 16–17.)

3 Ilmatiiveys

Rakennuksen ilmantiiveydellä on vaikutusta olennaisesti rakennuksen sisäilmaan, ominaisuuksiin, toimivuuteen ja asumisviihtyisyyteen. Mikäli rakennusvaipan tiiveydessä on puutteita, aiheuttaa se rakennukseen ylimääräistä energiankulutusta lämmitystarpeen määrän lisääntymisen johdosta.

Painovoimaisella ilmanvaihdolla toteutetuissa rakennuksissa rakenne on osittain ylipainenen, jolloin ilmapuodot kuljettavat rakennuksen sisältä kosteutta rakenteisiin, joka aiheuttaa riskin kosteusvauriolle. Tästä syystä rakennukset pyritään pitämään alipaineisena ja korvausilma tuomaan rakennukseen hallitusti. Hallitsemattomista ilmapuodoista rakennukseen kulkeutuu

epäpuhtauksia rakenteista tai sen ulkopuolelta esimerkiksi homeitiöitä ja pienhiukkasia. (Sisäilmayhdistys Ry 2008.)

Ilmatiiveysvaatimukset perustuvat rakennuksen lämpöhäviöiden hallintaan, joilla rakennusten energiatehokkuutta voidaan hallita. Hyvin hallittu ilmanvaihto rakennuksessa lisää energiatehokkuutta, asumisturvallisuutta sekä pienentää asuinkustannuksia. Rakennusvaipan muodostavat rakennekerrokset, jotka erottavat rakennuksen sisäilman ulkoilmasta. Näitä ovat yläpohja-, alapohja- ja seinärakenne. Rakennekerroksia lävistävät osat kuten ovet, ikkunat ja läpiviennit sekä niiden liitosten toteuttaminen asianmukaisesti ovat merkittävässä roolissa rakennusvaipan tiiveydessä. (Rakentajain kalenteri 2010, 385-387.)

Uusille rakennuksille suurin sallittu ilmanvuotoluku on $4,0\text{m}^3/(\text{h m}^2)$, jos ei voida erikseen todeta rakenteellisten ratkaisujen edellyttävän tätä suurempaa ilmavuotolukua. (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017, §27).

3.1 Tiiveyden varmistus

Rankarakenteisissa taloissa ilmatiiveys perustuu pääasiassa ilman- ja höyrynsulkukalvon liitoskohtien ja niitä lävistävien osien läpivientien tiiveyteen. Tämä varmistetaan sillä, että ilman- ja höyrynsulkukalvot on limitetty riittävästi: yleensä yhden koolausvälin yli, kuitenkin vähintään 150 mm. Lisäksi saumakohdissa saumat tiivistetään koko sauman matkalta joko teippaamalla, liimaamalla tai kittaamalla. Liitoksen pitkäaikaiskestävyyden varmistamiseksi tehdään liitoskohtaan puristusliitos. Puristusliitoksessa kalvot puristetaan kahden jäykän materiaalin väliin joko ruuvaamalla tai naulaamalla.

(Rakentajain kalenteri 2010, 387-388.)

Läpivientejä tulisi tehdä vain välttämätön määrä ja sijoittaa ne niin, että huolellinen tiivistäminen valmiita läpivientilaippoja tai solumuovieristelevystä tehtyjä kauluksia hyödyntämällä on mahdollista. (RT-80 10974, 2009, 7). Jos rakenne, jonka läpi läpiviennit tehdään, toimii jo itsessään ilman- ja höyrynsulkuna (esimerkiksi Betoni- tai massiivipuiset rakenteet) läpiviennit tiivistetään kittaamalla tai vaahdottamalla elastisella massalla. Useissa tapauksissa on kuitenkin mahdollista hyödyntää esivalmistettuja läpivientikappaleita ja kauluksia. (RT-80 10974, 2009, 9.) Läpivientien tiivistyksessä on myös huomioitava, etteivät läpiviennit heikennä rakennusosan osastoivuutta palotilanteissa (Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 848/2017, §18).

3.2 Ilmatiiveys hirsitaloissa

Hirsitaloissa rakennusvaipan ilmatiiveys muodostuu hirsien välisten saumojen, nurkkasalvosten tyyppin sekä ylä- ja alapohjan liitosten tiiveydestä. Seinärakenne saavuttaa vaaditun tiiviyden yleensä hirsien välisten varausten muotoilulla ja niissä käytettävillä tiivisteillä. Hirsitalon tiiveydelle on olennaista, että myös seinärakenteeseen liittyvät ylä- ja alapohjarakenteiden liitokset on toteutettu huolellisesti. Etenkin painuvissa hirsirakenteissa on huomioitava, että ilman- ja höyrynsulkurakenteet sallivat rakenteen painumisen rikkoontumatta. (Hirsirakentamisen perusteet, 16.)

3.3 Ilmatiiveyden mittaaminen

Eurooppalainen standardi SFS-EN ISO 9972, joka on hyväksytty suomalaiseksi kansalliseksi standardiksi, määrittää ilmatiiveysmittauksen menetelmät, tarvittavat mittalaitteet ja niiden mittaustarkkuuden raja-arvot. Mittalaitteiston vaatimukset standardin mukaan ovat, että mittaustulokset pystytään lukemaan ilmanpaineen osalta tarkkuudella ± 1 Pa, 0-100 Pa:n vaihteluvälillä, ilmanvirtaus määrät ± 7 % tarkkuudella ja lämpötila $\pm 0,5$ °C tarkkuudella. Tiiveysmittauskoe

tulisi suorittaa silloin, kun ulkoiset olosuhteet ovat optimaaliset eli tyynenä päivänä, sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron ollessa pieni. Kuitenkaan aina näin ei ole, joten mittaustulokseen on otettava huomioon erinäisiä korjauskertoimia, joilla huomioidaan sääolosuhteet. (SFS-EN ISO-9972 2015, 9.)

Painekokeessa rakennus yli- tai alipaineistetaan. Ulkovaipan läpi tapahtuvaa ilman tilavuusvirtaa mitataan viidellä eri paine-erolla vähintään 50 Pa paine-eroon asti. Ilmanvuotoluku lasketaan jakamalla ilmantilavuusvirta, joka tarvitaan 50 Pa:n paine-eron saavuttamiseksi rakennuksen sisätilavuudella (kaava 2) (RT-80-10974, 2009, 11).

$$n_{50} = \frac{V'}{V} \quad (2)$$

Kaavassa 2:

V' tarkoittaa ilman tilavuusvirtaa, joka tarvitaan 50 Pa:n paine-eron saavuttamiseksi rakennuksen vaipan yli [m^3/h]

V tarkoittaa rakennuksen sisätilavuutta [m^3]

On kuitenkin huomioitava että n_{50} -luku pienenee rakennuksen tilavuuden kasvaessa, mikä antaa virheellisen käsityksen rakennuksen vaipan ilmanpitävyydestä. Tämä johtuu siitä, että talon tilavuus suhteessa vaipan pinta-alaan kasvaa. Tästä johtuen ulkovaipan todellista ilmanpitävyyttä on syytä arvioida q_{50} -luvulla, joka voidaan määrittää n_{50} luvusta (kaava 3).

$$q_{50} = n_{50} \cdot \frac{V}{A_E} \quad (3)$$

Kaavassa 3:

A_E Tarkoittaa rakennuksen vaipan pinta-alaa sisämittojen mukaan laskettuna [m^2]

4 Lämpökuvaus

Lämpökamerakuvaus on pääasiassa laadunvarmistusmenetelmä, jolla varmistetaan onko rakenne lämpöteknisesti toimiva. Kuvauksilla voidaan selvittää onko rakenteessa kylmäsiltoja, ilmavuotoja tai puutteita lämmöneristyksissä rakenteita rikkomatta. Lämpökamerakuvausta pystytään hyödyntämään rakennusaikaiseen laadunvarmistukseen tai sillä voidaan arvioida jo olemassa olevan rakennuksen lämpötekniistä toimivuutta. (RT-14-11239 2016, 1.)

Lämpökamera toimii lämpösäteilyn vastaanottimena. Lämpösäteily on infrapunasäteilyä, jonka voimakkuus riippuu mitattavan kappaleen pintalämpötilasta. Kappaleen lähettämään säteilyn määrään vaikuttaa myös kappaleen heijastama säteily, joka otetaan huomioon emissiokertoimen avulla. Emissiokertoimella kumotaan mitattavasta pinnasta heijastuvan säteilyn määrä, jolloin kamera laskee pintalämpötilan vain kappaleen omasta säteilyn määrästä. (RT-14-11239, 2016, 6.)

4.1 Laitteisto

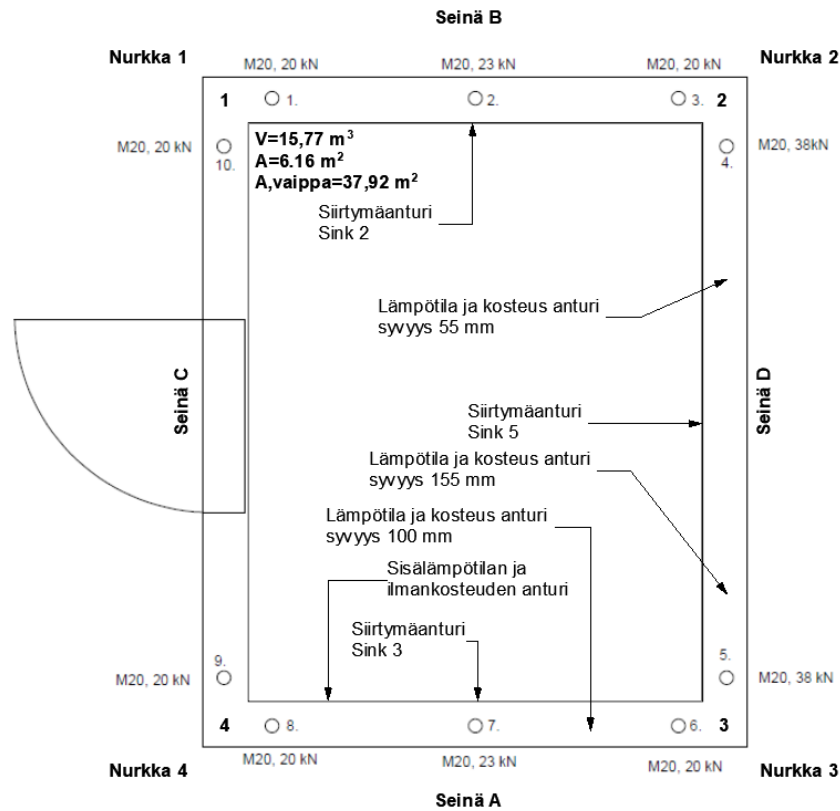
Ilmavuotojen paikannuksessa lämpökameran vähimmäisvaatimuksiin vaikuttavat kuvauslaitteen lisäksi myös kuvaushetken olosuhteet. Lähtökohtaisesti kameran tulisi olla kuvantava mittalaite, jolla voidaan mitata suoraan pintalämpötiloja. Lisäksi kamerassa tulisi olla tallennusominaisuus tulosten analysointia varten. Laitteen kunnosta on pidettävä huolta, eli kamera tulisi kalibroida vähintään kahden vuoden välein, joko laitteen valmistajan, maahantuojan tai siihen valtuutetun laitoksen toimesta. Itse kuvaaja on vastuussa siitä, että laite on kalibroitu ja tästä on pyydettäessä esitettävä kalibrointitodistus. (RT 14-11239, 2016, 2016, 2.)

Lämpökuvauksessa tarvitaan myös muita mittalaitteita itse kameran lisäksi. Näitä ovat paine-eromittari ja lämpötilamittari. Lisälaitteilla pystytään todentamaan kuvaushetken olosuhteet, joilla on olennaisesti vaikutusta lämpökuvauksen luotettavuuteen. (RT 14-11239, 2016, 2016, 2.)

Ilmavuotoja paikannattaessa edellytetään, että sisä- ja ulkotilojen välillä on vähintään 5°C lämpötilaero ja 50Pa:n paine-ero. Näissä olosuhteissa kameran vähimmäisvaatimuksena on, että lämpökameran resoluutio on vähintään 19000 pikseliä ja erottelukyky saa olla enintään 0,1 astetta. Näiden lisäksi kuvauksen suorittajan on suoritettava kosketuspintalämpötila-anturilla vertailumittaus, jolla todetaan lämpökameran ilmoittaman pintalämpötilan paikkaansapitävyys. (RT 14-11239, 2016, 2016, 2.)

5 Tutkimuskohde

Tutkimuskohteena on Pellopuu Oy:n toimittama hirsirakenteinen mökki. Koerakenne koostuu kahdesta eri korkuisesta hirrestä sekä kolmesta eri nurkkasalvos tyypistä. Koerakenteeseen asennettiin siirtymäanturit seinille A, B ja D painumien seuranta varten. Olosuhteiden seuranta varten rakenteeseen oli sijoitettu lämpötilaa sekä suhteellista kosteutta mittaavat anturit sisä- ja ulkopuolelle. Lisäksi hirsiiin oli porattu kolmeen eri syvyyteen lämpötilaa ja suhteellista kosteutta mittaavat anturit. Antureiden sijainnit kuvassa 3.



Kuva 3. Antureiden sijainnit.

5.1 Rakenne

Koerakenteen A, B ja C-seinät ovat valmistettu 200 mm leveästä ja 360 mm korkeasta lamellihirrestä. D-Seinä on valmistettu 200 mm leveästä ja 720 mm korkeasta lamellihirrestä. Hirsirakenteen seinäkaaviot liitteessä 1.

Nurkissa on käytössä erilaiset salvostyytit. Nurkan C-B salvostyyppi on Tirolinurkka. Nurkissa B-D ja A-D salvostyyppinä on Elementtinurkka. Nurkan C-A tyyppi on Kartiolohepyrstönurkka. Erilaiset nurkkatyytit ovat kuvattuna kuvassa 4.



Kuva 4 Vasemmalta oikealle: Tirolinurkka, Elementtinurkka, Kartiolohenpirstönurkka. (Pellopuu Oy. 2021).

Koerakenteen ylä- ja alapohjarakenne sisältä ulos: Vaneri, Höyrynsulkumuovi, vasat+ mineraalivillaeriste. Höyrynsulkumuovi on teipattu hirren pintaan tiiviisti höyrynsulkuteipillä ja sen päälle on ruuvattu rima liitoksen kestävyyslisämiseksi. Näin menettelemällä varmistetaan, että höyrysulun liitokset kestävät painekoelaitteiston aiheuttamat rasitukset ja tulokset kuvaavat itse seinärakenteen ja nurkkasalvosten ilmatiiveyttä.

6 Ensimmäinen vaihe

Tutkimus aloitettiin rakenteen pystytyksen jälkeen tehtävällä tiiveysmittauksella. Tämän jälkeen koerakenteen seinille aiheutettiin pystykuormitusta, seiniin asetettuja kierretankoja kiristämällä kahdessa eri vaiheessa. Ensin rakennetta kuormitettiin 60 % tavoitekuormasta, joka vastaa 14,4 kN/m kuormitusta seinärakenteelle. Lopuksi kierretangot kiristettiin 100 % kuormitukselle, joka vastaa 24kN/m kuormitusta. 60 % kuormitus vastaisi karkeasti laskettuna Itä-Suomen talviolosuhteita rakennuksessa, jonka kattoristikoiden jänneväli on 6,4m ja räystäspituus 0,8m. 100 % kuormituksella tilanne vastaisi saman kokoluokan rakennusta, mutta lumikuormitus vastaisi suomen Lapin olosuhteita. Kuormitusvaiheiden välillä rakenteelle suoritettiin tiiveysmittaukset ja lopuksi vertailtiin tapahtuneen painuman ja rakenteen tiiveyden yhteyttä keskenään.

6.1 Kuormitus ja painumat

Tuloksista huomataan, että hirsirakenteinen seinä painuu vielä huolellisenkin asennustyön jälkeen, kuten kuvasta 5 voidaan nähdä. Kuormituksen alussa 60 % kuormituksella vähiten painumaa tapahtui seinällä B. Vielä 100 % kuormituksella B-seinällä painuma oli alhaisin, D-seinä kuitenkin painui edelliseen tulokseen verrattuna vähemmän kuin B-seinä. Seuraavan viikon aikana rakenteen painuminen tasoittui. Ja painumat ensimmäisen viikon ajalta täydellä kuormituksella olivat seuraavanlaiset:

-Seinä D = 3,47 mm.

-Seinä B = 4,07 mm.

-Seinä A = 5,13 mm.



Kuva 5. Ensimmäisen viikon painumat.

Odotusten mukaisesti vähiten painumia tapahtui seinällä-D, jossa on vain kolme vaakasaumaa hirsien korkeudesta johtuen. Saumojen lukumäärä peilautuu suoraan painuman määrään, sillä pääasiassa painuminen muodostuu alussa hirsien ja niiden välisten saumojen kokoonpuristumasta. Kokoonpuristuman määrää voidaan arvioida Hooken laista johdetulla kaavalla (Kaava 4.).

$$\Delta h = \frac{F \cdot h}{E_{90,mean,fin} \cdot A} \quad (4)$$

Kaavassa 4:

F= Puristava voima [N]

h= Rakenteen korkeus [mm]

$E_{90,mean,fin} = \frac{E_{90,mean}}{(1+k_{def})}$ = Kimmokerroin, huomioituna k_{def} arvolla [N/mm²]

k_{def} = Virumaluku

A= Puristuspinna pinta-ala = Hirren pituus · Hirren leveys [mm²]

Taulukossa 1 on esitetty rakenteessa tapahtuneet painumat ja kaavalla 4 laskettu kokoonpuristuman määrä 60 ja 100 prosentin kuormituksella. Täydellä kuormituksella hirsien laskettu kokoonpuristuma olisi 1,68 mm. Taulukkoon on korostettu keltaisella B-seinän painuma, koska seinän todellinen painuma oli pienempi kuin laskennallinen painuma. Tämä voi johtua siitä, että hirsiseinä on pystytetty erittäin huolellisesti, jolloin seinälle syntyvä painuma on kokonaisuudessaan hirren kokoonpuristumisesta johtuvaa. Kun rakenteelle saavutettiin 100 % kuormitus, niin painumasta noin 60 % johtuu hirsien kokoonpuristumisesta A-seinää lukuun ottamatta. Loput painumasta muodostuu oletettavasti saumatiivisteden litistymisestä ja hirsien puristuessa tiiviisti vastakkain.

Ensimmäisen vaiheen painumat	B-Seinä [mm]	A-Seinä [mm]	D-Seinä [mm]	Painuman määrä ilman kokoonpuristumaa [mm]			Kokoonpuristuma koko rakenteen korkeudella [mm]
				B-Seinä	A-Seinä	D-Seinä	
60% kuormitus	0,83	1,65	1,27	-0,15	0,67	0,29	0,98
100% kuormitus	2,49	4,14	2,69	0,81	2,46	1,01	1,68
Ensimmäisen viikon kokonaispainumat	4,07	5,13	3,47				
100% kuormituksen jälkeen tapahtunut painuma	1,58	0,99	0,78				

Taulukko 1. Ensimmäisen vaiheen painumat.

Vaikka seinällä A todettiin suurin painuma viikon päätteeksi, niin jos katsotaan painuman määrää aina edelliseen tulokseen verrattuna niin silloin A-seinä painuu suhteessa vähemmän verrattuna B-seinään. Vaikka seinät A ja B on

kasattu samankokoisilla hirsillä, siitä huolimatta seinien painumissa havaittiin eroa noin 0,59 millimetriä. Osa tapahtuneesta painumaerosta voisi selittyä seinien vaakasaumojen määrällä, joita A-seinällä on seitsemän ja B-seinällä kahdeksan. Tämä johtuu siitä, että B-seinä on aloitettu puolikkaalla ja A-seinä täydellä hirrellä, jolloin B-seinälle tulee yksi sauma enemmän. Nurkkasalvoksien osallisuus painumaeroissa voi myös olla mahdollinen, sillä A-seinän salvokset ovat toisiaan vasten ruuvattuina kun taas B-seinän salvos C-seinälle on toteutettu tuomalla aina vastakkaisen seinän hirsi edellisen päälle. Tällä voi olla vaikutusta kuormitusmenetelmästä johtuen, sillä C-seinälle asetettu kierretanko voi siirtää hirsien päiden välityksellä kuormaa tehokkaammin seinälle B. Tästä johtuen seinällä B voi olla enemmän kuormaa kuin seinällä A.

6.2 Ensimmäisen vaiheen tiiveysmittaus

Painuman vaikutusta ilmantiiveyteen verrattiin tekemällä tiiveysmittaukset ennen rakenteen kuormittamista, sekä ennen jokaista kuormitusvaihetta. Tiiveysmittauksissa on huomattavissa selkeää parannusta rakenteen tiiveydessä, jokaisen kuormitusvaiheen jälkeen rakenteen painuman myötä.

Alla esitetään ensimmäisen vaiheen tiiveysmittauksista saatuja tuloksia myöhemmin kappaleessa 7.4 on esitetty neljännen tiiveysmittauksen tulokset, kun painumaa on tapahtunut myös hirsien kuivumisen myötä.

Tiiveysmittauksien raportit liitteessä 2.

Mittaus 1:

Vaipan ilmanvuotoluku q_{E50} : 1,99 m³/(h m²)

Rakennuksen ilmanvuotoluku n_{50} : 4,77 1/h

Mittaus 2:

Vaipan ilmanvuotoluku q_{E50} : 0,79 m³/(h m²)

Rakennuksen ilmanvuotoluku n_{50} : 1,9 1/h

Mittaus 3:

Vaipan ilmanvuotoluku $qE50$: 0,58 m³/(h m²)

Rakennuksen ilmanvuotoluku $n50$: 1,39 1/h

Kolmannessa mittauksessa painekoelaitteisto kykeni suorittamaan testin ainoastaan kolmessa eri paine-erossa ja mittausepäätarkkuus mitatun ilmavirran suhteen oli $\pm 22,1$ %. SFS-EN ISO-9972 standardissa määritetty epätarkkuus arvo ilmavirtausmäärissä on ± 7 %, joten tuloksen luotettavuutta on käsiteltävä varauksella. Syy siihen, että mittaus pystyttiin suorittamaan vain kolmella eri paine-erolla johtui oletettavasti rakenteen pienestä tilavuudesta sekä tiiveydestä, jolloin laitteisto ei kykene niin alhaisiin kierrosnopeuksiin että testin vaatimat alle 50 Pa:n paine-erot voitaisiin saavuttaa.

7 Toinen vaihe

Tutkimuksen toisessa vaiheessa seurattiin seitsemän kuukauden ajan rakenteen painumisessa tapahtuvia muutoksia ja vertailtiin painumatuloksia muiden antureiden tietoihin ja aikaisempaan tutkimustietoon. Lisäksi toisessa vaiheessa suoritettiin lämpökamerakuvauksia ilmanvuotojen paikantamiseksi ja nurkkien vertailun vuoksi.

7.1 Muodonmuutokset ja painuma

Tasapainokosteutta ajatellen koerakenteen sisä- ja ulko-olosuhteita seuraamalla voidaan sanoa, että sisä-olosuhteet ajavat puuta kohti 6,7 % kosteutta ja ulko-olosuhteet keskimäärin taas kohti 15,2 % kosteutta. Keskiarvoisesti sisä- ja ulko-olosuhteista johdettuna puu asettuisi näissä oloissa noin 11 % kosteuteen. 100 mm ja 55 mm syvyydessä olevista antureista saatujen lämpötilojen ja suhteellisen kosteuden arvoista laskettiin kappaleessa 2.1 mainitulla kaavalla (Kaava1.) hirrentasapainokosteudeksi: 100 mm

syvyydestä 10,35 % ja 55 mm syvyydestä 9,12 %. Hirren keskilinjalla olevan anturin arvoista johdettu tasapaino kosteus vastaa sisä- ja ulko-olosuhteista johdettua tasapaino kosteuden arvoa ja 55 mm syvyydestä laskettu arvo tarkistettiin puun piikkikosteusmittarilla, joka antoi tulokseksi 9,2 %. Näihin perustuen voidaan hirsien kosteudelle antaa suuntaa antavia arvoja kaavan 1 mukaisesti, joilla voidaan määrittää puun kuivumisesta johtuvaa kutistumaa.

Wood Handbook oppaan osassa 13 on käsitelty puun kuivausta ja siitä johtuvia muodonmuutoksia. Oppaassa on todettu, että puun kosteuden ollessa 6-14 % voidaan Kaavalla 5 määrittää tarkasteltavan suunnan muodonmuutoksen suuruus käyttämällä tangentin ja säteen suuntaisia kertoimia. (FPL 2010,13-15.)

$$\Delta D = D_I [C_T (M_F - M_I)] \quad (5)$$

Kaavassa 5:

ΔD = muodonmuutoksen suuruus [mm]

D_I = tarkasteltavan suunnan pituus [mm]

C_T = muodonmuutoskerroin (Alaviite R=säteelle T=Tangentille)

M_F = lopputilanteen kosteus [%]

M_I = alkutilanteen kosteus [%]

Katsottaessa kuvaa 6 nähdään, että kuvan lamellihirsi tuotteessa uloimpien lamelleiden muodonmuutosta voidaan laskea tangentinsuuntaisella kertoimella painuman näkökannalta, kun taas keskimmäisiä lamelleja on tarkasteltava pääasiassa säteensuuntaisen muodonmuutoksen kertoimella.



Kuva 6. Lamellihirsi (Pellopuu Oy, 2022).

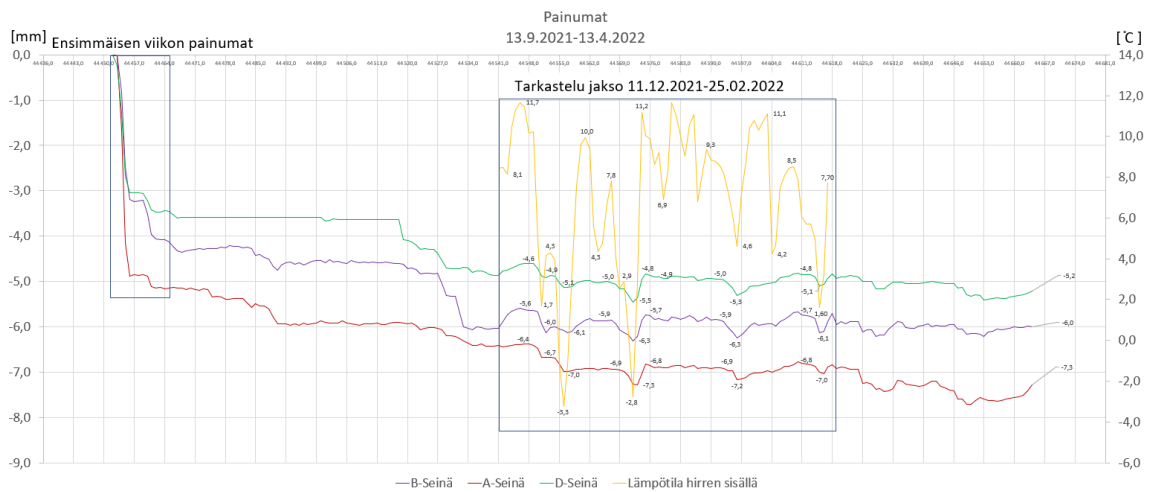
Hirsistä ei mitattu kosteutta tutkimuksen alussa, mutta hirressä 55 mm syvyydessä olevan anturin ilmoittaman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kautta johdettuna tasapainokosteus olisi alussa ollut ~12 %. Myös aiemmassa painumakokeessa todettiin samasta nipusta otettujen hirsien kosteudeksi 12,1-12,9 %.

Olettamuksiin pohjautuen hirret tulisivat näissä olosuhteissa asettumaan ~11 % kosteuteen eli hirsi kuivuu noin yhden prosenttiyksikön. Näillä arvoilla laskettuna säteen suuntaisella kertoimella, joka vastaisi hirren keskimmäisten lamellien painuman suuntaa, saadaan painuman suuruudeksi 3,74 millimetriä. Hirressä uloimpien lamellien kosteus kutistumasta johtuva painuma laskettaisiin kuitenkin tangentin suuntaisesti, jolloin painuman suuruus olisi 7,9 mm.

Kosteuspitoisuuden vaihtelusta johtuvan painuman määrä riippuu siis hirren kantavan pinnan sijainnista sekä siitä, miten päin lamellit on asetettu hirressä. Jos sisemmät lamellit on kaikki asetettu tangentin suuntaisesti painuma on suurempaa verrattuna säteensuuntaisesti asetettuna. Jos lamellien asentoa jokaisessa hirressä ei ole vakioitu, niin kuivumisesta johtuvaa kutistumaa on hankala arvioida. Näin ollen kyseiselle menetelmälle ei voida tässä tilanteessa antaa suurta painoarvoa, mutta sillä saadaan kuitenkin viitteitä siitä, mitä ääritilanteissa painuma voisi olla.

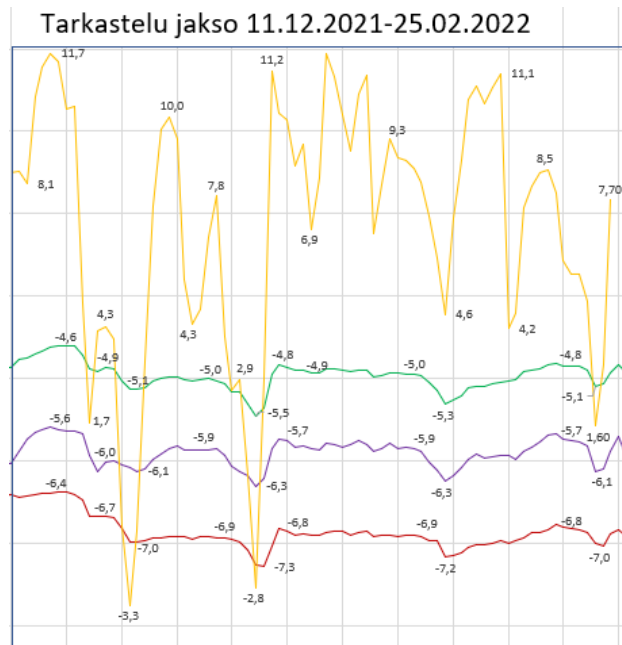
7.2 Kuvaajan tarkastelu

Alla kuvassa 7 esitetään siirtymäantureiden mittausdata aikaväliltä 13.9.2021-13.4.2022. Kuvaajasta nähdään painuman kasvavan kosteusvaihteluiden johdosta edellisessä kappaleessa tehtyjen oletusten mukaisesti. Seinien väliset painumaerot ovat pysyneet alun kuormituksen aikana tapahtuneiden painumien mukaisina.



Kuva 7. Painuma kuvaaja aikaväliltä 13.9.2021-13.4.2022.

Painumassa on havaittavissa lyhytaikaisia piikkejä joulukuusta alkaen, joita kosteustilan muutokset eivät täysin selitä. Tämän johdosta valitaan lähempään tarkasteluun aikaväli 11.12.2021-25.2.2022 (kuva 9).



Kuva 9. Suurennos kuvasta 7 Painumien tarkastelu aikaväliltä 11.12.2021-25.02.2022.

Selitystä painuman heittelyille lähdettiin hakemaan lämpötilan vaihteluiden kautta, sillä kyseisellä aikavälillä ulkolämpötilan vaihtelut olivat merkittäviä. Lämpötilan vaihtelu on nähtävissä myös D-seinällä hirren keskellä olevasta

anturista, jossa lämpötila oli alimmillaan $-3,3^{\circ}\text{C}$. Kun tilannetta tarkastellaan itse puun lämpölaajenemisen kautta, niin täysin kuivalle puutavaralle on olemassa lineaarinen lämpötilakerroin, jolla saataisiin näillä lämpötila vaihteluilla noin 0,4 mm kutistumia aikaan korkeussuunnassa. Tämä voisi selittää tarkastelujaksolla tavattavat heilahtelut painumassa.

Lämpötilan vaihtelu vaikuttaa myös rakenteen kuormitukseen, sillä rakenteen pystykuormitus on toteutettu seinärakenteeseen sijoitetuilla kierretangoilla. Kun tarkastellaan kierretankojen asennuskanavien lämpöolosuhteita huomataan lämpötilojen laskevan kierretankojen kanavissakin pakkasen puolelle.

Lämpöjännityksen kaavasta (Kaava 6) saadaan kierretankoon syntyvä jännitys ja kaavalla 7 saadaan selville kierretangoissa lisääntyvän voiman määrä lämpötilan muutoksen johdosta. Esimerkiksi 24.12.2022 kierretangoissa on ollut voimaa noin 4kN enemmän, mikä tarkoittaisi seinärakenteella olleen silloin 28,5 kN/m kuormitus. Kun kyseistä tulosta verrataan kappaleessa 6.1 saatuihin kokoonpuristuman tuloksiin, niin seinärakenteessa tapahtuisi $\sim 0,32$ mm painumaa kierretankojen jännitysten aiheuttamasta kokoonpuristumasta.

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (6)$$

Kaavassa 6:

σ = Normaalijännitys

E= Teräksen kimmomoduuli

α = Lämpötila kerroin

ΔT = Lämpötilan muutos

$$F = \sigma \cdot A \quad (7)$$

Kaavassa 7:

F= Jännityksen aiheuttava voima

σ = Lämpöjännitys

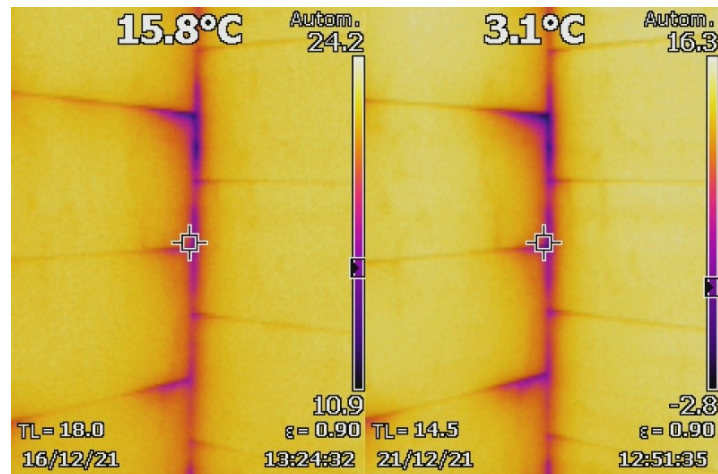
A= Kierretangon poikkileikkauksen pinta-ala

Näin ollen voidaan todeta, että tarkastelujaksolla tapahtuneet heittälyt painuma-arvoissa johtuivat pääasiassa lämpötilanvaihteluista ja niiden aiheuttamista kierretankojen jännityksen lisäyksestä, sekä puun dimensioiden muutoksista. Tätä olettamusta tukee se, että muutokset olivat vain hetkellisiä, joka on lämpölaajenemisen ominaispiirre. Lämpötilan taas palautuessa lähtötilanteen tasolle, kappale palautuu alkuperäiseen pituuteensa.

7.3 Lämpökamerakuvaus

Lämpökamerakuvaus tarkoitus oli paikantaa mahdolliset ilmanvuotopaikat rakenteessa ja kuvien perusteella vertailla nurkkasalvoksia keskenään. Kuvista nähdään selkeästi ilmanvuotokohtat, jotka sijoittuivat pääasiassa nurkka-alueille. Kuvien ottamishetkellä sisä- ja ulkotilan paine-ero oli noin 50Pa. Tällä menetelmällä ei voida todeta vuodon suuruutta, vaan päästään vertailemaan silmämääräisesti vuotokohtien määrää per nurkka.

Kuvassa 10 vasemmalla puolella oleva kuva on otettu 16.12.2021 kuvaushetkellä ulko- ja sisätilan lämpötilaero oli 20,6°C ja oikeanpuolimaisessa kuvassa 21.12.2021 lämpötilaero ulko- ja sisätilan välillä oli 29,4°C. Kuvienottohetkellä rakenne oli painunut keskimäärin 5,5 mm ja kuvausten välillä rakenne painui 0,3 mm. Ilmanvuotopaikat pysyivät kuvausten välillä identtisinä kuten muissakin nurkissa, joista kuvat liitteessä 3. Liitteissä olevat kuvat on koostettu kolmesta erillisestä otoksesta, jolloin nähdään kokonaiskuva nurkasta. Ennen kuvien ottamista hirren pintalämpötila tarkastettiin kosketuspintalämpömittarilla ja mittauskohdasta otettiin referenssikuva, josta tarkistettiin kameran ilmoittaman lämpötilan paikkaansa pitävyys.



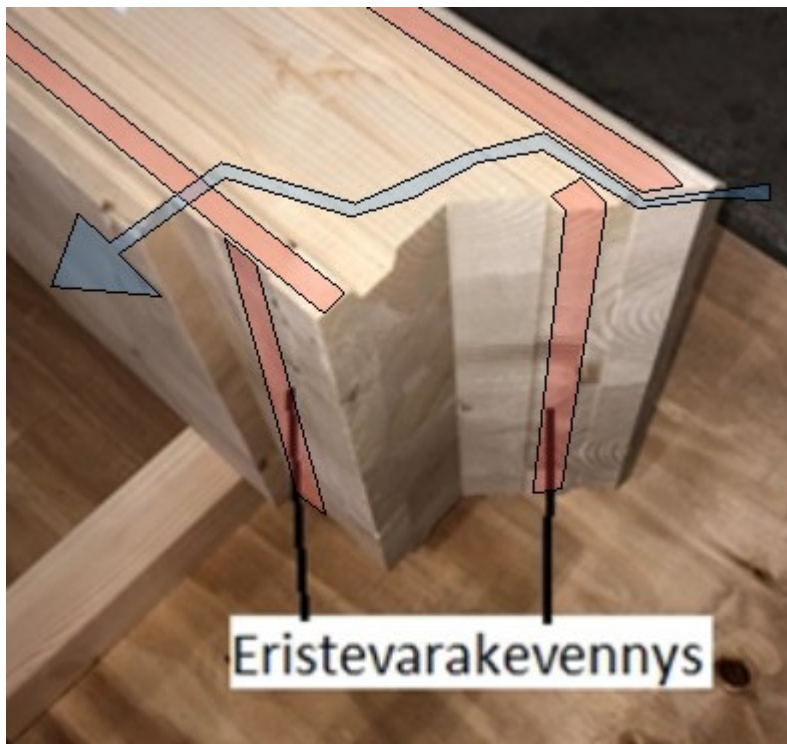
Kuva 10. Tirolinurkka: kuvien vasemmissa reunoissa näkyy lämpötilaa vastaava väri asteikko.

Vähiten vuotokohtia oli nurkassa neljä, toiseksi vähiten nurkassa kaksi ja eniten vuotokohtia oli nurkissa yksi ja kolme, joissa oli viisi vuotopaikkaa molemmissa. Kaikissa nurkissa oleville vuotopaikoille oli yhteistä, että ilmavirtaus kulkee hirsivarauksen myötäisesti ja on selkeämmin näkyvillä siinä hirressä joka uppoaa vastakkaisen seinän hirteen. Edellisessä kuvassa (kuva 10) nähdään ilmavirtauksen aiheuttama pintalämpötilan lasku ja kuvassa 11 on sinisellä nuolella ilmaistu mihin suuntaan ilmavirtaus pääasiassa suuntautuu.



Kuva 11. Elementtinurkka (Pellopuu Oy. 2021).

Syyt nurkkien ilmapuodoille eivät ole täysin selviä. Elementtinurkassa vuodot voivat johtua saumatiivisteiden sijoituksesta, sillä tiiveys on käytännössä sisemmän tiivisteiden varassa. Sisemmän tiivisteiden huolimaton asennus tai hirsien asennusaikana tiivisteiden rullaantuminen / vioittuminen jättää ilmapuodolle esteettömän reitin sisätiloihin. Kuvassa 12 on havainnollistettu tiivisteiden asennusta punaisella sekä ilmapuodon reittiä sinisellä nuolella.

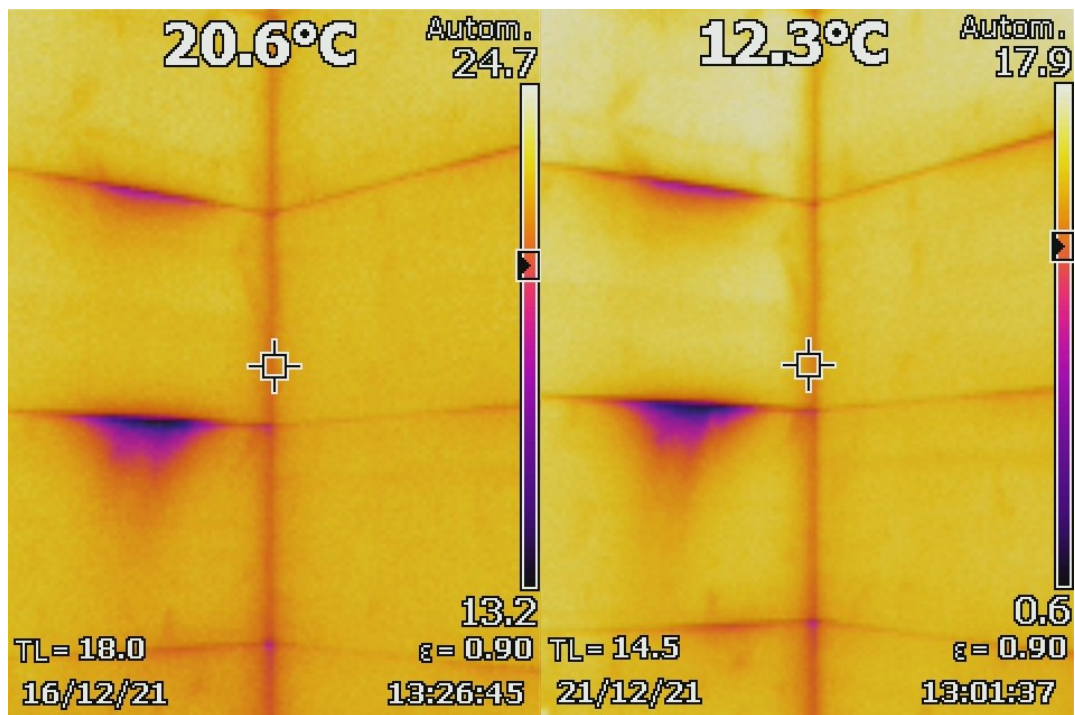


Kuva 12. Elementtinurkan tiivistenauhojen asennus (Pellopuu Oy. 2021)

Elementtinurkan tiivistysmenetelmä on selkeästi alttiimpi vaurioitumiselle kuin muiden salvostyyppien tiivistysmenetelmät, sillä se perustuu lähinnä sisemmän tiivistenauhan toimivuuteen. Esimerkiksi kartiolohenpyrstönurkka tiivistyy jo hirsien kiilautuessa toisiaan vasten ja lisäksi vuotoilman olisi ylitettävä kaksi tiivistenauhaa ilmapuodon synnyttämiseksi. Tirolinurkassa havaittiin yhtä paljon vuotopaikkoja kuin elementtinurkassakin, vaikka nurkasta tulevan ilmapuon täytyykin päästä vähintään kahden saumanauhan lävitse.

Nurkassa neljä (kuva 13) havaittiin muista nurkista poikkeavaa ilmapuotoa nurkan vierellä hirsisaumassa. Ilmapuodon syynä voisi olla, että rakenne ei ole

päässyt painumaan vapaasti vaan jäänyt kantamaan tapituslinjan kohdalta, jolloin hirsi on kutistunut paikallaan painumatta ja aiheuttanut paikallisen vuotokohdan hirsisaumaan. Edellä mainittua selitystä tukee myös painuma käyttäytyminen, sillä kyseisen seinän painuma 100 % kuormituksen jälkeen on ollut pienempää kuin vastakkaisen seinän, jossa on käytössä saman kokoiset hirret.



Kuva 13. Kartiolohenpyrstönurkka: Poikkeavaa ilmapuotoa irrallaan nurkasta.

7.4 Toisen vaiheen tiiveysmittaus

Rakentelle suoritettiin tiiveysmittauksia toisen vaiheen aikana neljä kappaletta, joista kaksi suoritettiin Minneapolis Blowerdoor painekoelaitteistolla ja kaksi Retrotec 5100 -laitteistolla. Syynä laitteiston vaihdolle oli aikaisemman laitteiston kyvyttömyys suorittaa täydellistä paine-ero sarjaa tiiveysmittauksessa. Retrotecin laitteistolla onnistuttiin suorittamaan tiiveysmittaus, mutta tuloksien epätarkkuusarvoksi saatiin ± 200 %, joten päädyttiin laitteiston manuaaliohjauksella selvittämään 50 Pa:n paine-eroa vastaavat ilmavirtausmäärät ja laskemaan käsin ilmanvuotolukemat rakenteelle vertailuarvoiksi.

Näin tehtynä 50 Pa:n paine-eron luomiseksi rakennuksesta täytyi poistaa ilmaa $63,61 \text{ m}^3/\text{h}$, josta laskemalla kaavalla 2 saatiin $n50: 4,03 \text{ 1/h}$ ja kaavalla 3 $qE50: 1,68 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Tulokset antavat viitteitä siitä, että rakenne ei olisikaan niin tiivis kuin voisi olettaa ensimmäisten mittausten perusteella. Tästä johtuen otettiin aikaisemmin käytetty painekoelaitteisto vielä käyttöön ja onnistuttiin suorittamaan testi kaikilla paine-ero alueilla. Alla tiiveysmittauksen tulokset.

Mittaus 4:

Vaipan ilmanvuotoluku $qE50: 1,58 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$

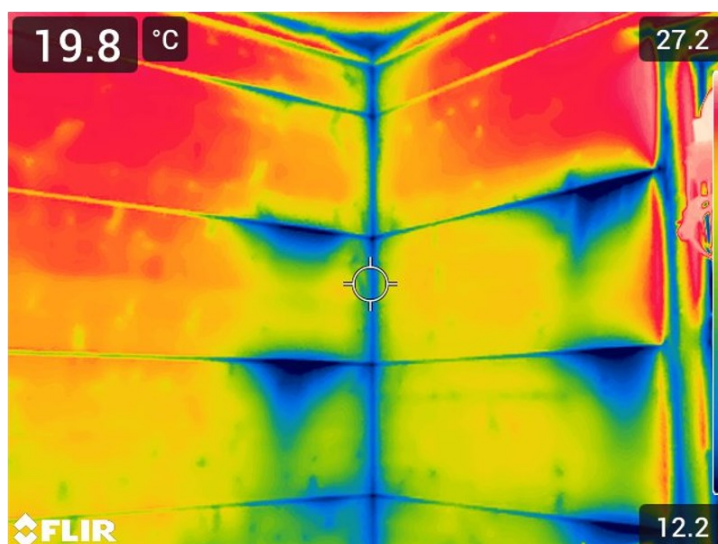
Rakennuksen ilmanvuotoluku $n50: 3,80 \text{ 1/h}$

Painekoelaitteiston raportti liitteessä 2.

Huolimatta siitä, että tällä kertaa laitteisto suoritti testin kaikilla paine-ero alueilla, ilmavirtausmäärässä oli vieläkin epätarkkuutta $\pm 11,3$ %. Eli parhaimmillaan vaipan ilmapuotoluku olisi $1,4 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ja huonoimmillaan $1,8 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$. Mittauksen 4 tulos ei ole huono, mutta tulos on huonompi verrattuna aiemman mittauksen tuloksiin, jossa: $qE50=0,58$ ja epätarkkuus $\pm 22,1$ %. Eli parhaimmillaan mittauksessa 3 vaipan ilmapuotoluku olisi $0,5 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ ja huonoimmillaan $0,7 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$.

Mittausten välillä rakenteessa on tapahtunut painumaa keskimäärin 2,45 mm. Vaikka sanotaankin rakenteen tiivistyvän painuessaan, niin tässä tapauksessa rakenteen painumisella on ollut tiiveyteen päinvastainen ilmiö tiiveysmittausten perusteella. Riippuukin siis siitä mistä syistä painuminen johtuu. Esimerkiksi ensimmäisten tiiveysmittausten aikana painuman syynä oli hirsivarauksissa olevan väljyyden poistuminen ja hirsien kokoonpuristuminen, jolloin rakenne tiivistyiikin painuessaan. Nyt painuma on syntynyt oletettavasti rakenteen kuivumisesta johtuvasta kutistumasta, jolla on vaikutusta hirren mittasuhteisiin sekä pysty- että vaakasuunnassa. Tällöin rakenteeseen voi syntyä rakoilua myös nurkkasalvoksissa ja, jos edellisessä kappaleessa Kuvan 13 poikkeava ilmavuoto johtuu tapituslinjan kantamisesta, niin hirren paikoilleen kutistuminen ilman rakenteen painumista, voi olla mahdollista.

Lisäksi tiiveysmittauksien tuloksiin vaikuttaa oven pielessä olevat ilmavuoto kohdat, jotka huomattiin viimeisimmästä lämpökuvauksesta, joka suoritettiin kokeilumielessä koululle saapuneella uudella lämpökameralla. Kuvassa 14 nähdään että oviaukon viereisiin hirsien saumoihin on syntynyt vuotokohtia. Vuotokohtien syynä voi olla, kierretankojen on sijoitus kyseisellä seinällä vain nurkkiin, jolloin rakenne vääntyy nurkkaa kohti ja aukon viereiset hirret ”nousevat” ylöspäin.



Kuva 14. Uuden lämpökameran testaus: Oven pielessä olevissa hirsisaumoissa lämpövuotoa.

8 Yhteenveto

Rakenteen painumista noin puolet aiheutuivat alun kuormituksessa, tapahtuneesta hirsien kokoonpuristumisesta sekä hirsisaumojen tiivistymisestä. Loput painumasta muodostui rakenteen kuivumisesta johtuvasta kutistumasta. Koko rakenteen korkeudella painumaa tapahtui D-seinällä 5,22 mm, B-seinällä 5,99 mm ja A-seinällä 7,28 mm.

Hirsitaloteollisuuden jäsenyritykset ovat määrittäneet painumattomalle hirsirakenteelle seuraavan määritelmän:

Painumaton hirsirakenne on päällekkäin asetetuista hirsistä, tiivisteistä ja kiinnikkeistä koottu seinärakenne, jonka pitkäaikainen muodonmuutos viruma huomioiden, suunnitelluissa käyttöolosuhteissa ja laskentakuormien vaikuttaessa on keskimäärin pienempi tai yhtä suuri kuin 0,2 % hirsiseinärakenteen suunnitellusta korkeudesta. Tarvittaessa painumattomuus on osoitettava testituloksien, käytännön mittauksien tai muulla luotettavalla tavalla. (Hirsitaloteollisuus, 2022.)

Alla olevaan taulukkoon 2 on koostettu koerakenteessa tapahtuneet painumat. Taulukosta nähdään, että vaikka rakenne painuikin kokonaisuudessaan alkutilanteesta keskimäärin 6,16 mm, niin painumattoman hirren määritelmän mukaan painumattomuuteen mitattavaa painumaa huomioidaan vasta suunnitelluissa käyttöolosuhteissa ja laskentakuormien vaikuttaessa. Eli tässä tapauksessa 100 % kuormituksen jälkeen tapahtuvista painumista, jolloin voidaan todeta tällä seitsemän kuukauden mittaus ajanjaksolla hirsirakenteen olevan painumaton.

Toisen vaiheen painumat	B-Seinä [mm]	A-Seinä [mm]	D-Seinä [mm]	Painuman määrä ilman kokoonpuristumaa [mm]			Kokoonpuristuma koko rakenteen korkeudella [mm]
				B-Seinä	A-Seinä	D-Seinä	
60% kuormitus	0,83	1,65	1,27	0,00	0,67	0,29	0,98
100% kuormitus	2,49	4,14	2,69	0,81	2,46	1,01	1,68
7 kk tarkastelujakson kokonaispainumat	5,99	7,28	5,22				
Laskentakuormien vaikuttaessa tapahtuvat painumat eli 100% kuormituksen jälkeen tapahtuva painuma	3,50	3,14	2,53				

Taulukko 2. Toisen vaiheen painumat.

Ilmantiiveyden osalta rakenne täyttää nykyiset vaatimukset ja sijoittuu Vertian suorittamassa pientalojen ilmantiiveysvertailussa keskiluokkaan. (Kuva 15.)



Kuva 15. Ilmantiiveys uusissa pientaloissa. (Vertia 2018, 6).

Koerakenteessa ilmavuodot olivat pääasiassa rakenteen nurkissa ja rakenne on erittäin pieni tilavuudeltaan ja pinta-aloiltaan, jolloin pienikin ilmavuoto aiheuttaa suhteessa suuremman ilmavuotolukeman. Jos ajatellaan, että ilmavuodot johtuvat pääasiassa nurkka salvoksissa olevista raoista, niin ilmantiiveystulos olisi saman korkuisessa nelinurkkaisessa, mutta 100m² kokoisessa asunnossa vain $q_{E50}=0,2 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$, kun otetaan huomioon vain koerakenteessakin ilmenneet ilmavuotopaikat.

9 Pohdinta

Opinnäytetyössä selvitettiin lamellihirsirakenteen painumisen yhteyttä rakenteen ilmantiiveyteen ja voidaan todeta, että kun hirsirakenne painuu, se tiivistyy merkittävästi, mutta vain niin pitkään, kun painuminen johtuu hirsisaumojen väljyydestä ja hirsien kokoonpuristumisesta. Tämän jälkeen tapahtuvalla painumalla ei tutkimuksessa saavutettu tiiveyden paranemista, vaan rakenteen ilmavuodot kasvoivat. Tulos antaa viitteitä siihen, että kun saumoissa ollut väljyys on saatu pois, puun kuivumisesta aiheutuva muodonmuutos aiheuttaa painumien lisäksi myös muutoksia hirren leveys ja korkeus suunnassa, jolloin rakenteessa olevat vuotokohdat vain kasvavat.

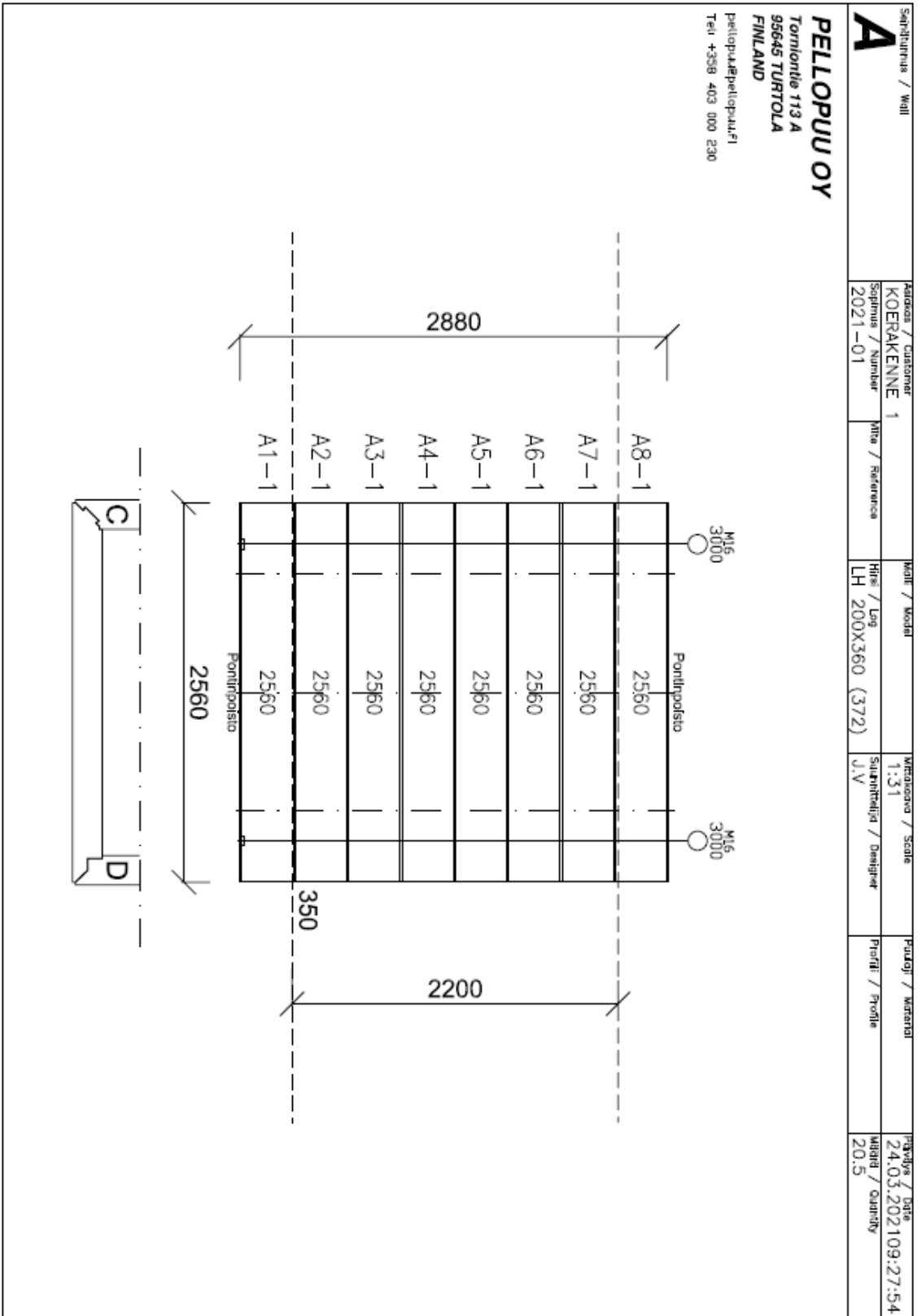
Lämpökamerakuvien perusteella nurkkasalvosten tiiveyksissä oli huomattavissa selkeitä eroja ja voidaankin sanoa kartiolohenpyrstönurkan suoriutuneen parhaiten. Nurkista tuleviin ilmapuodon määriin ei pystytä lämpökamerakuvauksen pohjalta sanomaan muuta, kuin että vuotoa ilmaantui kaikissa eri salvostyypeissä vaihtelevissa määrin. Jotta voitaisiin todeta jonkun tietyn salvostyyppin tiiveys, täytyisi tutkimuskohteen olla joko koerakenne, jonka kaikki salvokset ovat keskenään samanlaisia tai vaihtoehtoisesti niiden tulisi olla irrallisia nurkkasalvoksia, joita voitaisiin sijoittaa painekoelaitteeseen tiiviisti mittausta varten.

Opinnäytetyö antoi valmiudet rakennusten ilmatiiveyden mittaukseen ja siihen, kuinka lämpökamerakuvausta voidaan hyödyntää ilmapuotojen paikantamiseen. Lisäksi opin lisää puun ja puurakenteiden ominaisuuksista.

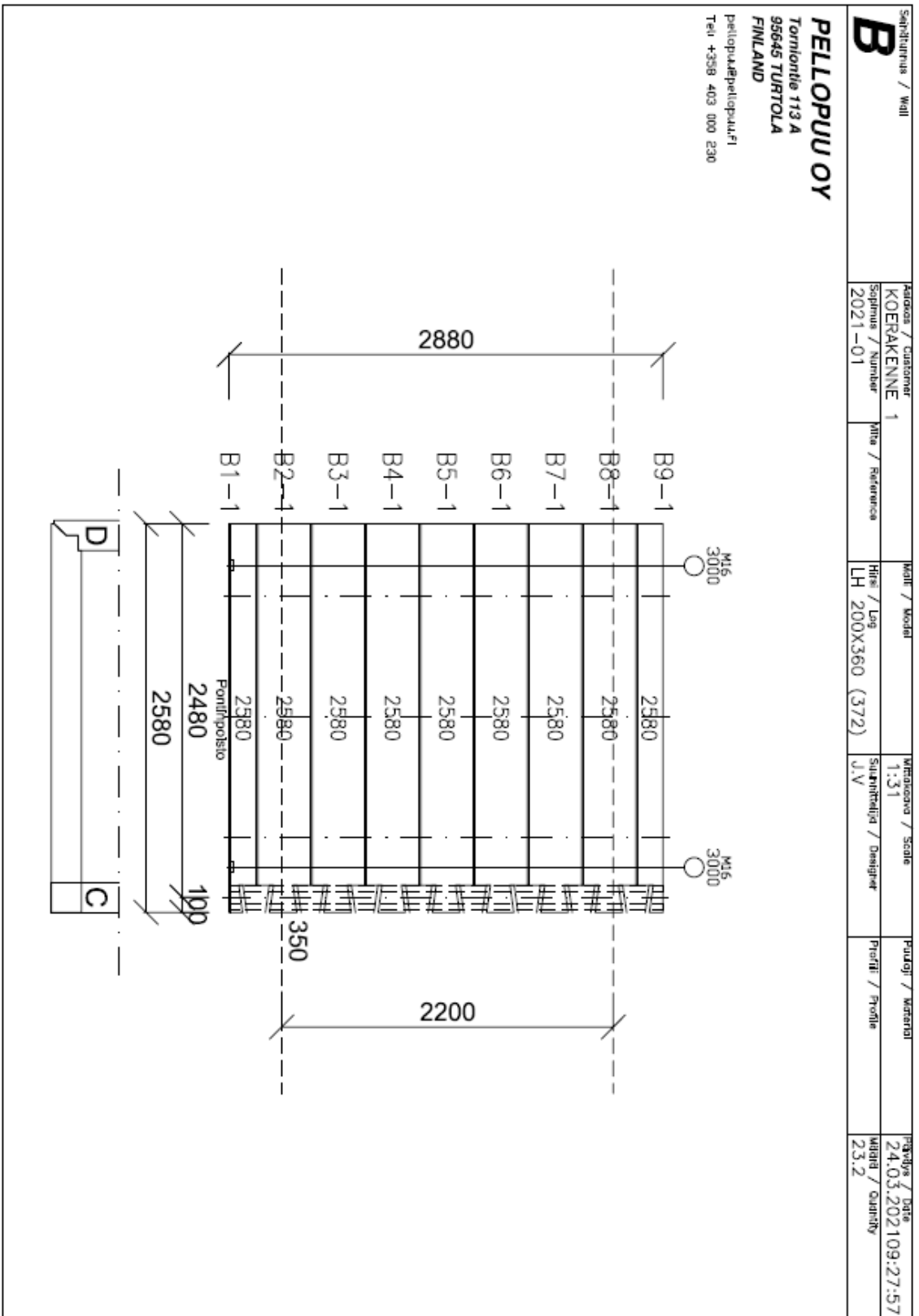
Lähteet

- FPL. Wood Handbook, Wood as an Engineering Material. 2010. United States Department of Agriculture, Forest Service, Research and Development, Forest Products Laboratory. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf. 07.05.2022.
- Hirsirakentamisen perusteet itseopiskelumateriaali. https://www.hirsikoti.fi/assets/images/Koulutusmateriaali/Hirsirakentamisen_perusteet.pdf. 9.2.2022.
- Hirsitaloteollisuus. 2022. Suunnittelijalle. <https://www.hirsikoti.fi/fi/suunnittelijalle>. 27.05.2022.
- Lahtela, T. 2016. Puutavara ja puulevyt. Rakentajainkalenteri 7, 485–505.
- Pellopuu Oy & Salvos. jättihirsi. 2022. <https://urly.fi/2Eqx>. 27.05.2022.
- Pellopuu Oy 2021. Pystytysopas hundeggerilla työstetyille kehikoille. 16.02.2022
- Puuinfo. 2016. Tekninen tiedote P2-paloluokan hirsirakennus. <https://docplayer.fi/41557595-Tekninen-tiedote-sisalto-p2-paloluokan-hirsirakennus.html>. 9.2.2022.
- Puuinfo. 2020. Puun kosteuskäyttäytyminen. <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/>. 9.2.2022.
- Puuinfo. 2020. Rakennusten hiilijalanjäljen laskenta. <https://puuinfo.fi/puutieto/ymparisto-vaikutukset/rakennusten-hiilijalanjaljen-laskenta/>. 27.05.2022.
- RT 82-11168 2014. Hirsitalon suunnitteluperusteet.
- RT 80-10974. 2009. Teollisesti valmistettujen asuinrakennusten ilmanpitävyyden laadunvarmistusohje
- Sarja, A. 2010. Rakennuksen tiiviys. Rakentajainkalenteri, 385-394. <https://tiedostot.rakennustieto.fi/rakentajain-kalenteri/RK100301.pdf>. 16.02.2022
- Sisäilmäyhdistys ry – puolueetonta tietoa sisäilmasta. ilmavirtaukset rakennuksessa. 2008. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kosteusvauriot/Kosteustekniikan-toiminta/Ilmavirtaukset-rakennuksessa>. 26.5.2022
- SFS-EN ISO 9972. 2015. Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- Vertia. 2018. Ilmatiiveys ja vuotokohdat uusissa rakennuksissa. <https://vertia.fi/wp-content/uploads/2018/06/Ilmatiiveys-ja-vuotokohdat-uusissa-rakennuksissa-2018-1.pdf>. 27.05.2022.
- Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 848/2017.

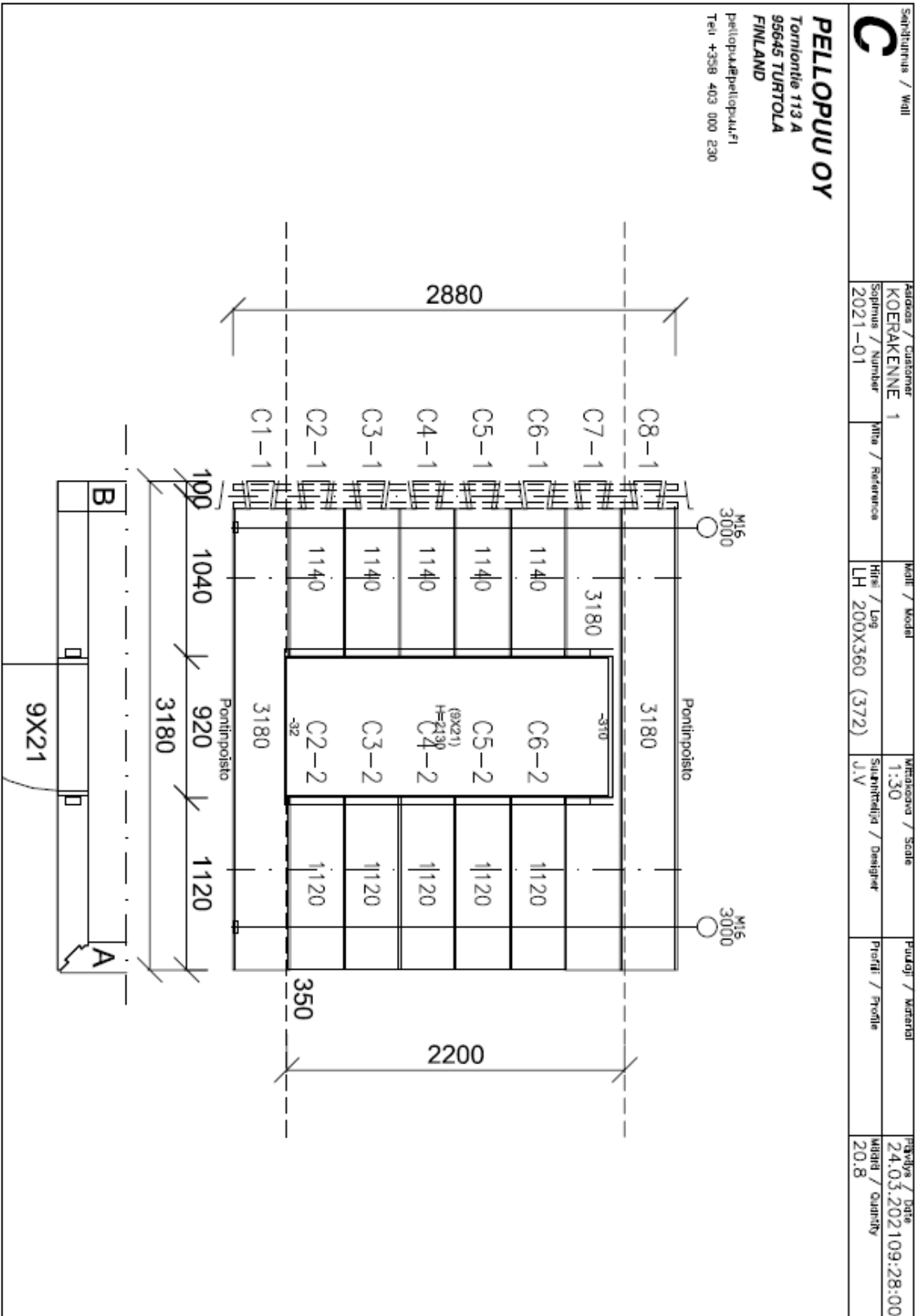
A-Seinä



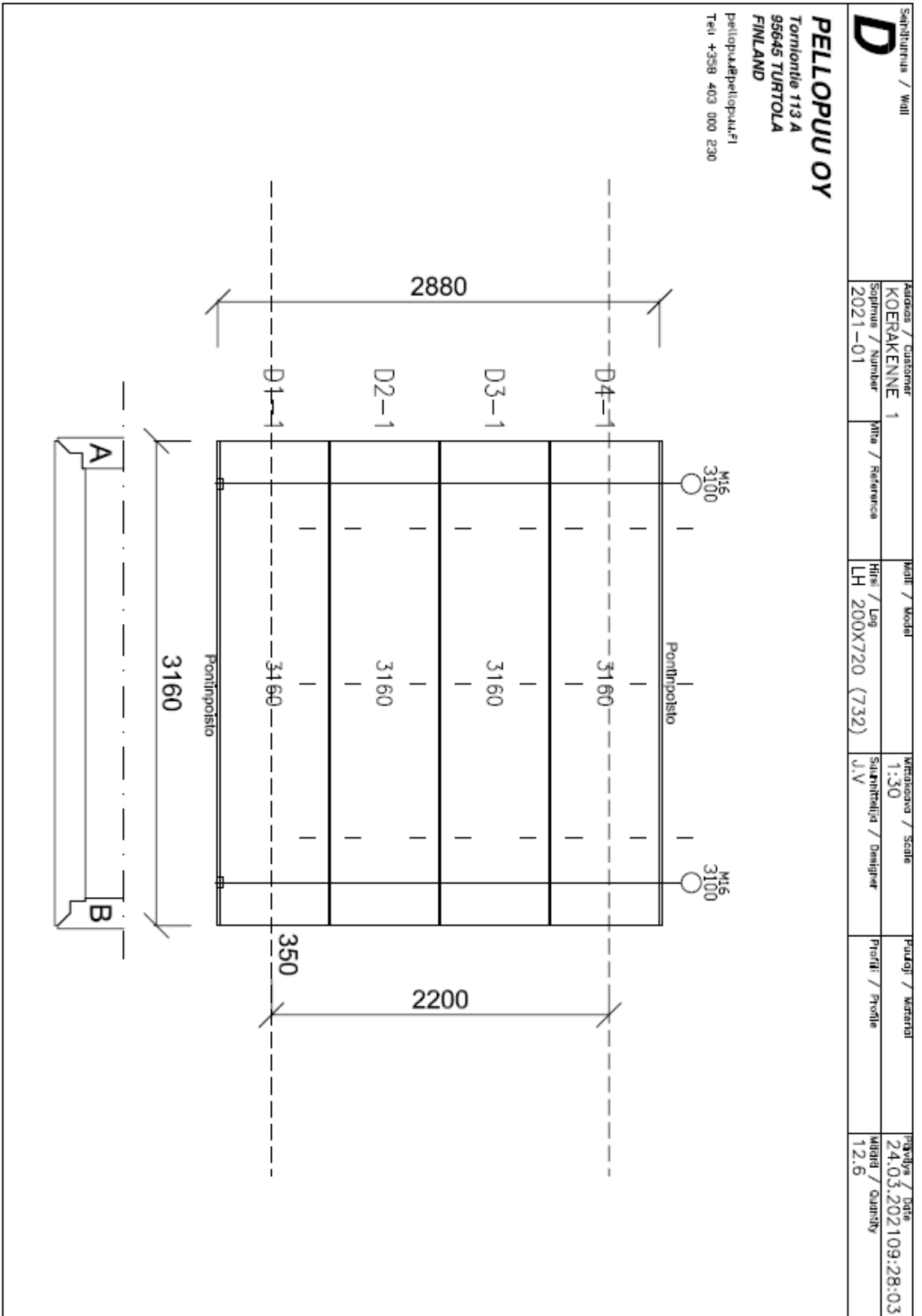
B-Seinä



C-Seinä



D-Seinä



Mittaus 1



BlowerDoor GmbH
MessSysteme für Luftdichtheit

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 13.9.2021 Test File: Untitled

Technician: Hirvonen

Project Number: Testi 1, ennen kuormitusta

Customer:

Building Address: Pellopuu

Test Results at 50 Pascals:

q ₅₀ : m ³ /h (Airflow)	75 (+/- 1.5 %)
n ₅₀ : 1/h (Air Change Rate)	4.77
q _{F50} : m ³ /(h m ² Floor Area)	12.22
q _{E50} : m ³ /(h m ² Envelope Area)	1.99

Leakage Areas:

ELA ₅₀ : m ²	0.0023 (+/- 1.5 %)
ELA _{F50} : m ² /m ²	0.0003725
ELA _{E50} : m ² /m ²	0.0000605

Building Leakage Curve:

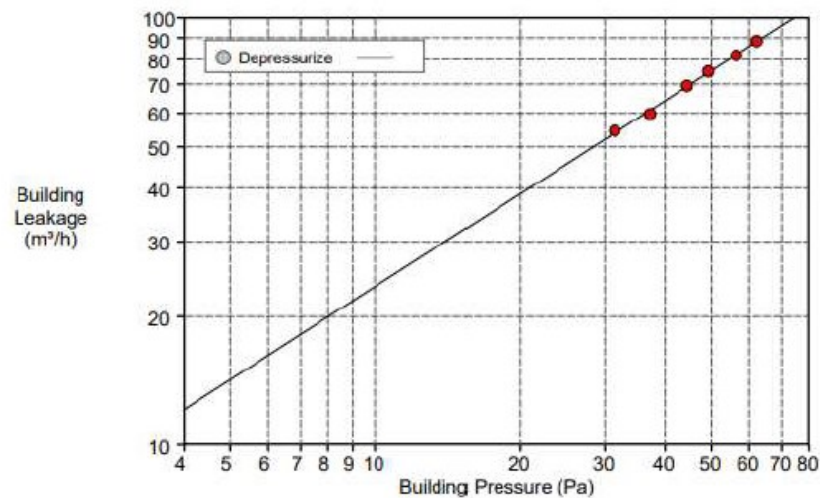
Air Flow Coefficient (C_{env}) = 4.4 m³/(h·Paⁿ) (+/- 22.5 %)
 Air Leakage Coefficient (C_L) = 4.4 m³/(h·Paⁿ) (+/- 22.5 %)
 Exponent (n) = 0.723 (+/- 0.059)
 Coefficient of Determination (r²) = 0.99657

Test Standard: ISO 9972

Test Mode: Depressurization

Type of Test Method:

Purpose of Test:



Karelia Ammattikorkeakoulu Oy
 Karjalankatu 3
 80200 Joensuu

Mittaus 2



BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 15.9.2021 Test File: Untitled

Technician: Hirvonen

Project Number: Testi 2, 60% kuormitus

Customer:

Building Address: Pellopuu

Test Results at 50 Pascals:

q ₅₀ : m ³ /h (Airflow)	30 (+/- 0.7 %)
n ₅₀ : 1/h (Air Change Rate)	1.90
q _{F50} : m ³ /(h·m ² Floor Area)	4.88
q _{E50} : m ³ /(h·m ² Envelope Area)	0.79

Leakage Areas:

ELA ₅₀ : m ²	0.0009 (+/- 0.7 %)
ELA _{F50} : m ² /m ²	0.0001486
ELA _{E50} : m ² /m ²	0.0000241

Building Leakage Curve:

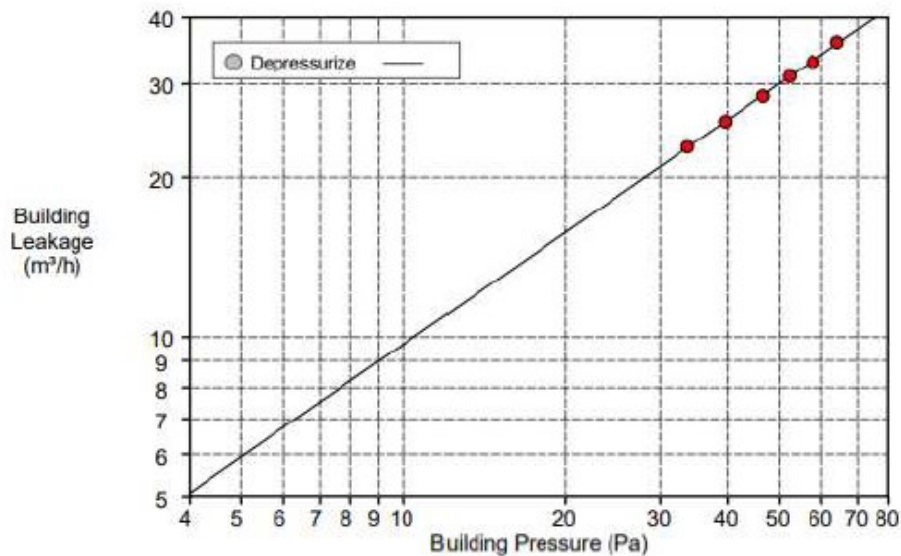
Air Flow Coefficient (C_{env}) = 1.9 m³/(h·Paⁿ) (+/- 11.5 %)
 Air Leakage Coefficient (C_L) = 1.9 m³/(h·Paⁿ) (+/- 11.5 %)
 Exponent (n) = 0.704 (+/- 0.030)
 Coefficient of Determination (r²) = 0.99908

Test Standard: ISO 9972

Test Mode: Depressurization

Type of Test Method:

Purpose of Test:



Mittaus 3



BlowerDoor GmbH
MessSysteme für Luftdichtheit

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 16.9.2021 Test File: Untitled

Technician: Hirvonen

Project Number: Pellopuu

Customer:

Building Address:

Test Results at 50 Pascals:

q ₅₀ : m ³ /h (Airflow)	22 (+/- 22.1%)
n ₅₀ : 1/h (Air Change Rate)	1.39
q _{F50} : m ³ /(h·m ² Floor Area)	3.56
q _{E50} : m ³ /(h·m ² Envelope Area)	0.58

Leakage Areas:

ELA ₅₀ : m ²	0.0007 (+/- 22.1%)
ELA _{F50} : m ² /m ²	0.0001085
ELA _{E50} : m ² /m ²	0.0000176

Building Leakage Curve:

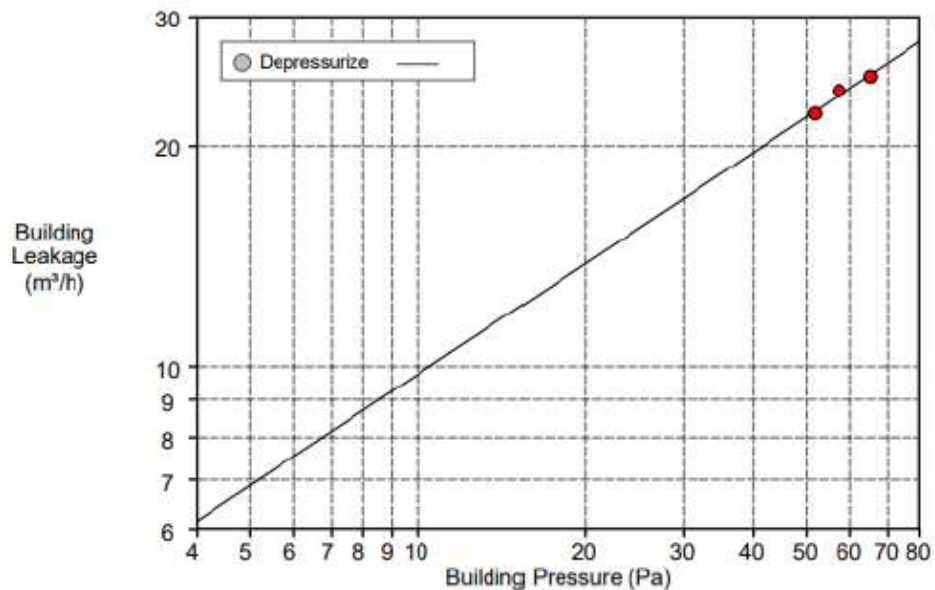
Air Flow Coefficient (C_{env}) = 3.0 m³/(h·Paⁿ) (+/- 517.4%)
 Air Leakage Coefficient (C_L) = 3.1 m³/(h·Paⁿ) (+/- 517.4%)
 Exponent (n) = 0.503 (+/- 1.275)
 Coefficient of Determination (r²) = 0.96172

Test Standard: ISO 9972

Test Mode: Depressurization

Type of Test Method:

Purpose of Test:



Mittaus 4



BlowerDoor GmbH
MessSysteme für Luftdichtheit

BUILDING LEAKAGE TEST

Date of Test: 13.5.2022 Test File: Pellopuu, testi 4-2 13_5_2022

Technician: Rätty Nico

Project Number:

Customer:

Building Address: Koerakenne

Test Results at 50 Pascals:

q ₅₀ : m ³ /h (Airflow)	60 (+/- 11.3 %)
n ₅₀ : 1/h (Air Change Rate)	3.80
q _{F50} : m ³ /(h·m ² Floor Area)	9.74
q _{E50} : m ³ /(h·m ² Envelope Area)	1.58

Leakage Areas:

ELA ₅₀ : m ²	0.0018 (+/- 11.3 %)
ELA _{F50} : m ² /m ²	0.0002968
ELA _{E50} : m ² /m ²	0.0000482

Building Leakage Curve:

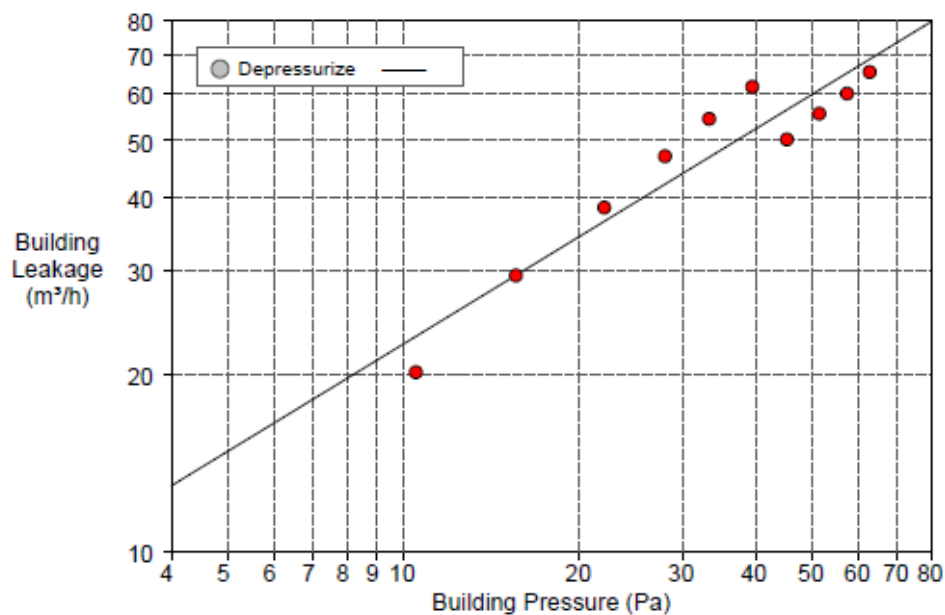
Air Flow Coefficient (C_{env}) = 5.5 m³/(h·Paⁿ) (+/- 55.7 %)
 Air Leakage Coefficient (C_L) = 5.6 m³/(h·Paⁿ) (+/- 55.7 %)
 Exponent (n) = 0.606 (+/- 0.159)
 Coefficient of Determination (r²) = 0.90661

Test Standard: ISO 9972

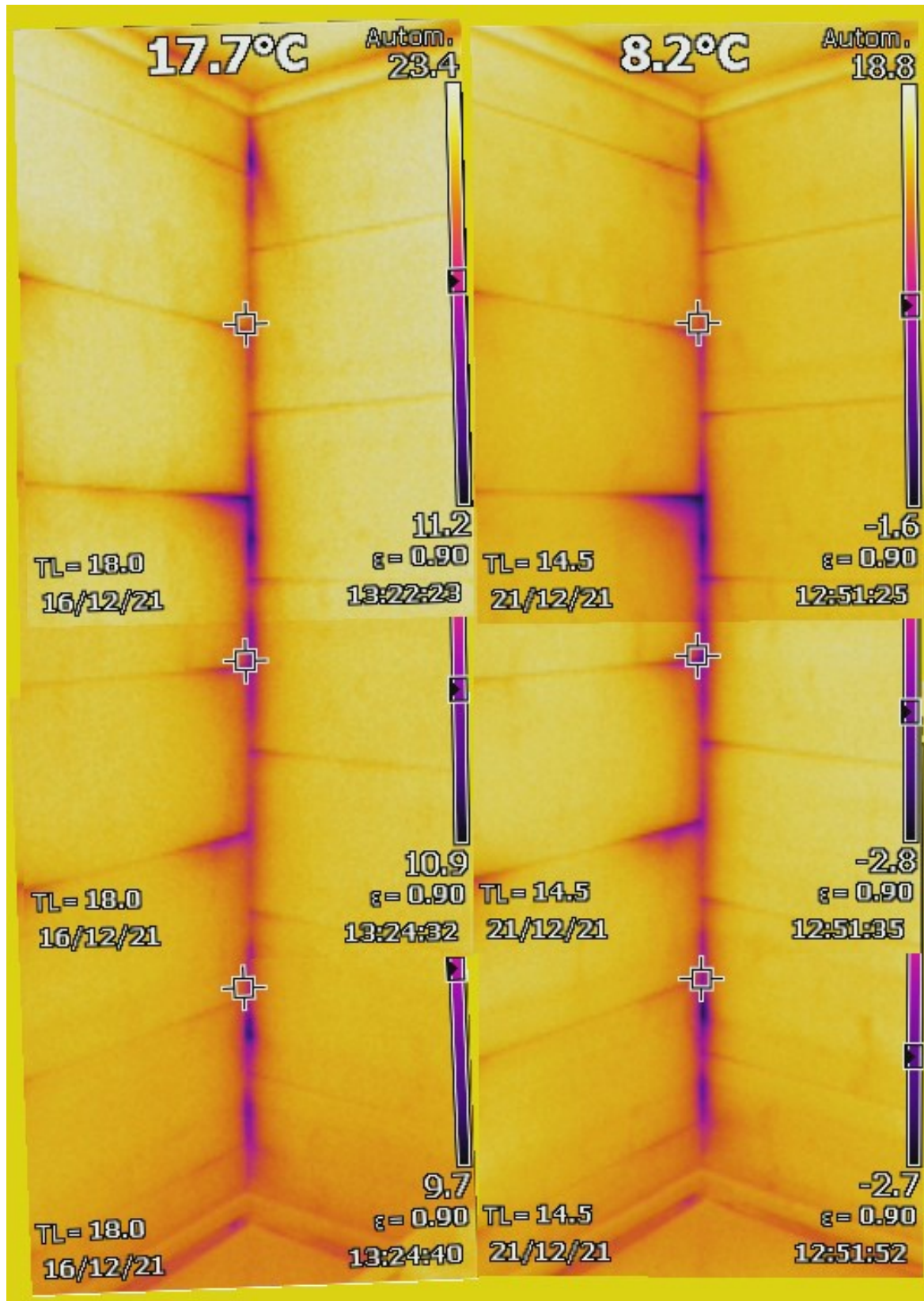
Test Mode: Depressurization

Type of Test Method:

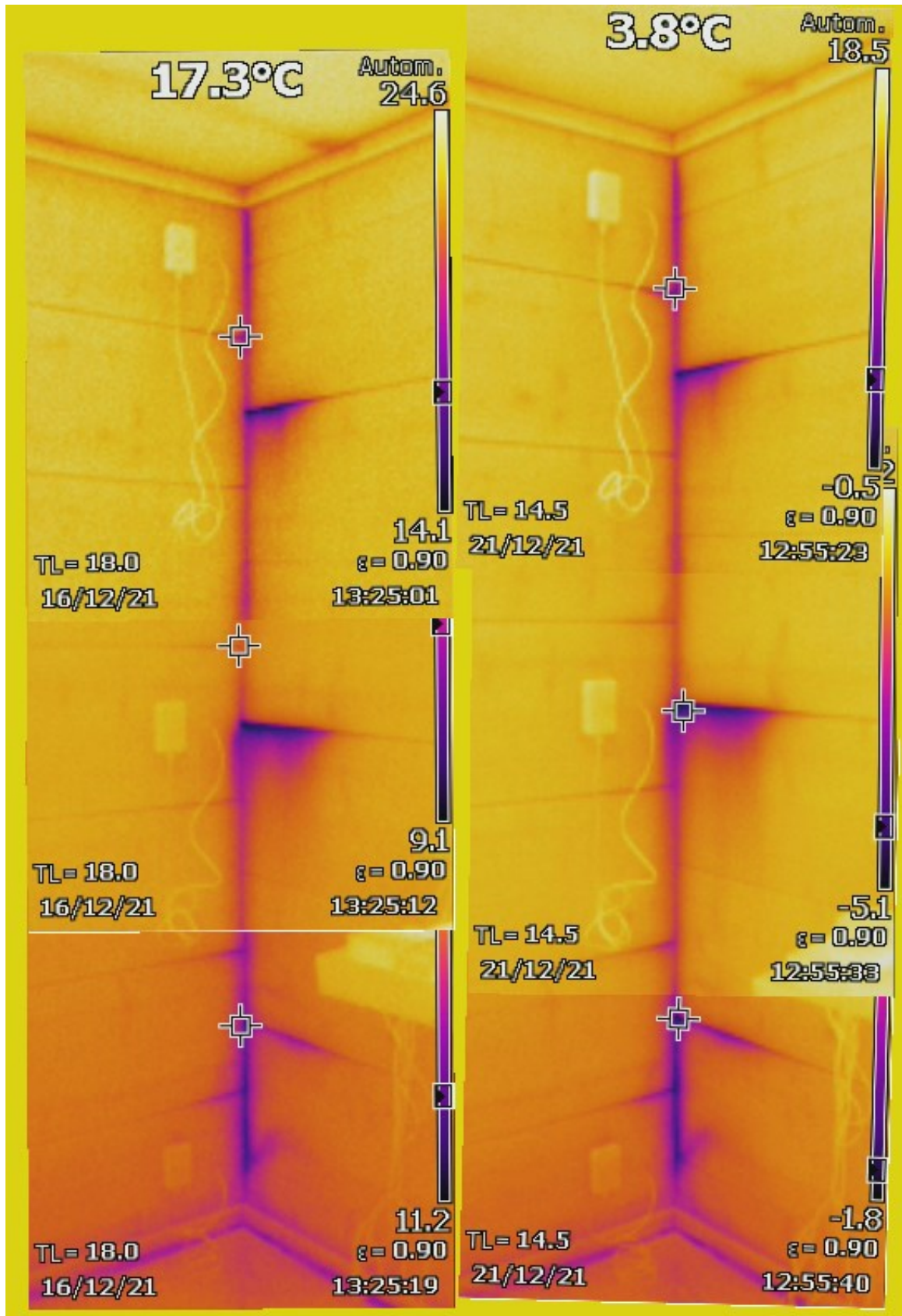
Purpose of Test:



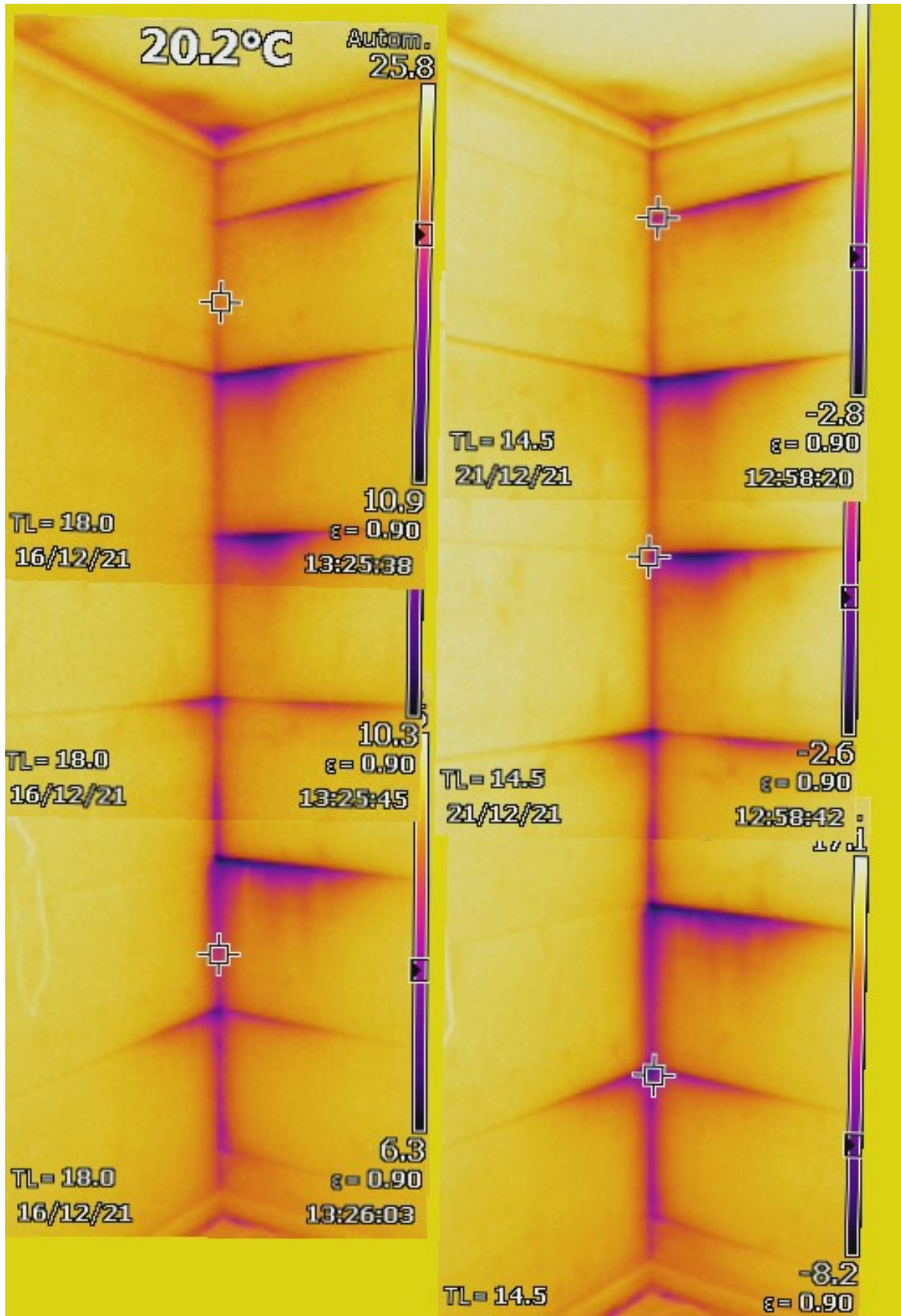
NURKKA 1



NURKKA 2



NURKKA 3



NURKKA 4

