

Kahi- ja Leca-väliseinärakenteiden käyttö jäähdytyksessä

Timo Ronkainen

Opinnäytetyö

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU
OPINNÄYTETYÖ
Tiivistelmä

| | |
|---|----------------------------|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | |
| Koulutusohjelma Rakentamisen koulutusohjelma | |
| Työn tekijä(t) Timo Ronkainen RI (AMK) | |
| Työn nimi Kahi- ja Leca-väliseinärakenteiden käyttö jäähdytyksessä | |
| Päiväys 14.4.2014 | Sivumäärä/Liitteet 99/8 |
| Ohjaaja(t) lehtori Harry Dunkel ja pt. tuntiopettaja Jarkko Surakka | |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Saint-Gobain Weber Oy Ab | |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli todistaa mittauksilla, että tutkittavilla vesikiertoisilla Kahi- ja Leca-väliseinärakenteilla on jäähdytysvaikutusta. Taustana työlle voidaan pitää kasvavaa jäähdytyksen tarvetta tulevaisuudessa.</p> <p>Tutkimuksessa käytettiin malliseiniä, joista mitattiin lämpötiloja. Malliseiniä oli yhteensä kuusi kappaletta. Tutkittavat malliseinät valmistettiin Kahi-väliseinäpöntistä, Kahi-runkopöntistä ja Leca EasyLexistä. Jokaisesta materiaalista oli kaksi erilaista versiota. Toisessa versiossa tutkittava rakenne sisälsi diffuusiosuojatun vesiputken, jossa vaihtoehdossa kierrätettiin jäähdytettyä vettä. Tulokset saatiin mittaamalla tutkimuskammion lämpötilaa, kierrätettävän veden meno- ja paluu lämpötiloja ja tutkittavien seinien lämpötiloja. Saatuja tuloksia verrattiin toisiinsa ja erityistä huomiota kiinnitettiin lämpötilaeroihin vesiputkistollisen ja ilman vesiputkistoa olevan samasta materiaalista valmistetun tutkimusseinän lämpötiloihin. Lisäksi tehtiin kirjallisuustutkimusta aiheesta.</p> <p>Tulokseksi saatiin, että varsinkin vesikiertoisilla rakenteilla on jäähdytysvaikutusta. Opinnäytetyössä esitettiin myös lyhyesti rakennuksen massan vaikutusta jäähdytykseen, jäähdytysveden hankintatapoja, erilaisia passiivisia keinoja jäähdytyksen tarpeen pienentämiseksi ja ennusteita tulevasta ilmastomuutoksesta. Lisäksi eri rakenteille suoritettiin laskennallisia tarkasteluja. Saatujen tulosten perusteella muodostettiin käsitys siitä, kuinka paljon Kahi- tai Leca-rakenteita tarvitaan halutun jäähdytystehon saavuttamiseksi. Tehtyä tutkimusta voidaan pitää perustutkimuksena tuleville jatkotutkimuksille ja kehityshankkeille. Opinnäytetyön toimeksiantaja Saint-Gobain Weber Oy Ab onkin ilmoittanut jatkavansa asian tutkimista ja kehittämistä.</p> | |
| Avainsanat Väliseinä, Kahi, Leca, jäähdytys | |
| Julkinen | |

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES
THESIS
Abstract

| | | | |
|--|-----------|------------------|------|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | | | |
| Degree Programme Degree Programme in Construction Management | | | |
| Author(s) Timo Ronkainen | | | |
| Title of Thesis Using Kahi- and Leca-partition walls in cooling | | | |
| Date | 14.4.2014 | Pages/Appendices | 99/8 |
| Supervisor(s) Mr Harry Dunkel, Lecturer and Mr Jarkko Surakka, Lecturer | | | |
| Client Organisation/Partners Saint-Gobain Weber Ltd | | | |
| <p>Abstract</p> <p>The purpose of this study was to investigate the cooling effect on the partition wall structures, constructed from light weight aggregate masonry units (Leca) and calcium silicate masonry units (CSU), on the inner temperatures. The work was commissioned by Saint-Gobain Weber Ltd.</p> <p>The Investigations were conducted using six different wall samples. The wall samples were constructed using Leca and CSU blocks (85 mm CSU, 130 mm CSU, and 88 mm Leca). Two different versions of each representative material were constructed. One version contained a diffusion insulated water pipe, which was used for circulating chilled water within the structure. The results were obtained by measuring the temperature of the test chamber, measuring the entrance and return water temperature and by measuring the temperatures of the investigated wall structures. The obtained results from the different sample types were compared with each other. According to the measuring data the structure facilitated with the water circulation pipes has a cooling effect, to some extent. The effect of the thermal mass in the cooling process was also introduced in the study. Furthermore, the purveyance of the cooling water, the exploitation of different types of passive cooling means in the reduction of cooling demand and the forecast of the coming global change in climate were discussed in this study.</p> <p>According to the obtained results, an image on the quantity of the aforementioned structures for cooling purposes was constructed and also different calculation methods from the results were listed. This study can be regarded as a primary and fundamental study for the coming research and development projects in the field of thermal mass and cooling. The mandatory and primary client of the study is Saint-Gobain Weber Oy Ab, expressed an interest in the further development of the aforementioned structures in terms of cooling and heating purposes.</p> | | | |
| Keywords Partition wall, Kahi, Leca, cooling | | | |
| Public | | | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | JOHDANTO | 7 |
| 2 | JÄÄHDYTYKSEN TARVE JA SIIHEN VAIKUTTAVAT ASIAT | 8 |
| 2.1 | Jäähdytys tarpeen määrittäminen rakennuksissa | 12 |
| 2.2 | Aurinkosuojaus menetelmät rakennuksissa | 13 |
| 2.3 | Rakennuksen massan vaikutus jäähdytykseen ja lämmitykseen..... | 14 |
| 2.4 | Seinien käyttö jäähdytyksessä ja lämmityksessä..... | 18 |
| 2.5 | Jäähdytetyt palkit - chilled beams, toiminta jäähdytyksessä | 23 |
| 3 | JÄÄHDYTTÄVÄN VEDEN HANKINTATAPOJA | 28 |
| 3.1 | Snow-Cooling Systems - jäähdytys varastoidun lumen avulla | 28 |
| 3.2 | Maalämpöpumput ja kierrätysputkistot | 29 |
| 3.3 | Kaukojäähdytys | 32 |
| 3.4 | Aurinkojäähdytysjärjestelmä | 35 |
| 4 | TUTKITTAVIEN SEINÄRAKENTEIDEN KUVAUS JA KÄYTTÖ | 36 |
| 4.1 | Tutkimuskammiot sekä tutkimuskammioiden olosuhteet | 37 |
| 5 | TUTKIMUKSISTA SAADUT TULOKSET | 49 |
| 5.1 | Kahi-väliseinäponti | 49 |
| 5.2 | Kahi-runkoponti | 56 |
| 5.3 | Leca EasyLex | 68 |
| 6 | TUTKIMUKSEN TULOSTEN TULKINTA JA VERTAILU | 84 |
| 6.1 | Kahi-väliseinäponti | 84 |
| 6.2 | Kahi-runkoponti | 86 |
| 6.3 | Leca EasyLex | 88 |
| 6.4 | Laskennalliset tarkastelut rakenteille | 90 |
| 7 | POHDINTA..... | 97 |
| | LÄHTEET | 98 |

LIITTEET

Liite 1 Tutkimustuloksia muiden tutkimuksista

Liite 2 Pientalon pohjapiirustus

1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Kahi- ja Leca-väliseinärakenteiden käyttöä jäähdytyksessä. Opinnäytetyö sisältää laskennallista tarkastelua ja tutkimuskammiossa suoritetua tutkimusta väliseinärakenteiden jäähdytysmahdollisuuksista. Tutkimuskammio sijaitsee Savonia-ammattikorkeakoulun rakennusfysiikan ja talotekniikan laboratoriossa. Opinnäytetyön tekijä on määrittänyt tutkimuskammion olosuhteet ja tulkinnut tutkimuksesta saadut tulokset. Laboratoriossa työskentelevä henkilökunta suoritti tutkimuksen tekemisen annettujen ohjeiden mukaan. Tutkimusta suoritettiin mittaamalla lämpötiloja. Mittaukset suoritettiin kaikissa rakenteissa samalla tavalla, mutta tutkimuskammiota vaihdettiin tutkimuksen aikana. Tehdyt muutokset tutkimuksessa ja tarkemmat kuvaukset tutkimuksen kulusta esitetään muissa luvuissa.

Tätä tutkimusta voidaan pitää perustutkimuksena, jonka perusteella tilaaja Saint-Gobain Weber Oy Ab tekee omia jatkotutkimuksiaan aiheesta. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on olla tausta tuleville jatkotutkimuksille ja kehityshankkeille. Opinnäytetyössä esitellään myös lyhyesti jäähdytyksessä käytettävän veden hankintatapoja sekä muita jäähdytyksen tarpeeseen vaikuttavia asioita. Tutkimuksen tuloksena on tarkoitus todentaa, että väliseinärakenteiden sisällä kiertävä vesi jäähdyttää rakennetta ja siten myös sitä ympäröivää tilaa. Erilaiset ennakkoon tehdyt tarkastelut ja saadut tiedot osoittavat, että kyseisiä rakenteita voidaan käyttää myös lämmityksessä. Tässä opinnäytetyössä kuitenkin tutkitaan pääsääntöisesti näiden väliseinärakenteiden jäähdytysvaikutusta.

Opinnäytetyö tehdään Saint-Gobain Weberille Oy Ab:lle tilaustyönä. Idea on tutkijan oma, johon Saint-Gobain Weber Oy Ab on antanut suostumuksensa ja tukensa. Tutkimuksen edetessä on löydetty samanlaisten seinärakenteiden käytöstä kirjallista materiaalia, jota tässä opinnäytetyössä hyödynnetään.

Jäähdytyksen tarve kasvaa tulevaisuudessa, ja tutkijan mielestä onkin tarpeellista kehittää uusia jäähdytystapoja, jotka soveltuvat jo käytössä oleviin rakennusjärjestelmiin.

2 JÄÄHDYTYKSEN TARVE JA SIIHEN VAIKUTTAVAT ASIAT

Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa rakennusten lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen. Suomessa vuoden keskilämpötila on havaintojen mukaan noussut viimeisen sadan vuoden aikana, 1909 – 2008, noin 0,9 °C. Lämpeneminen on tilastollisesti merkitsevää myös keväällä, jolloin lämpötila on noussut 1,6 °C, ja myös kesällä lämpötilan nousun ollessa 0,7 °C. Lyhyempää ajanjaksoa tarkasteltaessa ilmenee, että etenkin talvet ovat lämmenneet huomattavasti. Viidenkymmenen viime vuoden aikana, 1959 – 2008, lämpötila on noussut 3,5 °C eli keskimäärin 0,7 °C kymmenessä vuodessa. Toisaalta talvet 2009 - 2010 ja 2010 - 2011 ovat muistutus siitä, että koko maassa voi yhä esiintyä kylmiäkin talvia. Lämpötilan nousu lyhentää lämmityskautta ja vähentää lämmityksen tarvetta mutta lisää jäähdytyksen tarvetta. Aiempien arvioiden mukaan lämmitysenergian tarve Suomessa tulisi vuoteen 2050 mennessä vähenemään 10 – 14 % vuosiin 1961 – 1990 verrattuna ja jäähdytystarve voisi lisääntyä 10 % vuoteen 2030 mennessä ja 20 – 30 % vuoteen 2080 mennessä. Huolimatta ilmaston keskimääräisestä lämpenemisestä myös tulevana vuosikymmeninä esiintyy kuitenkin kylmiä jaksvoja, joiden aikana lämmitysenergiaa tarvitaan runsaasti. Sääolot vaihtelevat vuodesta toiseen, mutta riittävän pitkien säähavaintoajaksarjojen avulla saadaan selville tarkasteltavalla paikkakunnalla keskimäärin vallitseva ilmasto. Myös rakennusten todellinen energiankulutus vaihtelee sääolojen mukana vuodesta toiseen, mutta energialaskentaan käytettävien säätietojen tulisi kuvata mahdollisimman hyvin paikkakunnan keskimääräisiä ilmastollisia oloja. (Helda.fi)

Rakennusten energialaskentaa varten kehitetty uusi testivuosi TRY2012, korvaa aiemmin käytetyn testivuoden 1979. Uuden testivuoden tunnin välein kootut sääaineistot energialaskennan vyöhykkeillä I – II, III ja IV muodostettiin Vantaalla, Jyväskylässä ja Sodankylässä vuosina 1980 – 2009 tehtyjen säähavaintojen perusteella. Testivuoden kunkin kalenterikuukauden sääaineistot valittiin sellaiselta vuodelta, jonka aikana kyseisen kuukauden sääolot olivat mahdollisimman lähellä ilmastollista keskimääräistilaa. Käytännössä kalenterikuukausien valinta tehtiin tilastollisella menetelmällä tarkastellen lämpötilaa, kosteutta, auringon säteilyä ja tuulen nopeutta. Näitä neljää säämuuttujaa painotettiin sen mukaan, kuinka paljon ne vaikuttavat Suomessa rakennusten lämmitys- ja jäähdytystarpeeseen. Tyypilliselle uudispientalolle ja toimistorakennukselle tehdyt simuloinnit osoittivat, että lämmitys- ja jäähdytystarpeen kannalta tärkein säämuuttuja on ulkoilman lämpötila, mutta kesällä auringon säteilyn vaikutus on suunnilleen yhtä suuri. Sääaineistot mitä TRY2012 esittää, ovat kuitenkin liian matalia käy-

tettäväksi suoraan jäähdytyksen tarkasteluun, eikä niitä voida myöskään käyttää lämmitysjärjestelmien mitoittamiseen. Esimerkiksi ilmastovyöhykkeellä II on esim. heinäkuun keskilämpötilaksi annettu 17,3 °C ja helmikuun keskilämpötilaksi -4,5 °C. (Helda.fi)

Ilmatieteen laitokselta, saamieni tilastojen perusteella olen laskenut kaikki 2000 - 2011 välisten hellepäivien, niitä edeltävien päivien ja niiden jälkeisten päivien lämpötilat. Mittauspiste on Jokioisten mittauspiste, ilmastovyöhykkeellä II. Kellonajat ovat UTC-aikaa, ja ne ovat kolme tuntia Suomen kesäaikaa jäljessä. Tarkastelujakso on erittäin lyhyt, kun kyseessä on ilmaston tarkastelu.

Vuosina 2000 - 2011, on ollut 144 hellepäivää, jolloin lämpötila on ylittänyt 25 °C. Ajanjaksoon mahtuu kaksi jaksoa, jolloin hellettä on ollut jopa yhdeksän päivää peräkkäin. Lyhimmät jaksot ovat luonnollisesti vain yhden päivän mittaisia hellerajan ylityksiä. Kyseisenä ajanjaksona erimittaisia hellejaksoja on ollut yhteensä 43. (Ilmatieteenlaitos. 2013-03-01)

Taulukoissa 1, 2 ja 3 näkyvät kaikkien päivien lämpötilat tunneittain ennen hellejakson alkua, hellejakson aikana ja sen jälkeen. Taulukot on koottu Ilmatieteenlaitokselta saatujen Exel-tilastojen perusteella.

TAULUKKO 1. Lämpötilat ennen hellejaksoa (Ilmatieteenlaitos 2013-03-01)

| Kellonaika (UCT) | Lämpötila [°C] | Kellonaika (UCT) | Lämpötila [°C] |
|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 9:00 | 20,47 | 21:00 | 16,34 |
| 10:00 | 21,07 | 22:00 | 15,18 |
| 11:00 | 21,61 | 23:00 | 14,29 |
| 12:00 | 22,22 | 0:00 | 13,57 |
| 13:00 | 22,69 | 1:00 | 12,97 |
| 14:00 | 22,87 | 2:00 | 12,64 |
| 15:00 | 22,82 | 3:00 | 13,10 |
| 16:00 | 22,68 | 4:00 | 14,46 |

| | | | |
|-------|-------|------|-------|
| 17:00 | 22,09 | 5:00 | 16,60 |
| 18:00 | 20,81 | 6:00 | 18,64 |
| 19:00 | 19,46 | 7:00 | 20,51 |
| 20:00 | 17,81 | 8:00 | 22,01 |

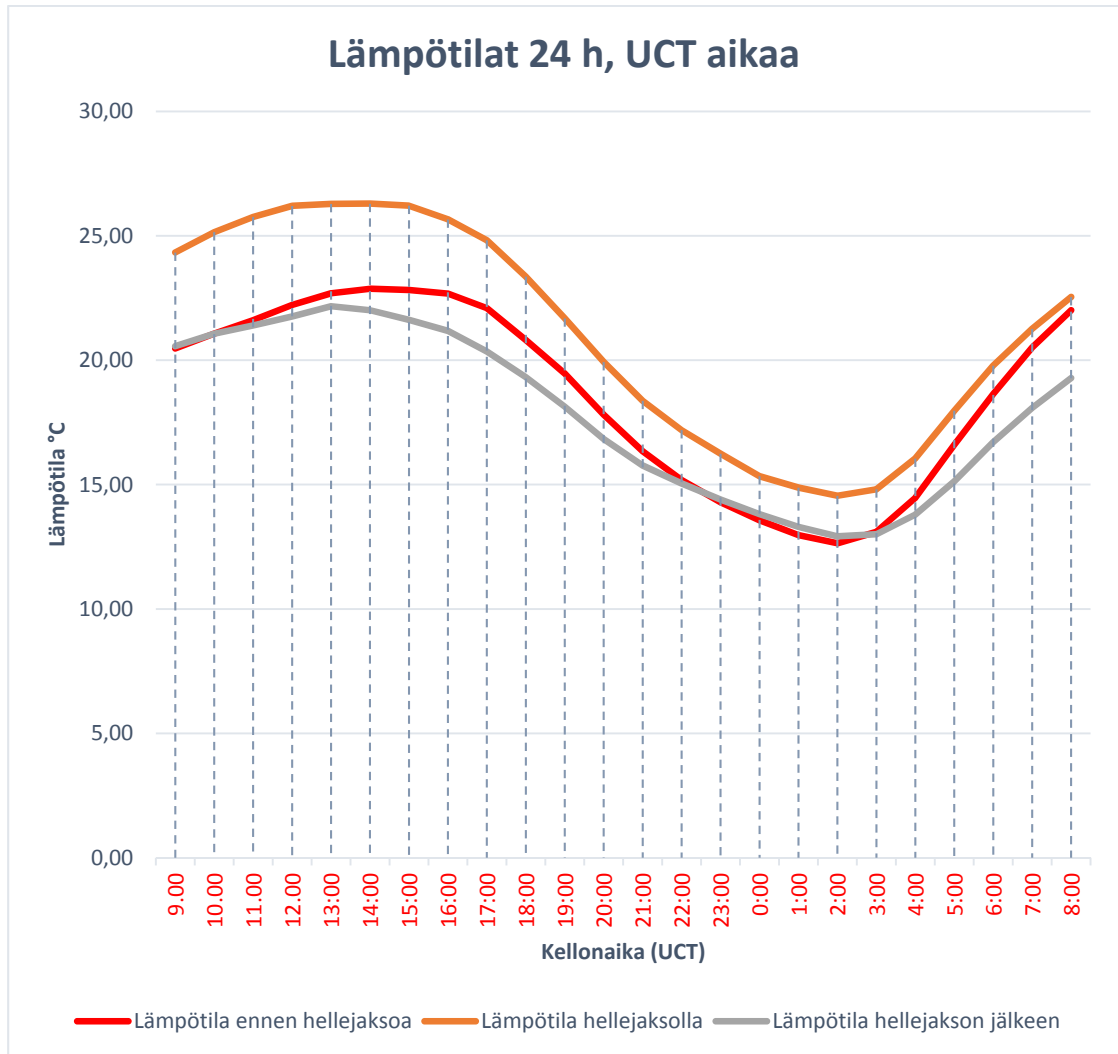
TAULUKKO 2. Lämpötilat hellejaksolla (Ilmatieteenlaitos 2013-03-01)

| Kellonaika (UCT) | Lämpötila [°C] | Kellonaika (UCT) | Lämpötila [°C] |
|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 9:00 | 24,33 | 21:00 | 18,37 |
| 10:00 | 25,15 | 22:00 | 17,19 |
| 11:00 | 25,76 | 23:00 | 16,24 |
| 12:00 | 26,20 | 0:00 | 15,34 |
| 13:00 | 26,28 | 1:00 | 14,88 |
| 14:00 | 26,29 | 2:00 | 14,55 |
| 15:00 | 26,21 | 3:00 | 14,81 |
| 16:00 | 25,66 | 4:00 | 16,05 |
| 17:00 | 24,82 | 5:00 | 17,97 |
| 18:00 | 23,36 | 6:00 | 19,78 |
| 19:00 | 21,68 | 7:00 | 21,26 |
| 20:00 | 19,93 | 8:00 | 22,54 |

TAULUKKO 3. Lämpötilat hellejakson jälkeen (Ilmatieteenlaitos 2013-03-01)

| Kellonaika (UCT) | Lämpötila [°C] | Kellonaika (UCT) | Lämpötila [°C] |
|------------------|----------------|------------------|----------------|
| 9:00 | 20,56 | 21:00 | 15,77 |
| 10:00 | 21,06 | 22:00 | 15,05 |
| 11:00 | 21,40 | 23:00 | 14,40 |
| 12:00 | 21,76 | 0:00 | 13,81 |
| 13:00 | 22,17 | 1:00 | 13,30 |
| 14:00 | 22,01 | 2:00 | 12,92 |
| 15:00 | 21,62 | 3:00 | 13,00 |
| 16:00 | 21,18 | 4:00 | 13,79 |
| 17:00 | 20,35 | 5:00 | 15,13 |
| 18:00 | 19,32 | 6:00 | 16,71 |
| 19:00 | 18,13 | 7:00 | 18,08 |
| 20:00 | 16,83 | 8:00 | 19,28 |

Aritmeettisten keskiarvojen perusteella lasketut tulokset tarkastelujakson lämpötiloista kertovat että yli 25 °C:n ylittäviä tunteja on vain seitsemän kappaletta, kello 10:00 – 16:00. Kuviossa 1 on esitetty käyrien avulla samat asiat kuin taulukoissa 1 - 3.



KUVIO 1. Hellejaksoa edeltävät lämpötilat, hellejakson lämpötilat, hellejakson jälkeiset lämpötilat, UCT aikaa (Ilmatieteenlaitos 2013-03-01)

2.1 Jäähdytys tarpeen määrittäminen rakennuksissa

Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa D2 antaa määräyksiä jäähdytyksen tarpeesta erilaisissa rakennuksissa. D2 toteaa, että rakennuksen käyttöaikana ei oleskeluvyöhykkeen lämpötila saa olla korkeampi kuin 25 °C ja että ulkoilman lämpötila viiden tunnin enimmäisjakson keskiarvon ollessa korkeampi kuin 25 °C voi huoneilman lämpötila ylittää tämän arvon korkeintaan 5 °C. (Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto, Suomen Rakentamismääräyskokoelma D2, 5 - 6.)

Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa D3 antaa määräyksiä jäähdytyksen tarpeesta erilaisissa rakennuksissa. D3:ssa todetaan rakennusten suunnittelusta, että ne

on suunniteltava ja rakennettava siten, että tilat eivät lämpene haitallisesti. Tilojen yllälämpenemisen estämiseksi käytetään ensisijaisesti rakenteellisia tai muita passiivisia keinoja sekä yöllä tehostettua ilmanvaihtoa. Myöskään kesäajan huonelämpötila ei saa ylittää jäähdytysrajan arvoa enemmän kuin 150 astetuntia 1. kesäkuuta ja 31. elokuuta välisenä aikana. (Rakennusten energiatehokkuus. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3, 18 - 19.)

Kesäaikaisille huonelämpötiloille suoritetaan yleensä laskennallinen tarkastelu. Kesäajan huonelämpötilan laskennan tavoite on varmistaa, ettei sisälämpötila nouse kesällä hallitsemattomasti ja että passiiviset ja käyttötekniset keinot huonelämpötilan hallitsemiseksi selvitetään ennen mahdollisen tilojen jäähdytyksen suunnittelua. Jäähdytys lisää aina sekä energiankulutusta että rakennuskustannuksia. Huonelämpötilaan vaikuttavat myös sisäiset kuormat, joihin voidaan vaikuttaa välttämällä valaistuksen ja sähkölaitteiden tarpeetonta käyttöä. Esimerkiksi valaistuksen käytön tarpeeseen kesäisin voidaan vaikuttaa huomattavasti ikkunoiden suuntauksilla ja koolla. Korkeimmat huonelämpötilat esiintyvät yleensä kesäkuukausina. Myös muina kuukausina voi esiintyä tavanomaista korkeampia huonelämpötiloja, jos lämpökuormat ylittävät lämpöhäviöt. (Rakennusten energiatehokkuus. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3, 18 - 19)

2.2 Aurinkosuojaus menetelmät rakennuksissa

Suomen Rakentamismääräyskokoelman mukaan tilojen yllälämpenemisen estämiseksi on ensisijaisesti käytettävä passiivisia keinoja, joista erilaiset aurinkosuojaus menetelmät ovat niistä tehokkaimmat. Aurinkosuojauksella on suuri vaikutus sisäilmaston laatuun ja talotekniikan suunnitteluun. Aurinkosuojauksen suunnittelu tulisikin tehdä ja sen vaikutukset tulisi arvioida ennen jäähdytyksen suunnittelua. Aurinkosuojauksella tarkoitetaan kaikkia niitä menetelmiä, joilla voidaan hallita auringonsäteilyn vaikutuksia rakennukseen. Rakennusten energiakulutus on erittäin riippuvainen käytetystä auringonsuojauksesta. Jos rakennuksen auringonsuojaus toimii, jäähdytyksen tarve ja siten energian tarvekin pienenevät. Auringonsuojauksen tarkoitus on estää ylimääräisen auringonsäteilyn tulo rakennukseen. Kylmänä ajanjaksona auringonsäteilyn tuoma ilmainen lämpöenergia olisi kuitenkin hyvä lisä rakennuksen lämmittämiseen. Aurinkosuojauksen kustannusten ja hyödyn arvioinnissa onkin harkittava useita eri toimintatapoja. Niiden tulokset ja kustannukset voivat vaihdella suuresti. Aurinkosuojaus voidaan jakaa ulko- ja sisäpuolisiin suojausmenetelmiin. (Wouter, Dolmans, Dutoo, Hall, Seppänen. 2011, 39 - 43)

Yleisimmät ulko –ja sisäpuoliset aurinkosuojausjärjestelmät ovat:

- puut
- toiset rakennukset
- kaihtimet
- markiisit
- rullaimet
- pergolat
- kaksoislasijulkisivut
- kalvot lasipinnoilla
- aurinkosuoja ikkunat, lasitukset
- rinnerakentamisenratkaisut
- kaihtimet
- verhot.

(Wouter ym. 2011, 40 - 41)

2.3 Rakennuksen massan vaikutus jäähtytykseen ja lämmitykseen

Rakennusten massan vaikutusta eli lämpökapasiteettia on Suomessa tutkittu 1970-luvulta lähtien. Lämpökapasiteetti kuvaa, miten paljon lämpöenergiaa kappaleeseen sitoutuu lämpötilaeroa kohti. SI-järjestelmän mukainen lämpökapasiteetin yksikkö on J/K. Kun eri tutkimukset puhuvat massasta, termisestä massasta tai rakennuksen lämpökapasiteetista, niin näillä termeillä tarkoitetaan käytännössä samaa asiaa eli eri rakenteiden kykyä sitoa itseensä energiaa. (Hietämäki, Kuoppala, Kalema, Taivalantti., 2003, 4 - 5; betoni.com)

Alkuaikoina tutkimukset Suomessa tehtiin vain massan vaikutuksesta lämmitysenergian säästämiseksi, ja kevyen sekä raskaan ulkoseinän U-arvovaatimukset olivat erilaiset. Vasta vuodesta 1985 alkaen U-arvovaatimukset ovat olleet samat kevyelle ja raskaalle ulkoseinärakenteelle. Väliseinissä ei aseteta U-arvovaatimuksia, paitsi eräissä jäähdytetyissä tiloissa. (betoni.com)

Tähän lukuun on koottu tärkeimmät tiedot kahdesta eri tutkimuksesta ja liitteisiin, liite 1, on lisätty vielä Tampereen Teknillisen Yliopiston Energia- ja prosessitekniiikan raportista 174, Rakennusten massiivisuus, keskeiset tutkimukset ja tulokset -liitteet, joissa on kuvattu rakennusten massiivisuudesta tehdyt tutkimukset aikavälillä 1977 - 2002. Liitteenä olevasta raportista löytyvät keskeisimmät tutkimustulokset, joita eri tutkimuksissa on havaittu. Tutkimuksia on yhteensä 26 kappaletta, jotka on esitetty tarkemmin liitteessä 1. Sen mukaan eri maissa tehdyissä tutkimuksissa on todettu muun muassa, että massiivisilla rakenteilla saadaan laskettua sisälämpötiloja ja että ne vaikuttavat sisälämpötiloihin huomattavasti enemmän kuin kevyet rakenteet. Yötuuletuksella on suuri jäähdytysvaikutus massiivisiin rakenteisiin. Massiivisilla rakenteilla on myös mahdollista säästää lämmitysenergiaa. Lisäksi tässä luvussa on kuvattu yleisesti termisen massan vaikutusta rakennuksen lämpötiloihin ja muiden tutkimuksista saatuja tuloksia ja arvoja. (Hietamäki ym. 2003; betoni.com)

Massan on todettu pienentävän energiakulutusta ja sen on todettu myös vaikuttavan sekä lämmitys- että jäähdytysenergian kulutukseen ja kevät- ja kesäajan sisälämpötiloihin. Pientaloa tutkittaessa on lähteen mukaan todettu, että jos vertaillaan keveintä ja raskainta, massiivisuus pienentää lämmitysenergian kulutusta noin 4 % ja jäähdytysenergiankulutusta noin 40 %. Tutkimuksessa ikkuna pinta-alaksi on oletettu 12 % lattiapinta-alasta. Massan vaikutus rakennuksessa tulee parhaiten esille, kun pystytään hyödyntämään vuorokauden sisäisiä lämpötilan ja auringonsäteilyn vaihteluja. Esimerkiksi kesäaikana luonnollinen yötuuletus pienentää huomattavasti massiivisen talon jäähdytysenergian kulutusta. Kevyissä rakennuksessa yötuuletuksen merkitys on huomattavasti pienempi, koska niissä ei ole massaa, johon viileä ilma voisi varastoitua. (betoni.com)

Pohjoismainen tutkimus massiivisuuden vaikutuksesta energiankulutukseen ja sisäilmaan on samankaltainen muiden tutkijoiden saamien tulosten kanssa. Pohjoismainen tutkimus toteaa, että yleensä erot lähtötiedoissa aiheuttavat suuria eroja laskettuihin energiankulutuksiin. Tässä pohjoismaisessa tutkimuksessa erot lähtötiedoissa pyrittiin välttämään kuvaamalla laskettavat rakennukset mahdollisimman tarkasti. Ensiksi haluttiin tehdä vertaileva tutkimus lämpökapasiteetin vaikutuksesta lämmitys- ja jäähdytysenergiaan pohjoismaiden ilmastossa ja tyypillisille nykyisille rakennuksille. Suomen Rakentamismääräyskokoelma toteaa, että niiden rakennusten, joissa ei ole jäähdytystä tai jäähdytystä on vain yksittäisissä tiloissa, energialaskenta pitää suorittaa laskentatyökalulla, joka perustuu kuukausitason laskentamenetelmään. Kaikkien muiden

rakennusten energialaskenta pitää suorittaa laskentatyökalulla, jonka lämmönsiirron laskenta pystyy ottamaan huomioon rakenteiden lämmönvarausominaisuuden ajasta riippuvaisena, dynaamisella laskentamenetelmällä. Lisäksi Dynaamisen laskentatyökalun kelpoisuus tulee aina osoittaa. Kesäajan huonelämpötilan laskenta pitää suorittaa dynaamisella laskentatyökalulla. (betoni.com)

Tässä pohjoismaisessa tutkimuksessa lämpökapasiteetin vaikutus analysoitiin käyttäen eri laskentamenetelmiä. Pohjoismaisessa tutkimuksessa käytettiin kuutta eri simulointiohjelmaa: Consolis Energy, IDA-ICE, SciaQPro, TASE, VIP ja VTT House Model. Pientalossa tutkittiin neljä rakennevaihtoehtoa: Erittäin kevyt, kevyt, puoliraskas ja raskas. Erittäin kevyessä ei ollut lainkaan massiivisia rakenteita, ja kevyessä ainoastaan lattia oli massiivinen. Asuinkerrostalossa tutkittiin kaksi vaihtoehtoa: Kevyt ja massiivinen. Kuudella eri ohjelmalla laskettu erittäin kevyen ja raskaan pientalon lämmitysenergia oli välillä 60...70 kWh/m²/v ja jäähdytysenergia välillä 3...13 kWh/m²/v. Lasketun maksimi- ja minimikulutuksen ero oli 10 kWh/m²/v, suhteellisesti lämmitysenergiassa 15 % ja jäähdytysenergiassa 75 %, prosentit ovat maksimienergiankulutukseen verrattuna. Tämä on tärkeä tietää, jos laskentamenetelmä on vapaasti valittavissa. Tällöin olisi periaatteessa mahdollista saada 15 %:n parannus lämmitysenergiassa ja 75 %:n parannus jäähdytysenergiassa vain laskentaohjelmaa vaihtamalla. Eri laskentamenetelmät ja -ohjelmat antavat massiivisuudelle siis eri vaikutuksen. Pohjoismaisen tutkimuksen mukaan suhteellisen pienellä ikkunapinta-alalla, 12 % lattiapinta-alasta, massiivisuus säästää noin 3 - 5 % lämmitysenergiassa ja 30 - 50 % jäähdytysenergiassa, kun verrataan erittäin kevyttä ja raskasta rakennusta. Vastaavasti, kun ikkunakoko on suurempi, 20...45 % lattiapinta-alasta, ero lämmitysenergiassa erittäin kevyen ja raskaan rakennuksen välillä voi kasvaa 14 %:iin. Absoluuttiset erot pientalon lämmitys- ja jäähdytysenergiassa kasvavat noin tasolta 2 kWh/m²/v tasolle 15 kWh/m²/v, kun suhteellinen ikkunakoko kasvatetaan 45 %:iin lattiapinta-alasta. Ikkunapinta-alalla on siis suuri merkitys energian kulutukseen. Myös ikkunoiden suuntaus eri ilmansuuntiin aiheuttaa erilaisia tarpeita sekä jäähdytys- että lämmitysenergian tarpeisiin. Tätä ikkunoiden vaikutusta eri ilmansuunnista tulevalle auringon säteilylle on tarkasteltu tarkemmin kuviossa 6. (betoni.com)

Pientalolla saadut tulokset soveltuvat yleisesti ottaen myös asuinkerrostaloihin. Kuitenkin pientaloon verrattuna asuinkerrostalon jäähdytysenergia on huomattavasti suurempi, noin 50 % lämmitysenergiasta. Asuinkerrostalon lämmitysenergia vaihtelee välillä 55...70 kWh/m²/v ja jäähdytysenergia välillä 20...50 kWh/m²/v kevyessä ja ras-

kaassa rakennuksessa. Tässä esitetyt tutkimukset sekä liitteessä 1 esitetyt tutkimustulokset osoittavat, että massiivisilla rakenteilla on mahdollista säästää energiaa ja luoda miellyttävämmät sisälämpötilat erilaisiin tiloihin. Tämä kaikki on siis mahdollista ilman vesiputkistoja rakenteissa. Vesiputkistojen käyttö jäähdytykseen tai lämmitykseen parantaa siis varmasti sisäilmaston olosuhteita. (Betoni.com)

Seuraavassa käsitellään vielä termistä massaa omana kokonaisuutenaan. Termisen massan voisi nimetä myös massaksi tai lämpökapasiteetiksi. Terminen massa voidaan määritellä koko rakennuksen massana, jolla on kyky sitoa lämpöenergiaa. Rakennuksen termistä massaa voidaan hyödyntää lämpökuormien lyhytaikaisena varastona ja lämpötilojen vaihtelujen tasaajana. Kahi- ja Leca-rakenteet toimivat termisenä massana, ja niillä on jäähdytys- ja lämmöntasausvaikutusta myös ilman vesikiertoista putkistoa. Rakennuksien termistä massaa voidaan käyttää hyväksi asuinrakennusten lämmitystä ja jäähdytystä suunniteltaessa.

Terminen massa voidaan jakaa kahteen eri osa-alueeseen eli ulkoiisiin ja sisäisiin termisiin massoihin. Ulkoiset termiset massat, ulkoseinät ja kattorakenteet, altistuvat suoraan ulkoilman lämpötilan vaihteluille. Sisäiset termiset massat, esimerkiksi tulisijat, välipohjat ja väliseinät, vaikuttavat lähinnä sisäilman lämpötilaan. Tulisija, jonka massa voi olla suurikin, sitoo myös lämpöä itseensä, vaikka sitä ei lämmitettäisi. Kesäkaudella terminen massa sitoo itseensä sisäisten ja ulkoa välittyvien lämpökuormien energiaa. Tällöin ulkoisten lämpökuormien siirtyminen sisätiloihin hidastuu. Ulkoseinärakenteiden U-arvoilla ja tiiveydellä on tässä suuri merkitys. Termisen massan varaama yllämpö voi myös lisätä rakennuksen jäähdytystarvetta, mutta varaamalla termiseen massaan jäähdytysenergiaa vähennetään jäähdytystarvetta, kuten tässä tutkimuksessa on esimerkki seinissä tehty. (kivitaloinfo.fi)

Yötuuletuksen avulla voidaan myös pienentää termisen massan lämpötilaa. Ilmanvaihdolla tai ikkunoita ja ovia yöksi avaamalla termiseen massaan varataan yöilman viileyttä. Luvussa 2.1 esitetyissä hellejaksojen lämpötiloissa keskimääräinen yölämpötila oli hellejaksolla kello 21.00 – 5.00, 16,15 °C. Tämän viileän ilman tuominen sisälle vaikuttaa termisen massan lämpötilaan ja näin jäähdyttää myös sisäilmaa. Termisen massan varastoima lämpö siis poistetaan yöaikaisella ilmanvaihdolla tai tuuletuksella ja samalla varmistetaan, että terminen massa voi toistaa lämmön varastoitumisen seuraavana hellepäivänä. Yötuuletuksella ei voida järjestää kaikissa rakennuksissa, mutta se soveltuu parhaiten toimisto- koulurakennusten jäähdytykseen, koska niissä ei yleensä ole yöaikaista käyttöä. Tutkittavana olevien jäähdytettävien Kahi- ja Leca-rakenteiden

käyttö on mahdollista öisin tai päivisin. Niissä voidaan varmasti hyödyntää lisänä myös yötuuletukseen aikaansaamaa hyötyä. Jos yötuuletus ei ole mahdollista, niin tässä tutkimuksessa tutkittaviin rakenteisiin asennettu jäähdytys voidaan ajastaa toimimaan pelkästään öiseen aikaan, jolloin yön aikana kiertänyt vesi jäähdyttää rakenteet ja siten myös huonetilat valmiiksi päiväaikaista käyttöä varten. (kivitaloinfo.fi)

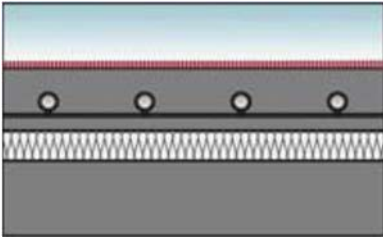
Pinnan värillä on myös vaikutusta rakenteiden termisiin ominaisuuksiin. Tummat värit absorboivat enemmän lämpöä kuin vaaleammat värit, ja siksi vaaleiden pintojen lämpötila on matalampi kuin tummien pintojen. Tämän vuoksi vaaleita pintoja tulisi käyttää kun termistä massaa käytetään jäähdytystarkoitukseen. Lisäksi vaaleat pinnat heijastavat hyvin auringon valoa ja keinovaloa pois eivätkä ime sitä itseensä. Tässä tutkimuksessa jäähdytysputkiston sisältävät väliseinärakenteet eivät kuitenkaan ole riippuvaisia pinnan väristä, koska jäähdytys on rakenteen sisällä ja koska ulkoa tulevan lämmön vaikutusta ei suoranaisesti huomioida. Yleensä lämpöä varastoivia rakenteita, kuten kivirakenteisia seiniä ja massiivista laattalattiaa, kannattaa suosia paikoissa, jonne aurinko säteilee suoraan. (kivitaloinfo.fi)

2.4 Seinien käyttö jäähdytyksessä ja lämmityksessä

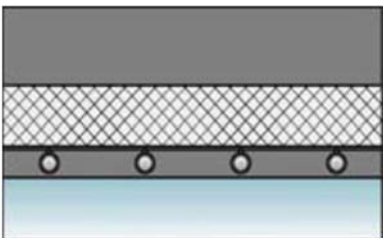
Ihminen tuntee eri suunnista tulevan lämpötilan eri tavalla. Se riippuu siitä, mistä suunnasta lämpö tulee, ja siitä istuuko vai seisooko ihminen. REHVA ohjekirja NO 7 (Babiak, Olesen & Petras, 2013.) on laskenut erilaisia kulmakertoimia siihen, mistä suunnasta esimerkiksi tilan jäähdytys tehdään. Lämpötilan tunteminen riippuu paljon myös tilan koosta. Eräässä esimerkissä ohjekirja käyttää huonetta, jonka koko on 6 m x 6 m ja jossa lämpötilaa lattiassa lasketaan viisi astetta. Tällä on sama vaikutus kuin ilman lämpötilaa laskettaisiin kaksi astetta. (Babiak ym. 2013,12 - 13.)

Ohjekirja antaa myös ohjeita seinien käyttöön lämmityksessä. Seinien maksimipintalämpötila on välillä 35 - 50 °C, mutta yli 42 °C:n lämpötilat voivat jo aiheuttaa palovammoja. Varsinkin vanhusten ja lasten käyttämissä tiloissa pintalämpötilojen rajoittaminen matalammaksi on pakko tehdä. Seinien pintamateriaalilla on myös suuri merkitys siinä, miten lämmön tuntee koskettaessa seinää paljaalla kädellä. Seinien käytöstä on myös syytä huomioida lämpöhäviöt seinän toiselle puolelle. Kun seiniä käytetään jäähdytykseen, pitää myös huomioida kastepiste. Seinät eivät saa aiheuttaa kastepisteen muodostumista tilaan. Jäähdytetyt seinät eivät aiheuta paleltumia, koska lämpötilat eivät

laske vaarallisen mataliksi. Kuvat 1 - 4 ovat ohjekirjan esimerkki piirustuksia vesikiertoisille säteilysysteemeille, joita voidaan käyttää lämmitykseen tai jäähdytykseen. (Babiak ym. 2013,16.)

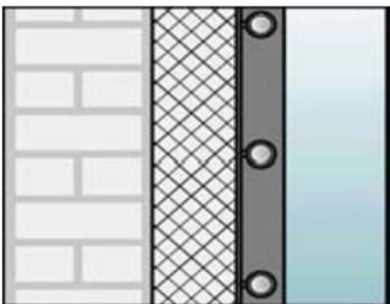


KUVA 1. Lattia jäähdytysputkineen, (Babiak ym. 2013, 22.)

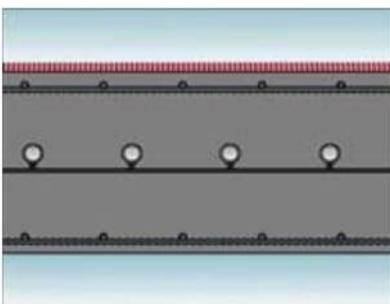


KUVA 2. Väli- tai yläpohja jäähdytysputkineen, (Babiak ym. 2013, 22.)

KUVA 3. Seinä jäähdytysputkineen, (Babiak ym. 2013, 22.)



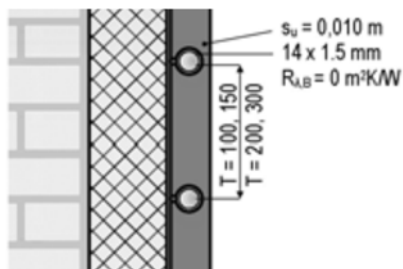
KUVA 3. Seinä jäähdytysputkineen, (Babiak ym. 2013, 22.)



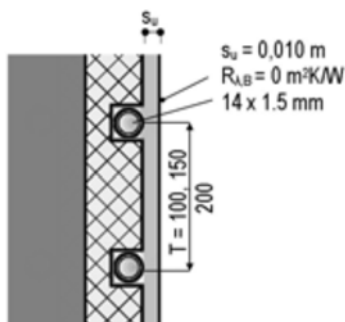
KUVA 4. Aktiivinen laatta jäähdytysputkineen, jäähdytys tai lämmitys molempiin suuntiin, (Babiak ym. 2013, 22.)

Lämmön vaihto seinän ja tilan välillä riippuu seinän sijoittelusta ja seinän ja tilan lämpötiloista. Seinässä olevat vesijohdot pitää sijoittaa niin, että ne ovat kiinteästi yhteydessä seinässä olevaan materiaaliin. Muuten lämpö tai kylmä ei johdu tehokkaasti seinärakenteeseen eikä siten ympäröivään tilaan. Vesijohdot on siis asennettava kiinteään aineen sisään. Kahi- ja Leca-väliseinärakenteissa diffuusiosuojatut vesijohdot on valettu edellä mainituissa rakenteissa oleviin roiloihin betonilla. Näin rakenteissa olevat vesijohdot voivat tehokkaasti luovuttaa lämpöä tai kylmää rakenteeseen ja siten ympäröivään tilaan. Kirjassa esitellyllä rakenteella seinästä voidaan saada tehokkaasti kokonaislämmönvaihdoksi 26 °C:n huoneeseen jäähdytystä 8 W/m²K ja 20 °C:n huoneeseen lämmitystä 8 W/m²K. Hyväksyttäviksi seinien pintalämpötiloiksi kirja antaa lämmityskäytössä noin 40 °C ja jäähdytyskäytössä 17 °C. Maksimikapasiteetit kirjan mukaan ovat lämmityksessä 160 W/m² ja jäähdytyksessä 72 W/m². (Babiak ym. 2013, 22 - 24.)

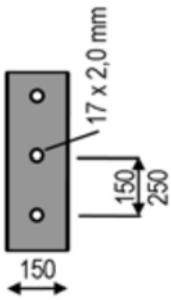
Seuraavissa kuvissa 5 - 8 on esitelty ohjekirjan erilaiset seinävaihtoehdot. Tässä tutkimuksessa seinärakenteiden nimityksiä käytetään samalla tavalla kuin ohjekirjassa. Seiniä on neljää eri tyyppiä. Seinätyypit A ja B ovat lähinnä ulkoseinärakenteita ja tyypit E ja F ovat väliseinärakenteita. Tyypissä B on käytetty alumiinista lämmönluovutuslevyä. Tyypit E ja F kuvaavatkin tässä tutkimuksessa tutkittavia seinärakenteita ja niiden vaikutusta jäähdytykseen tai lämmitykseen. Tyypit E ja F ovat 150 mm paksuja ja valmistettu betonista. (Babiak ym. 2013, 34.)



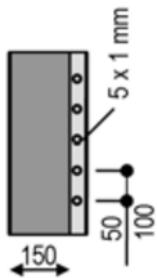
KUVA 5. Seinätyyppi A, (Babiak ym. 2013, 34.)



KUVA 6. Seinätyyppi B, (Babiak ym. 2013, 34.)



KUVA 7. Seinätyyppi E, (Babiak ym. 2013, 34.)

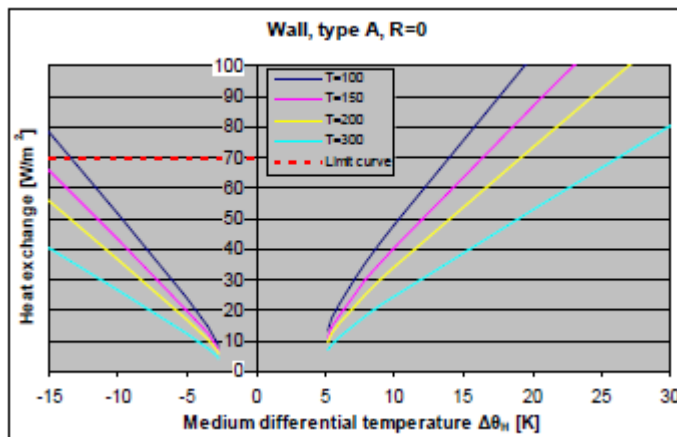


KUVA 8. Seinätyyppi F, (Babiak ym. 2013, 34.)

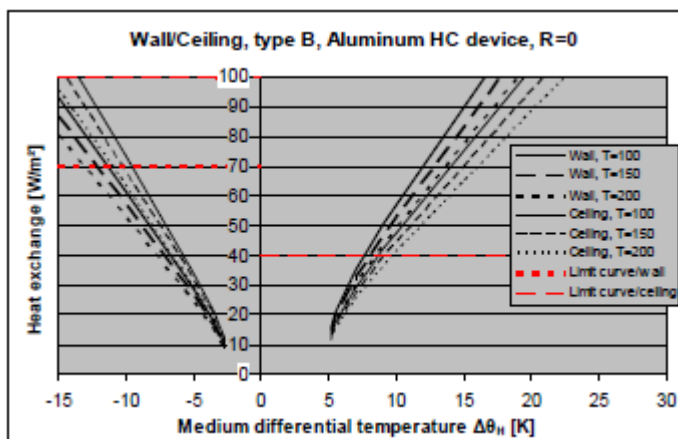
Seuraavat kuvat kuvaavat seinärakenteiden jäähdytys- ja lämmitystehoa. Teho on riippuvainen vesijohtojen etäisyydestä toisiinsa. Kuviossa näkyvien putkien etäisyydet ovat 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm ja 300 mm. Esimerkkiseinissä vesijohdot on asennettu vaakaan. Vesijohdot voidaan asentaa vaaka- tai pystysuuntaisesti, mutta sillä ei ole merkitystä tehoon. Kuviossa on myös kuvattu kohta, Limit curve, joka osoittaa jäähdytys- tai lämmityksen maksimitheon. Lähteen mukaan jäähdytyksessä maksimi arvo on siis 72 W/m^2 ja lämmityksessä 160 W/m^2 . Lämmityksen maksimi arvo ei näy kaavioissa, koska, se aiheuttaisi jo seinän pinnan liiallista lämpenemistä. Tyypeissä E ja F kuvio huomioi myös pinnan lämpövastuksen vaikutuksen, lämmön tai jäähdytys siirtymisessä. Kuviossa esiintyvät negatiiviset jäähdytystä osoittavat luvut eivät tarkoita, että seinä olisi jäässä, vaan sitä, kuinka monta astetta milläkin teholla vesi jäähdyttää seinää. Laskenta on tehty itseisarvolausekkeella, jolloin origon molemmille puolille tulee arvoja. Tässä tapauksessa negatiivisella puolella olevat arvot kuvaavat jäähdytysvaikutusta. (Babiak ym. 2013, 34 – 40, 44 - 47.)

Kahi- ja Leca-väliseinärakenteissa olevissa pystyroiloissa vesijohdot voidaan asentaa pystysuuntaisesti. Kahi-järjestelmästä löytyy myös väliseinäpönttipalkkiharkko, jossa on noin $45 \times 55 \text{ mm}$ oleva vaakasuuntainen ura. Palkki on ulkomitoiltaan $600 \times 85 \times$

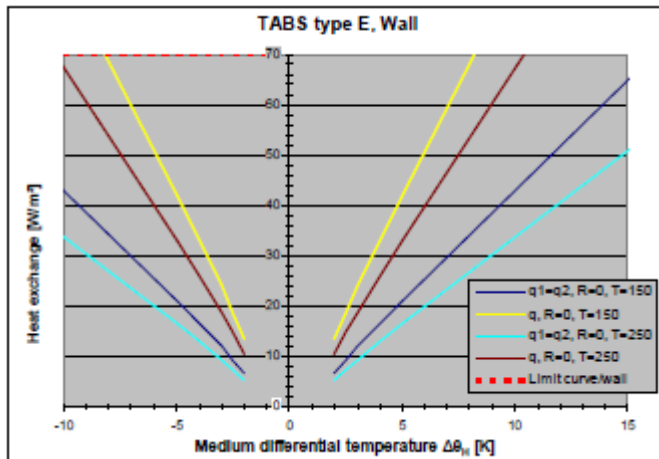
198 mm, ja sitä voidaan käyttää 85 mm leveässä Kahi-väliseinäjärjestelmässä. Tällöin vesijohto voidaan asentaa myös vaakasuuntaisesti, mikä on työtekniisesti helpompaa. Ne kerrokset, joihin halutaan vesijohto, voidaan muurata kerroksittain ja asentaa vesijohto sekä valaa esimerkiksi betonilla ennen seuraavaa kerrosta. Kahi-runkoponttijärjestelmässä löytyy myös runkoponttipalkkiharkko, jossa on 70 x 90 mm leveä vaakaura. Kappaleen kokonaismitat ovat 300 x 130 x 198 mm, ja sitä voidaan käyttää 130 mm leveässä Kahi-järjestelmässä. Leca EasyLex-järjestelmässä vaakauraista kappaletta ei ole, joten siellä ei vaakasuuntaista putkitusta voida tehdä.



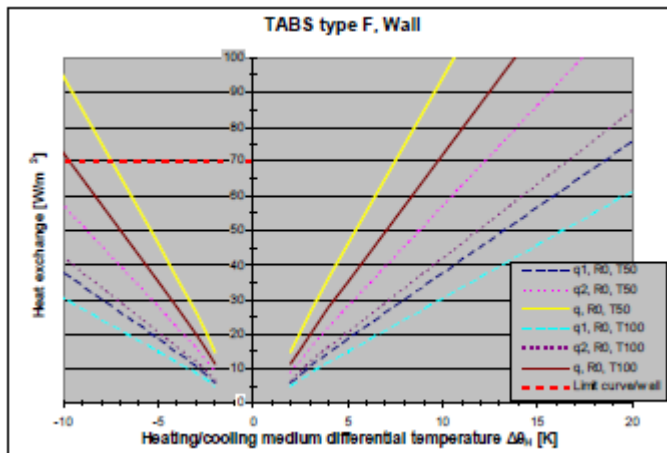
KUVIO 2. Seinätyyppi A, lämmön luovutus eri lämpötiloissa ja eri vesijohtojen asennus väleillä, (Babiak ym. 2013, 35.)



KUVIO 3. Seinätyyppi B, lämmön luovutus eri lämpötiloissa ja eri vesijohtojen asennus väleillä, (Babiak ym. 2013, 37.)



KUVIO 4. Seinätyyppi E, lämmön luovutus eri lämpötiloissa ja eri vesijohtojen asennus väleillä. (Babiak ym. 2013, 46.)



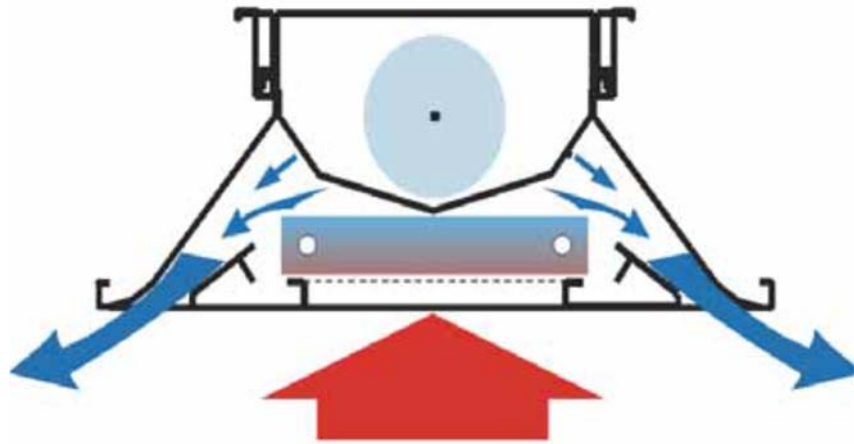
KUVIO 5 Seinätyyppi F, lämmön luovutus eri lämpötiloissa ja eri vesijohtojen asennus väleillä, (Babiak ym. 2013, 47.)

Näistä seinärakenteista seinätyyppi F kuvaa parhaiten tässä tutkimuksessa käytettyjä Kahi- ja Leca-seinärakenteita. Ominaispaino betonilla on yleensä 2000 – 2300 kg/m³, Kahi-rakenteilla 1800 -1900 kg/m³ ja Leca-rakenteilla 950 kg/m³.

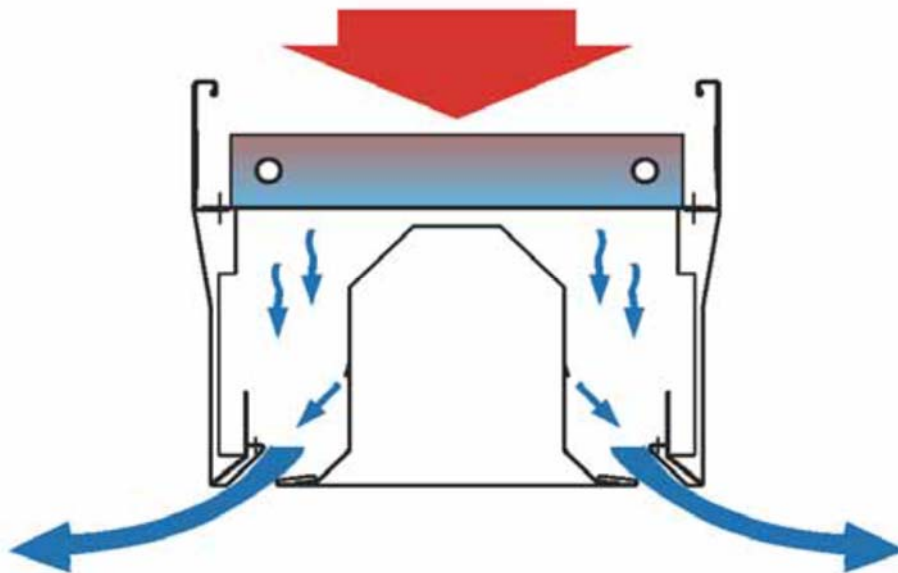
2.5 Jäähdytetyt palkit - chilled beams, toiminta jäähdytyksessä

Jäähdytettyjen palkkien toiminta on osittain samanlaista kuin opinnäytetyössä tutkittavien seinärakenteiden toiminta. Palkkeja ja seinärakenteita voidaan käyttää jäähdytykseen ja lämmitykseen ja molemmissa tapauksissa välittäjäaineena voidaan käyttää vettä. Tämän vuoksi ne on hyvä esitellä tässä opinnäytetyössä.

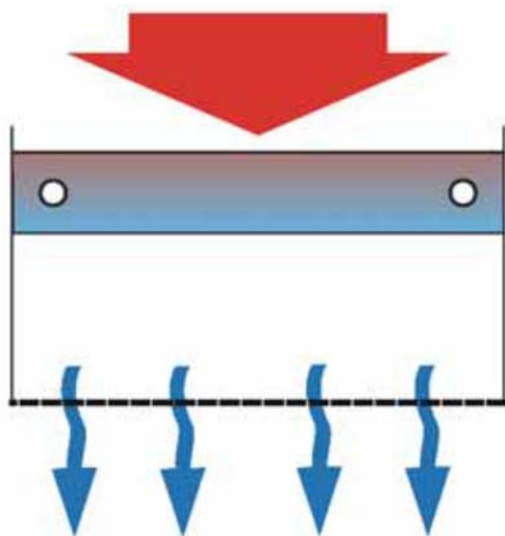
Jäähdytetyt palkit jaetaan aktiivisiin jäähdytyspalkkeihin, Active chilled beams ja passiivisesti jäähdytettyihin palkkeihin, Passive chilled beams. Palkkien toimintaperiaate on esitetty kuvissa 10 -12. (Virta, Butler, Gräslund, Hogeling, Kristiansen, Reinikainen, Svensson, 2004, 1 - 2)



KUVA 9. Suljettu aktiivi jäähdytyspalkki, Closed active chilled beam, (Virta ym. 2004, 1)



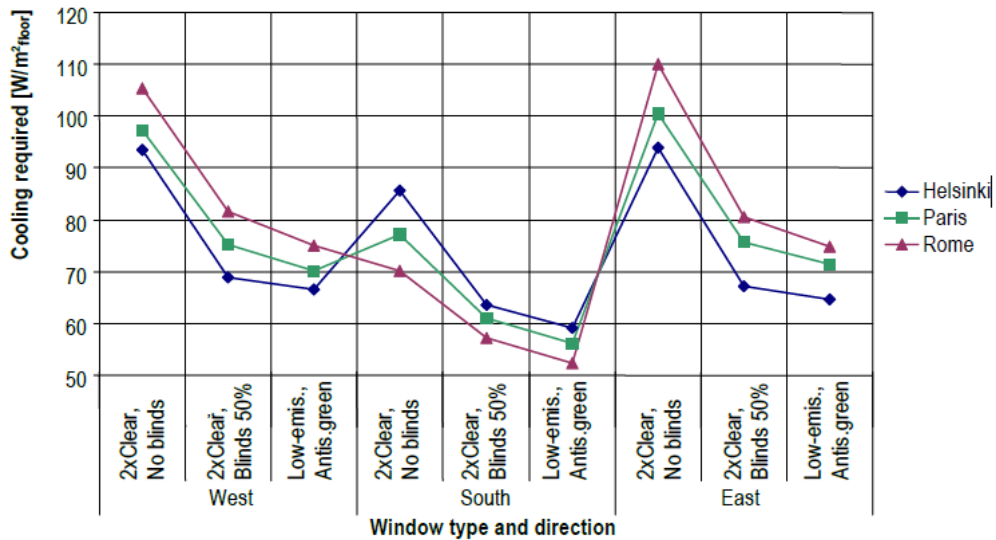
KUVA 10. Avoin aktiivi jäähdytyspalkki, (Virta ym. 2004, 1)



KUVA 11. Passiivinen jäähdytyspalkki, (Virta ym. 2004, 1)

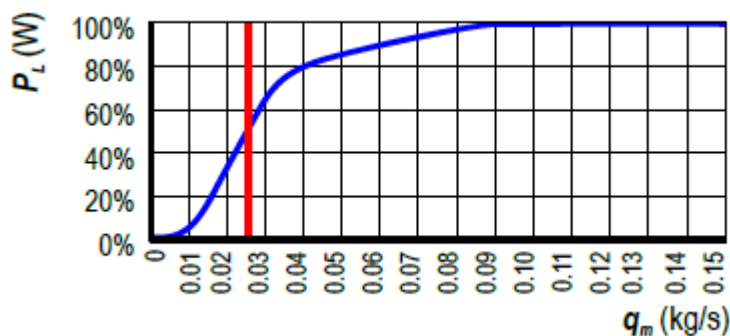
Lähteenä käytetty ohjekirja toteaa siis, että kun välittäjäaineena käytetään vettä, palkkeja voidaan käyttää lämmitykseen tai jäähdytykseen. Jäähdytyspalkit sopivat parhaiten esimerkiksi erilaisiin toimistoihin, hotellihuoneisiin, kauppoihin ja pankkeihin. Niitä ei suositella käytettäväksi tiloissa, joissa tilan käyttäjistä voi aiheutua suuria lämpöisiä tai epäpuhtauksia. Myöskään suuren jäähdytystarpeen vaativiin tiloihin, joissa on jo muu tehokas jäähdytysjärjestelmä tai ilmastointi, palkkeja ei suositella. Aktiiviset palkit asennetaan yleensä kattoon, mutta passiivisia palkkeja voidaan käyttää sekä katossa että lattiassa. (Virta ym. 2004, 1)

Aktiivisia jäähdytyspalkkeja voidaan käyttää, kun jäähdytystehon vaatimukset ovat alle 120 W/lattia m^2 . Parhaiten ne toimivat, kun jäähdytystehon vaatimus on $60 - 80 \text{ W/lattia m}^2$. Passiivisesti jäähdytetyt palkit toimivat parhaiten kun jäähdytystehon vaatimus on $40 - 80 \text{ W/lattia m}^2$. Tässäkin tapauksessa voidaan todeta, että passiiviset varjostuskeinot pienentävät palkeilta vaadittavaa tehoa. Kuviossa 6 on esitetty esimerkinomaisesti erilaisten ilmansuuntien ja ikkunalasien vaikutus jäähdytyksen tarpeeseen. Maksimi jäähdytystarpeeksi on saatu 110 W/lattia m^2 . (Virta ym. 2004, 2, 21 - 22)



KUVIO 6. Ikkunoiden ja ilmansuuntien vaikutus jäähdytyksen tarpeeseen, (Virta ym. 2004, 22)

Palkkien teho riippuu menevän veden lämpötilasta ja virtaamisnopeudesta. Kirjassa olevissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että lämmön siirtyminen ei automaattisesti nouse, vaikka virtausta suurennettaisiinkin huomattavasti. Virtausnopeudelle on määriteltävissä tietty piste, jossa virtausnopeus menettää merkitystään lämmön siirtämisessä. Ohjekirjassa on määritelty veden minimivirtausnopeudet suhteessa käytettävien putkien halkaisijaan. Ne on esitetty taulukossa 4. Kuviossa 7 on esitetty lämmön siirtyminen jäähdytetyssä palkissa. Veden virtaus q_m ei lisää tehokkaasti lämmön siirtymistä P_L , kun tehokkuuden raja saavutetaan virtauksessa. Tämä on syytä huomioida myös tässä opinnäytetyössä seinärakenteiden virtausta suunniteltaessa. (Virta ym. 2004, 4 - 5)



KUVIO 7. Veden virtauksen vaikutus lämmön siirtymiseen, (Virta ym. 2004, 4)

TAULUKKO 4. Virtausnopeuden suhde putken halkaisijaan, (Virta ym. 2004, 5)

| Outside diameter (mm) | Water velocity (m/s) | Minimum water flow rate (kg/s) |
|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
| 10 | 0.28 | 0.016 |
| 12 | 0.23 | 0.018 |
| 15 | 0.18 | 0.024 |
| 18 | 0.15 | 0.030 |
| 22 | 0.12 | 0.038 |

Ohjekirja toteaa, että ulkopuolisilla varjostuksilla eli erilaisilla passiivisilla keinoilla, joita tässäkin opinnäytetyössä on esitetty, voidaan pienentää jäähdytyksen tarvetta. Hyvän sisäilmaston saavuttamiseksi ohjekirja esittää seuraavat asiat:

- Jäähdytyskapasiteetti on aktiivisissa palkeissa 250 W/m, maksimi 350 W/m ja passiivisissa palkeissa 150 W/m, maksimi 250 W/m, jolloin vedon tunnetta ei pitäisi huomata.
- Hyvän U-arvon omaavat ilmativiit ikkunat, joissa käytetään tehokasta aurin-gonsuojausta.
- Ikkunoiden ympärillä ei ole ikkunasta johtuvaa ilman liikettä.
- Aktiivisten palkkien lämmityskapasiteetti on tyypillisesti 150 W/m, joka sekoittaa tehokkaasti palkin tuottaman ilman, huoneen ilmaan.
- Palkkien toiminta suunnitellaan ottamaan huomioon vallitsevat erilaiset ilmasto olosuhteet.
- Käytetään sopivaa ohjausjärjestelmää, säätämään palkkien tehoa.
- Palkkien sijoittelu ja asennus tehdään oikein.

Passiivisten palkkien toiminta vastaa lähinnä tässä opinnäytetyössä tutkittavien seinärakenteiden toimintaa. Molempien toiminta perustuu luonnolliseen konvektioon ja säteilyyn. Ohjekirjasta voidaan hyödyntää passiivisten palkkien toiminnasta saatua tietoa seinärakenteiden vastaaviin ominaisuuksiin. Pelkästään jäähdytykseen käytettävien palkkien veden lämpötila on minimissään 14 °C, koska palkeissa olevat putket voivat kondensoida vettä tiloihin. Seinärakenteissa ei ole kondensaation vaaraa, koska niissä käytetään diffuusiosuojattua putkea, joka ei kondensoi vettä rakenteeseen eikä aiheuta veden tunkeutumista tiloihin. Palkeissa menevän veden lämpötila valitaan 6 - 10 °C pienemmäksi kuin huoneeseen vaadittu lämpötila. Tällöin palkkien teho riittää, ja vaadittu jäähdytysteho voidaan saavuttaa. (Virta ym. 2004, 3 – 6, 10 – 11, 21 – 24,)

3 JÄÄHDYTTÄVÄN VEDEN HANKINTATAPOJA

Tässä luvussa on tarkoitus esittää jo toimivia jäähdytyksen hankintatapoja ja herättää ajatuksia muille suunnittelijoille siitä, mistä saisi taloudellisesti ja energiatehokkaasti hankittua jäähdytykseen soveltuvaa ”kylmää” vettä.

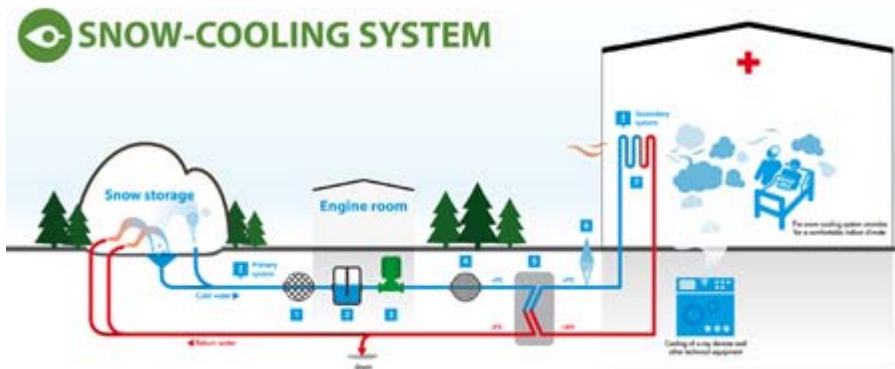
3.1 Snow-Cooling Systems - jäähdytys varastoidun lumen avulla

Ruotsissa Sundsvallissa sijaitsevassa sairaalassa jäähdytys hoidetaan talven aikana varastoidun lumen avulla. Sairaalan pinta-ala on 19 000 m². Järjestelmän ovat kehittäneet ruotsalainen Snow-power AB ja Västernorrlandin maakäräjät. Lumijäähdytys sai vuonna 2011 useita palkintoja käytännön ratkaisusta ilmastonmuutoksen torjuntaan. Menetelmä ei ole uusi, vaan esimerkiksi ennen vanhaan maalaistaloissa on käytetty sahanpurulla peitettyä lunta ja jäätä kylmää vaativien elintarvikkeiden esimerkiksi maidon, viilentämiseen kesäkuukausina. Sundsvallissa lumi kerätään talven aikana ja keväällä se eristetään puulastukerroksella. Syntyvä sulamisvesi suodatetaan ja pumpataan kohteeseen lämmönvaihtimen kautta. Jäähdytykseen käytetty vesi pumpataan takaisin lumivarastoon ja siellä se sekoitetaan uuteen sulamisveteen. (lvn.se)

Sundsvallissa jäähdytyskuorma on noin 2500 kW ja laitteiston maksimikapasiteetti on 3000 kW. Laitteistoa on käytetty vuodesta 2000 alkaen. Sähkönkulutus jäähdytyksessä on pienentynyt noin 90 %. Hiilidioksidipäästöt olivat vähentyneet laskennallisesti kymmenen vuoden jaksolla 2500 tonnia pelkästään sähkön säästön vaikutuksesta. (lvn.se)



KUVA 12. Yleiskuva Sundsvallin sairaalan lumen jäähdytyksestä, (lvn.se)



KUVA 13. Toimintaperiaate lumijäähdytykselle, (lvn.se)

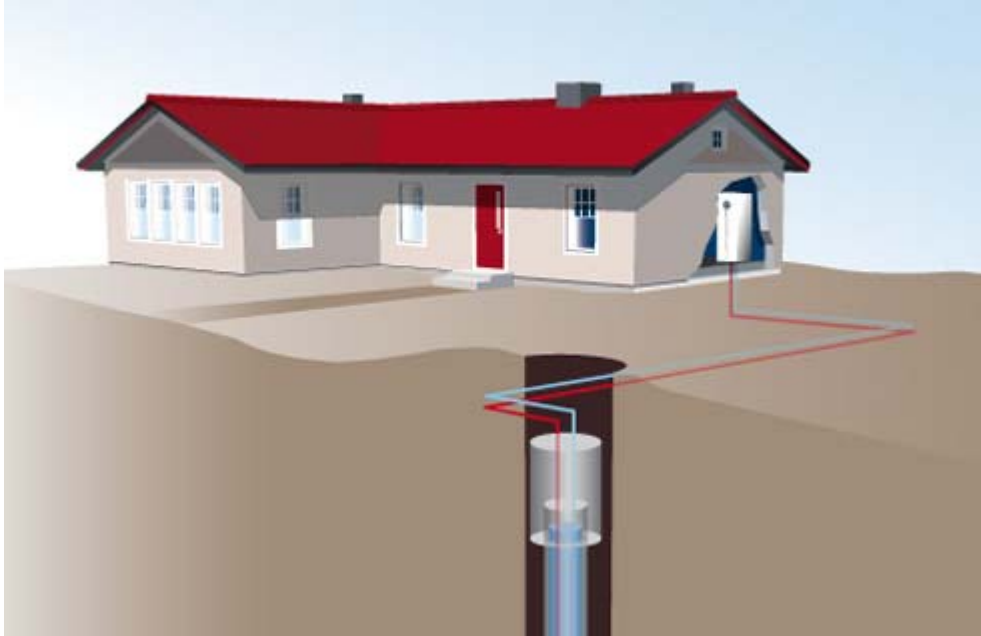
Suomessakin voitaisiin käyttää samanlaista menetelmiä. Lunta meillä on joka vuosi, ja kaupunki alueilla sitä joudutaan siirtämään lumenkaatopaikoille. Olisi mielenkiintoista tutkia, kuinka paljon jäähdytystä saataisiin aikaan vain kierrättämällä riittävän pitkää keruuputkistoa lumen seassa. Keruuputkistossa oleva välittäjäaine jäähtyisi, ja se voitaisiin käyttää jäähdytyksessä hyväksi. Kontiolahden kunnassa varastoidaan lunta, jäähdytettyä hiihtolatua varten. Siellä varastointi on onnistunut jo usean vuoden ajan. Lumi on kerätty kasoihin ja peitetty sahanpurulla ja kevytpeitteillä ja alkusyksyllä se on levitetty varjoisalle hiihtoladulle.

Pientaloissa olisi mielestäni mahdollista rakentaa perinteisiä rengaskaivoja, joihin voitaisiin kasata lunta ja asentaa jäähdytystä varten keruuputkisto. Käytännössä lumen tarvitsisi kestää kaivossa vain toukokuusta heinäkuuhun, jolloin jäähdytystä pääasiassa tarvittaisiin. Koristeltu kaivo kansineen sopii varmasti vaativankin pihasuunnittelijan vaatimuksiin. Tämäkin on asia jota varmasti kannattaisi tutkia lisää.

3.2 Maalämpöpumput ja kierrätysputkistot

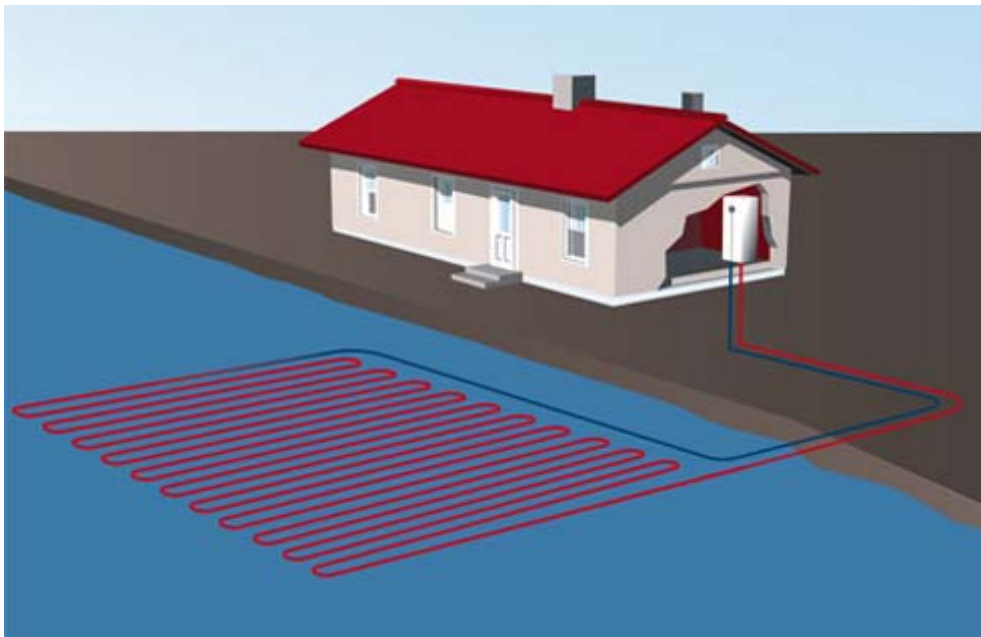
Yksi tapa hankkia edullisesti jäähdytykseen tarvittavaa kylmää vettä on maalämpöpumpuissa käytettävien porakaivojen hyödyntäminen veden hankintaan. Maalämpöpumppu valmistajat puhuvat tällöin kalliolämmöstä. Tämä tekniikka hyödyntää kallioperään varastoitunutta aurinkoenergiaa. Saatavilla olevista vaihtoehdoista kalliolämpö tuottaa suurimmat säästöt. Porakaivoa ei todennäköisesti kannata porata vain jäähdytykseen tarvittavan veden takia, mutta yleisin lämmönhankintatapa maalämpöpumpuihin on juuri porakaivo. Jos se siis tehdään, niin porakaivosta tuleva noin viisiastei-

nen vesi voidaan hyödyntää pienin kustannuksin myös jäähdytyksessä. Jos porakai-
von veden tuotto on runsasta, niin vettä voidaan hyödyntää myös esim. kasteluvetenä.
(IVT.fi)



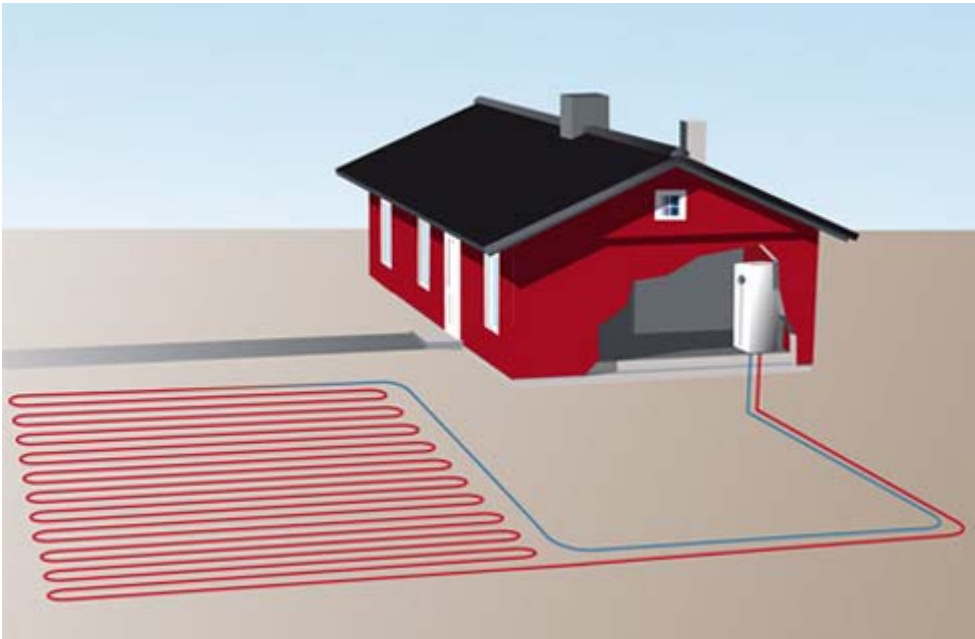
KUVA 14. Robert Bosch Oy/IVT. Lämpöpumput, kalliolämpö, (IVT.fi)

Maalämpöpumppujen toinen lämmönhankintatapa on vesistöt. Tällöin myös vedessä
olevaa keruuputkistoa voidaan hyödyntää jäähdytyksessä. Matalat rannat eivät ole
hyvä jäähdytyksen kannalta, mutta syvemmät vesistöt ja mutapohjat parantavat jääh-
dytyksen tehoa keruuputkistossa. (IVT.fi)



KUVA 15. Robert Bosch Oy/IVT. Lämpöpumput, vesistölämpö, (IVT.fi)

Kolmas lämmönhankintatapa maalämpöpumpuille on maalämpö. Tällöin keruuputkisto kiertää maaperässä noin metrin syvyydellä, keräten talvisin lämpöä kohteeseen. Auringon lämmityksen vaikutukset yltävät noin kymmenen metrin syvyyteen, joten tämä ei ole jäähtymisen kannalta paras vaihtoehto. (IVT.fi)



KUVA 16. Robert Bosch Oy/IVT. Lämpöpumput, maalämpö, (IVT.fi)

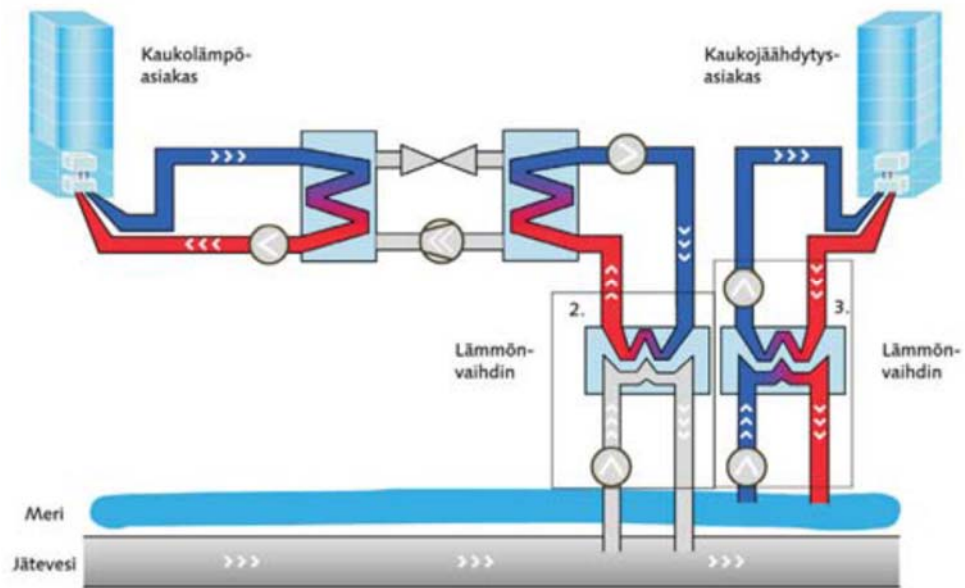
Esimerkiksi Savumaxilla on käytössä maapiiri, jossa kiertää nestettä, joka kesällä viilentää ja talvella lämmittää sisään tulevaa ilmaa. Tässä opinnäytetyössä ilman viilennys vaikutusta ei tutkita, mutta periaatteessa Savumaxin idea maalämmön hyödyntämisestä on sama kuin maalämpöpumppuvalmistajillakin. Kun rakennuksen pohja kaivetaan ja sinne asennetaan sokkelin ulkopuolelle salaoja- ja kuivatusputkistot, niin saman kaivuun yhteydessä sinne voitaisiin asentaa keruuputkisto routaeristeen alapuolelle. Keruuputkistolla olisi kesällä viilentävä ja talvella lämmittävä vaikutus. Keruuputkistossa kierrätettävä välittäjäaine voitaisiin tällöin hyödyntää viilennyksessä ilman ylimääräisiä kaivamiskustannuksia. Tämä sopisi mielestäni hyvin kohteisiin, joissa ei ole maalämpöpumppua. Kun keruuputkisto on routaeristeen alapuolella, routaeriste suojelee keruuputkistoa yhdessä rakennuksen varjostuksen kanssa auringolta. (Savumax.fi)

3.3 Kaukojäähdytys

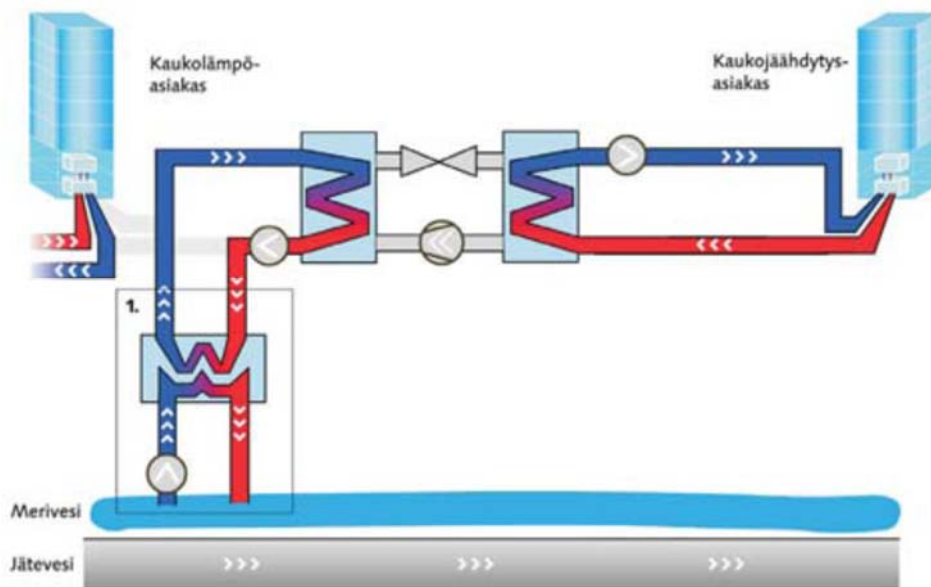
Kaukojäähdytyksellä tarkoitetaan keskitetyssä tuotantolaitoksessa liiketoimintana tuotetun jäähdytetyn veden jakelua putkiston välityksellä useille rakennuksille ilmastoinnin jäähdytykseen. Mielestäni tämä jäähdytetty vesi on kuitenkin hyödynnettävissä myös tämän opinnäytetyön aiheena olevaan jäähdytysmenetelmään. Kaukojäähdytysenergiaa voidaan tuottaa monella eri tavalla, kuten vapaajäähdytyksellä (luonnon omien energiavarojen hyödyntäminen), absorptiojäähdytyskoneilla, kompressoriteknikalla ja lämpöpumpuilla. (Kaukojäähdytysjärjestelmät; RT-kortti 56-10967, 1 - 2)

Vuonna 2012 kaukojäähdytysenergiaa tuotettiin 131 GWh. Tuotannosta lämpöpumpuilla tuotettiin 45,8 %, vapaajäähdytyksellä 32,4 %, absorptiolla 18,1 % ja kompressoreilla 3,7 %. Kaukojäähdytystä käyttävät rakennukset hyötyvät kaukojäähdytyksestä monin tavoin: Jäähdytyskoneet eivät aiheuta ilma- ja runkoääniä ja myös tärinä välteään. Jäähdytyskoneille varatut tilat vapautuvat muuhun käyttöön, tai niitä ei tarvitse rakentaa lainkaan. Julkisivua rumentavia lauhdutusyksiköitä ei tarvita, eikä kiinteistön omistajan tarvitse huolehtia jäähdytyskoneiden huollosta ja kunnossapidosta. (Energia.fi)

Helsingissä, Helsingin Energia tuottaa kaukojäähdytysenergiaa hyödyntämällä kylmää merivettä, puhdistetun jäteveden lämpösisältöä sekä yhteistuotannosta kesäisin ylijäävää lämpöä. Kesäisin Helsingin Energian yhteistuotantolaitoksilla syntyvälle lämmölle ei ole käyttöä kaukolämpönä. Tällöin kaukojäähdytysenergia tuotetaan absorptiotekniikalla, kuva 17, jossa käyttöenergiana on muuten hyödyntämättä jäävä lämpö. Talvikautena kaukojäähdytys tuotetaan kylmästä merivedestä, kuva 18. Merivesi on ehtymätön jäähdytysenergian lähde. Talvisin prosessi on hyvin yksinkertainen, sillä lämmönsiirtimien ja pumppujen lisäksi ei tarvita muita laitteita. Kolmas tuotantotapa perustuu puhdistetun jäteveden hyödyntämiseen. Samassa prosessissa tuotetaan lämpöpumppujen avulla sekä kaukolämpöä että -jäähdytystä. Lämpöpumpun toimintaperiaatteita on esitetty kuvissa 19 ja 20. Kaukojäähdytyksen saatavuus on huonoa, sitä on saatavilla vain kahdeksalla paikkakunnalla, lähinnä etelä Suomessa, tilanne vuonna 2012. (Energia.fi; Kaukojäähdytysjärjestelmät RT-kortti 56-10967, 2)



KUVA 19. Lämpöpumpun toimintaperiaate talvella, (Kaukojäähdytysjärjestelmät, RT-kortti 56-10967, 2)



KUVA 20. Lämpöpumpun toimintaperiaate kesällä, (Kaukojäähdytysjärjestelmät, RT-kortti 56-10967, 2)

3.4 Aurinkojäähdytysjärjestelmä

Kerkko Niemen opinnäytetyössä selitetään aurinkojäähdytysjärjestelmän periaatetta. Ensiksikin Adsorptiojäähdytin tarvitsee lämpöä tuottaakseen kylmää. Tämä lämpö tuotetaan siis aurinkokeräimillä, jotka sijoitetaan rakennuksen katolle. Sieltä keräimissä lämmitetty vesi kuljetetaan lämminvesivaraajaan ja hyödynnetään adsorptiojäähdyttimellä tarpeen mukaan. Tavoite tässä Niemen opinnäytetyössä oli suunnitelma toimiva järjestelmästä, jolla on riittävän lyhyt takaisinmaksuaika. Aurinkojäähdytysjärjestelmästä ja siihen liittyvistä laitteista pyritään tekemään taloudellisesti houkutteleva vaihtoehto perinteisten lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmien rinnalle. Aurinkojäähdytysjärjestelmään kuuluu aurinkolämmitysjärjestelmän lisäksi absorptio- tai adsorptiojäähdytin, nesteen jäähdytin, kylmävaraaja ja rakennuksen jäähdytyspiiri (joka voisi siis olla Kahi- tai Leca-väliseinärakenteissa kiertävä vesiputkisto). Laitteiden mitoitus perustuu rakennuksen jäähdytysenergiantarpeeseen sekä suurimpaan jäähdytystehoon. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että adsorptiojäähdyttimen sopii myös Suomen olosuhteisiin. Jäähdyttimellä pystyttäisiin kattamaan koko vuosittainen jäähdytysenergiantarve, jos auringonpaisteessa ei olisi katkoksia. Energiatehokkuudeltaan adsorptiojäähdytys on huippuluokkaa. Suomessa ainoa tehokkaampi jäähdytyksen tuottotapa on maajäähdytys, mutta alueilla, joissa porakaivojen tekeminen on mahdollista, on adsorptiojäähdytys energiatehokkain tapa tuottaa kylmää. (Niemi 2012)

Mielestäni myös tämä auringolla tuotettu jäähdytys olisi hyödynnettävissä, viileän veden tuottamiseen jäähdytyksessä, jota tässä työssä esitellään Kahi- ja Leca-rakenteissa.

4 TUTKITTAVIEN SEINÄRAKENTEIDEN KUVAUS JA KÄYTTÖ

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Kahi- ja Leca-väliseinärakenteiden jäähdytysvaikutusta. Tutkittavia seinärakenteita oli kaikkiaan kolme. Näistä kaksi oli kalkkihiekkatiilisiä eli Kahi- väliseinärakenteita: Kahi-väliseinäpontista valmistettu seinärakenne ja Kahi-runkopontista valmistettu seinärakenne. Kumpaankin Kahi-järjestelmään on lisäksi omia erikoiskappaleitaan, joita voidaan hyödyntää seinien rakentamisessa. Kolmas tutkittava seinärakenne on tehty Leca EasyLex-väliseinääharkosta. Myös tähän Leca-rakenteeseen löytyy omia erikoiskappaleitaan, joita voidaan hyödyntää seinärakenteiden rakentamisessa. Yhteistä kaikille seinärakenteille on, että niitä käytetään yleensä väliseinärakenteina ja ne ovat ohutsaumamuurattavia. Yleensä kaikki tutkittavat seinärakenteet myös pinnoitetaan, kun niitä käytetään väliseininä. Yleensä tämän tyyppiset väliseinät tasoitetaan tasoitteella, jonka päälle tulee maali, laatoitus tai muu pinnoitus. Kahi-runkoponttia voidaan käyttää myös kantavana rakenteena väliseinissä tai tiilitalon ulkoseinän kantavana rakenteena.

Pientalojen väliseinät ovat yleensä noin 2 600 mm korkeita, mutta kerrostaloissa ja toimistotiloissa väliseinien korkeus on yleensä noin 3 000 mm. Kerrostalojen, toimistojen väli- tai yläpohjissa on usein niin sanottu alaslaskettu katto. Alaslasketuissa katoissa talotekniikka asennetaan alaslaskuosaan. Tämä on syytä ottaa huomioon vesiputkistoa seinään suunniteltaessa. Alaslaskutilaa on turha lämmittää tai jäähdyttää. Johtumisen seurauksena sinne välittyy varmasti lämpöä, mutta vesiputkisto voidaan asentaa vain alaslaskutilan alapuolisiin seinän osiin.

Taulukossa 5 on esitetty perus Kahi- ja Leca-muurauskappaleiden ominaisuuksia ja mittoja.

TAULUKKO 5, seinämateriaalien ominaisuuksia ja mittoja

| Materiaali | Mitat (lxkxs) mm | Paino/kpl kg | Ominaislämpökapa- siteti, C_a , J/kgK | Lämmön- johtavuus λ_{10} , W/mK |
|--------------------------|---------------------|-----------------|--|---|
| Kahi- väliseinäpöntti | 300x198x85 | 7,9 | 1000 | 0,75 |
| Kahi- runkopöntti | 300x198x130 | 12,3 | 1000 | 0,75 |
| Leca EasyLex | 498x300x88 | 11,0 | 1000 | 0,30 |

Se, mihin jäähdetty seinärakenne rakennuksessa sijoitetaan, vaikuttaa siihen, kuinka paljon siitä on mahdollista saada hyötyä. Tätä sijoittelua ei tässä opinnäytetyössä pohdita enempää, mutta sijoittelun merkitys on kuitenkin syytä huomioida. Liitteessä 2 on esitetty pientalon pohja, johon on merkitty Kahi-seinärakenteeseen asennettu vesiputkisto. Liitteenä olevan pohjakuvan tarkoitus on havainnollistaa, kuinka seinärakenne voitaisiin sijoittaa esimerkiksi pientaloon. Putket sisältävä Kahi-väliseinärakenne on makuuhuoneiden ja olohuone-keittiön välisessä seinässä. Tällöin jäähdystä tai lämmitystä saadaan juuri niihin tiloihin, joissa vietetään suurin osa rakennuksen sisällä vietetystä ajasta.

Tutkimuskammiossa tutkittujen seinärakenteiden piirustukset löytyvät kuvista 23 - 28. Piirustuksissa on esitetty tutkimuskammioon sijoitettavien seinärakenteiden kuvaus. Kaikissa seinärakenteissa seinien molemmat puolet tasoitettiin Vetonit LR+ tasoitteella. Tasoituksen jälkeen rakenteiden toinen puoli maalattiin pohja- ja pintamaalilla. Toinen puoli maalattiin pohjamaalilla ja pintaan asennettiin tapetti. Näin käsiteltyinä tutkittavat seinät vastaavat normaalisti rakennuksiin valmistettavia seinärakenteita.

4.1 Tutkimuskammiot sekä tutkimuskammioiden olosuhteet

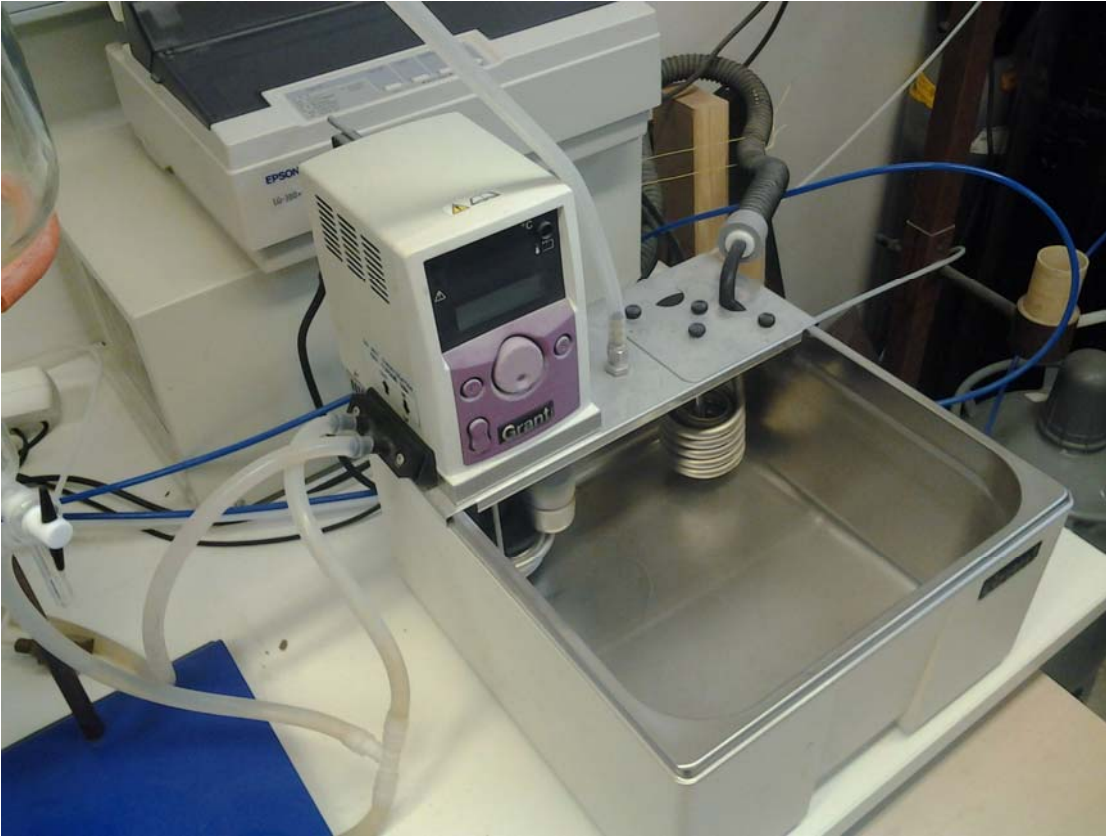
Kahi-väliseinäpöntti rakenteiden tutkimus suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun rakennusfysiikan ja talotekniikan laboratoriossa. Laitteiston kuva on esitetty kuvassa 21.



KUVA 21. Tutkimuskammio

Laboratoriotilaan on rakennettu ilmastointikoneen ja rakennusmateriaalien testaamiseen tarkoitetun tutkimuskammion muodostama kompleksi, jonka eri osia kuten IV-konetta voidaan käyttää LVI-koulutukseen ja tutkimuskammiota rakennusfysikaalisiin kokeisiin ja laboratoriotöihin. Tutkimuskammiota ohjaa TAC Atmostech-järjestelmäautomaatio. Laitteisto koostuu lisäksi LTO-ilmanvaihtokoneesta, erilaisista lämmittimistä, ilmaskostutus järjestelmästä, kylmäkoneesta, pumpuista ja säätölaitteista.

Veden kierrätys ja jäähdytys on järjestetty Grant GR150-termohauteen avulla. Laitteella voidaan pitää vesi halutussa lämpötilassa, ja laite kierrättää veden seinärakenteisiin. Letkut ovat silikonista, ja niiden sisähalkaisija on 8 mm. Termohauteesta lähtevät letkut on yhdistetty tutkimuksessa käytettävään diffuusiosuojattuun lattialämmitys putkeen. Veden virtausnopeus on 2,93 l/min. Termohaude on esitetty kuvassa 22.



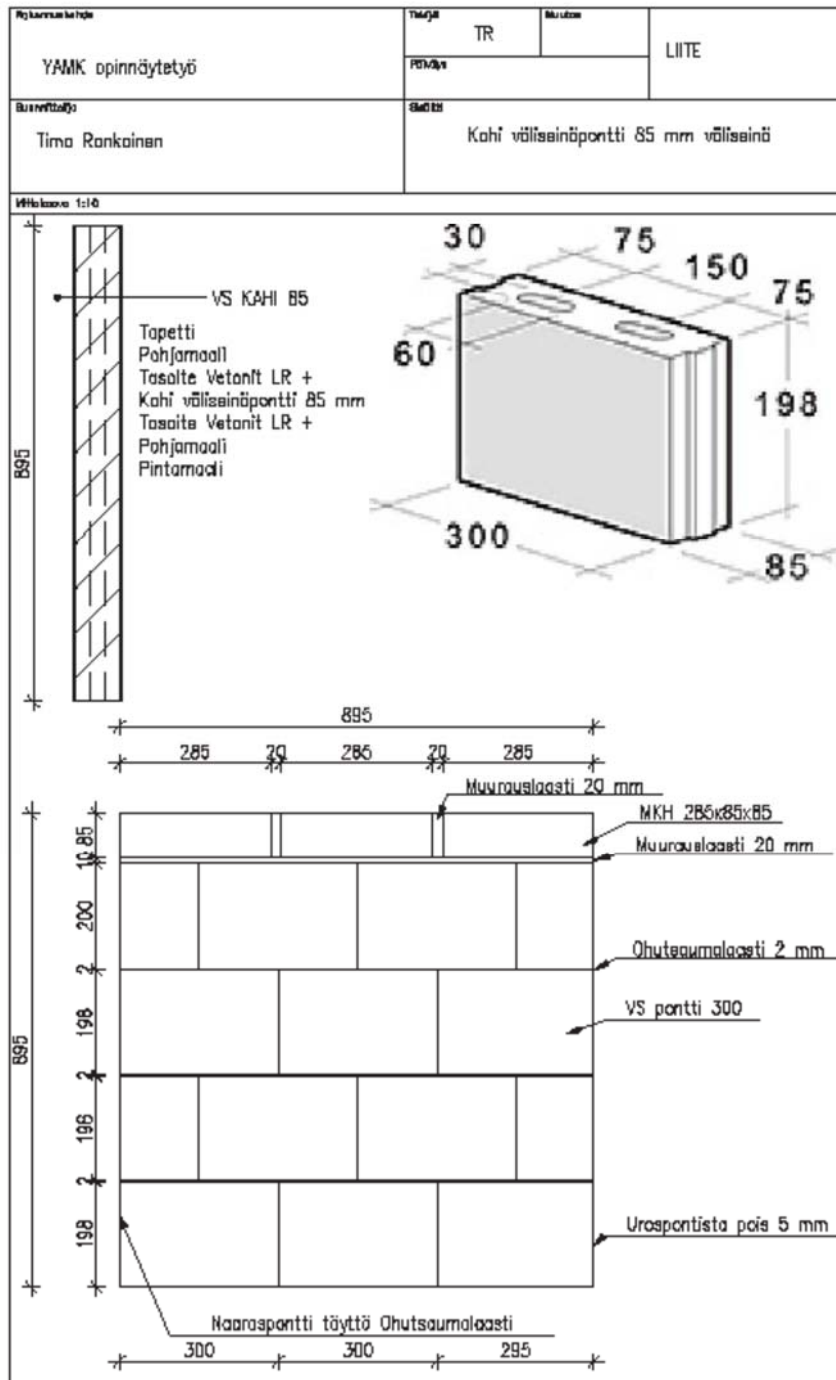
KUVA 22. Grant GR150-termohaude

Ensimmäiseksi tutkittiin Kahi väliseinäponttirakenne. Tutkimuskammioon on määritelty tutkimuksen ajaksi seuraavat asiat:

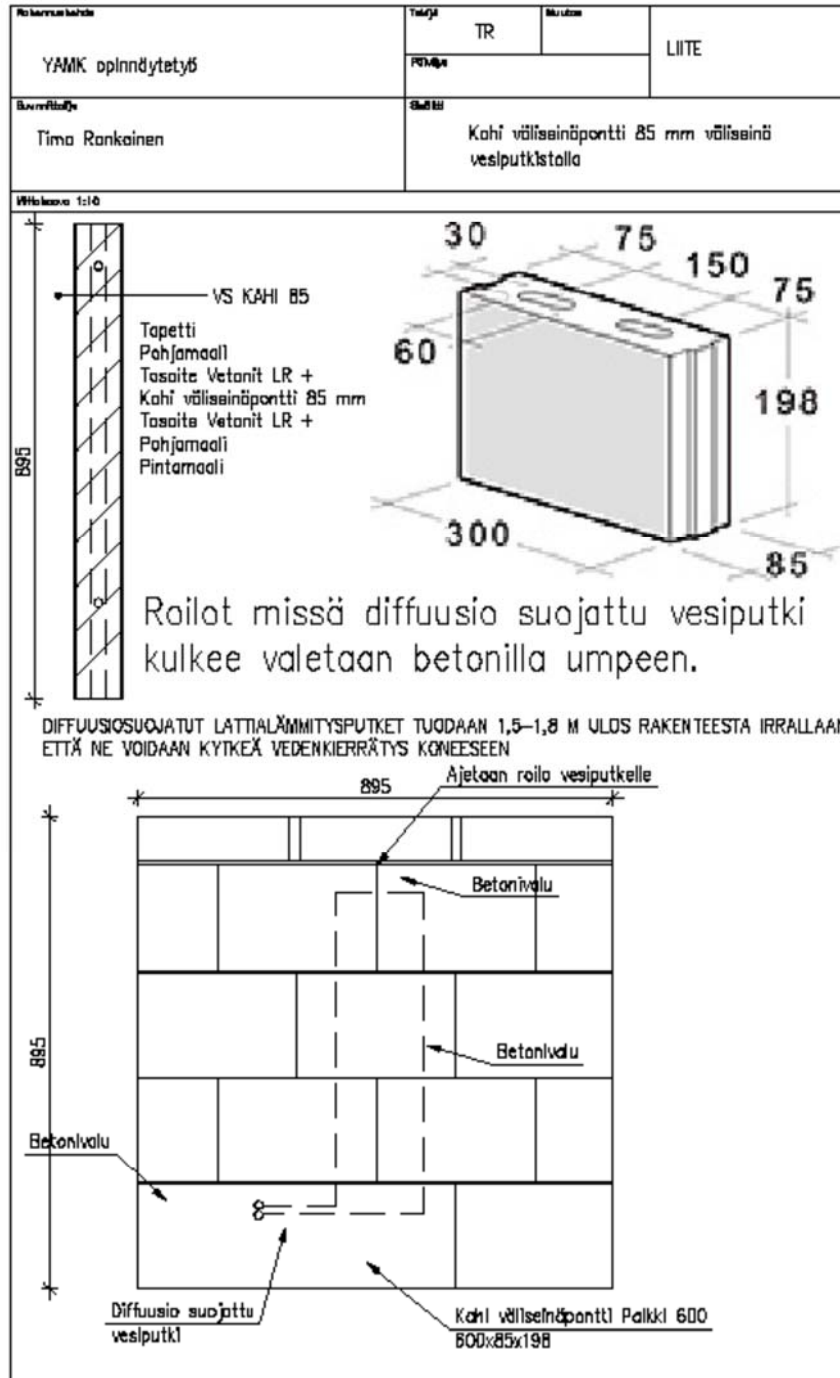
- Mittausväli antureissa ja loggereissa on 1 min.
- Rakenteisiin suoritetaan lämpökamera kuvaus 24 tunnin välein
- Rakenne on ensin 2 vrk + 21 °C:n lämpötilassa. Jos kyseessä on vesiputkiston sisältävä rakenne, niin vesi ei kierrä rakenteessa näiden kahden vuorokauden aikana.
- Sen jälkeen tutkimuskammion olosuhteet nostetaan + 26 °C:seen, viiden vuorokauden ajaksi. Jos kyseessä on vesiputkiston sisältävä rakenne, niin putkistoon laitetaan kiertämään vesi jonka lämpötila on + 5 °C.
- Viimeiseksi lämpötila lasketaan takaisin + 21 °C:seen, kahden vuorokauden ajaksi. Jos kyseessä on vesiputkiston sisältävä rakenne, niin putkistossa jatketaan veden kierrättämistä.
- Testi toistetaan samanlaisena kaksi kertaa peräkkäin.
- Kaikissa lämpötiloissa on RH 65 %.

- Veden lämpötilan mittaus tehdään ennen rakennetta ja rakenteen jälkeen.
- Kun rakenne puretaan, tarkistetaan rakenteessa olevien antureiden paikka ja se merkitään kuviin.
- Testin lopuksi rakenteesta otetaan digikamerakuva ja tarkastellaan, onko vesikiertoisessa rakenteessa havaittavissa pinnoissa mitään muutoksia.
- Vesijohdot eristetään rakenteen ulkopuolella.

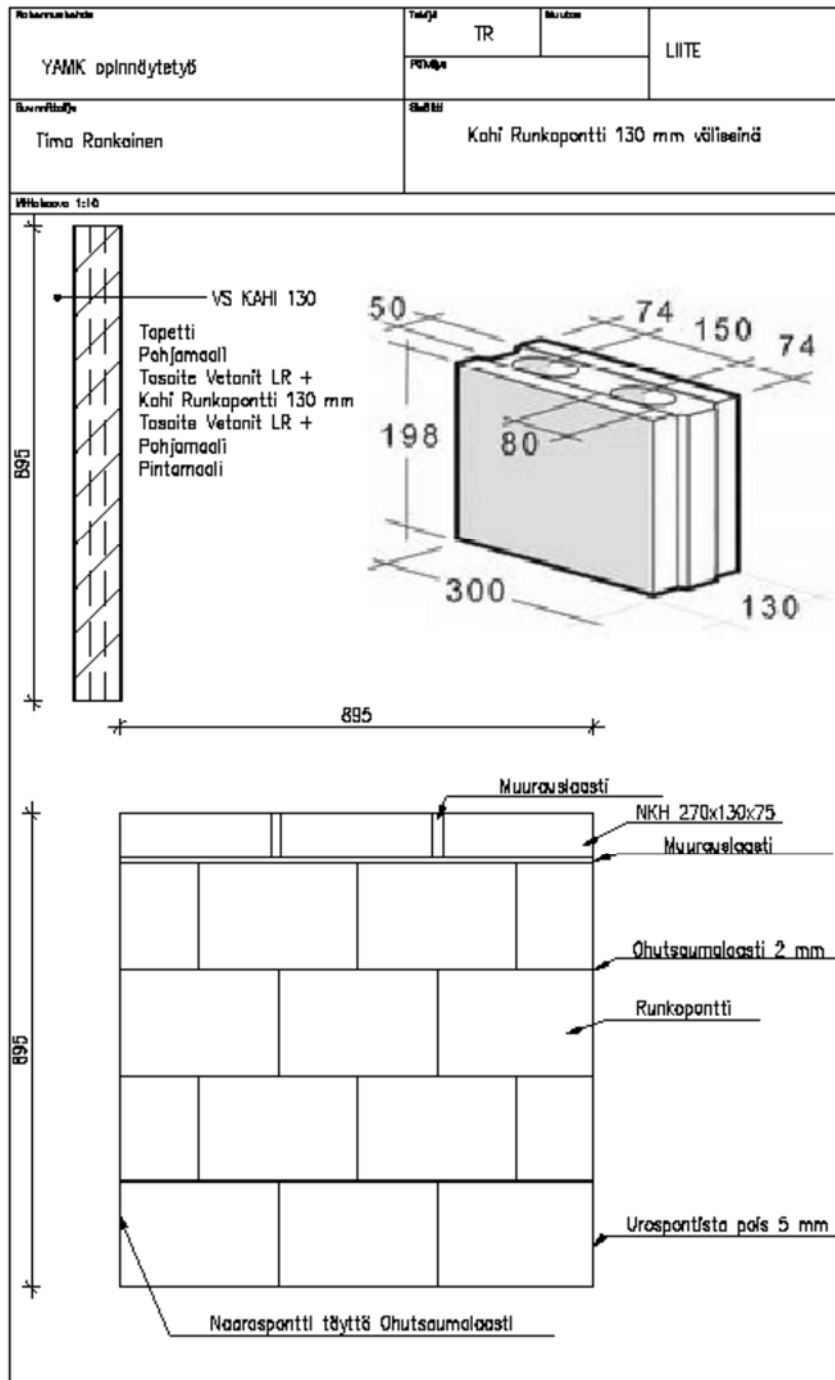
Kahi-väliseinäpönttirakenteet on esitetty kuvissa 23 ja 24.



KUVA 23. Kahri-väliseinäpönttirakenne ilman vesiputkistoa

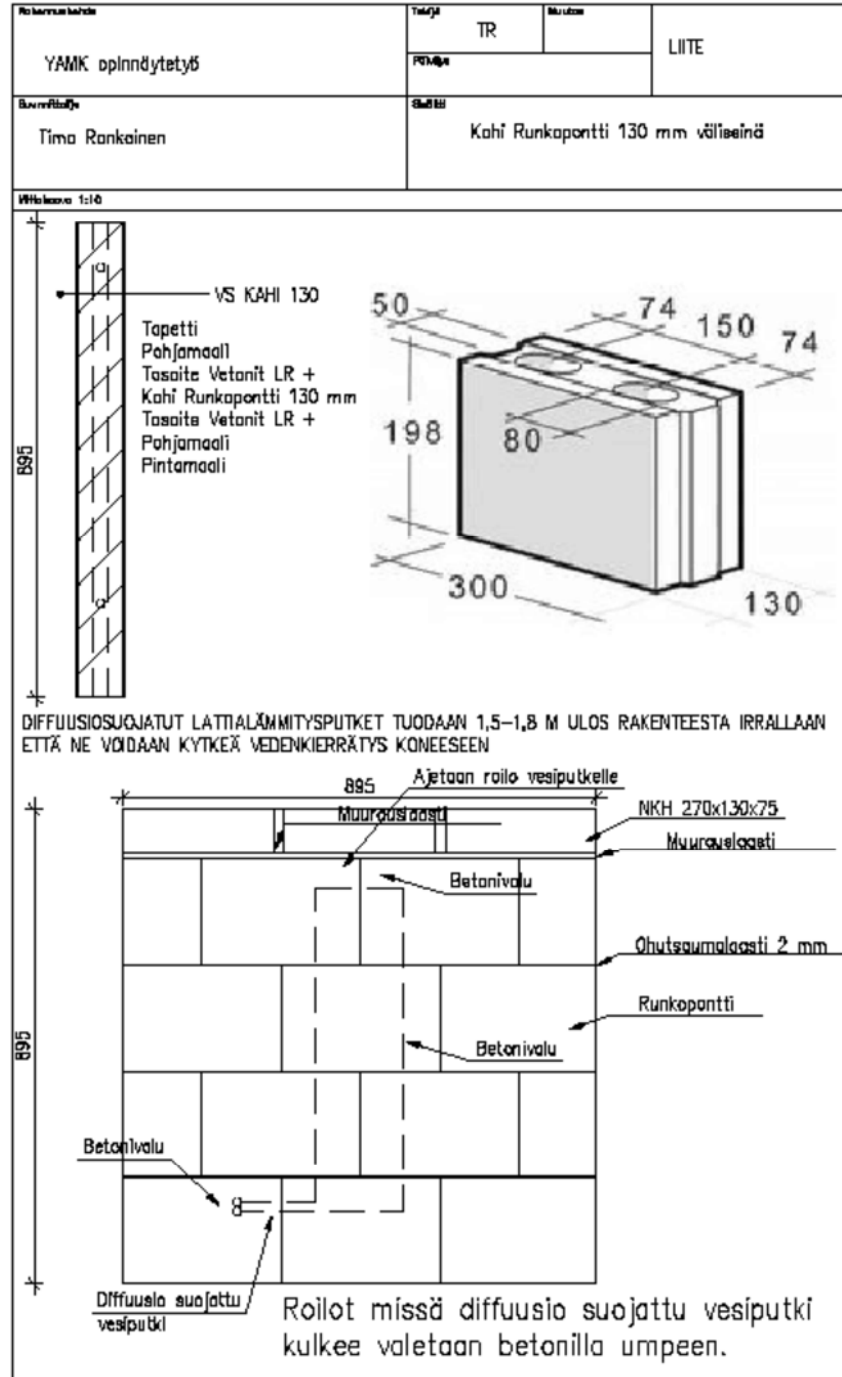


KUVA 24. Kahi-väliseinäpönttirakenne vesiputkistolla

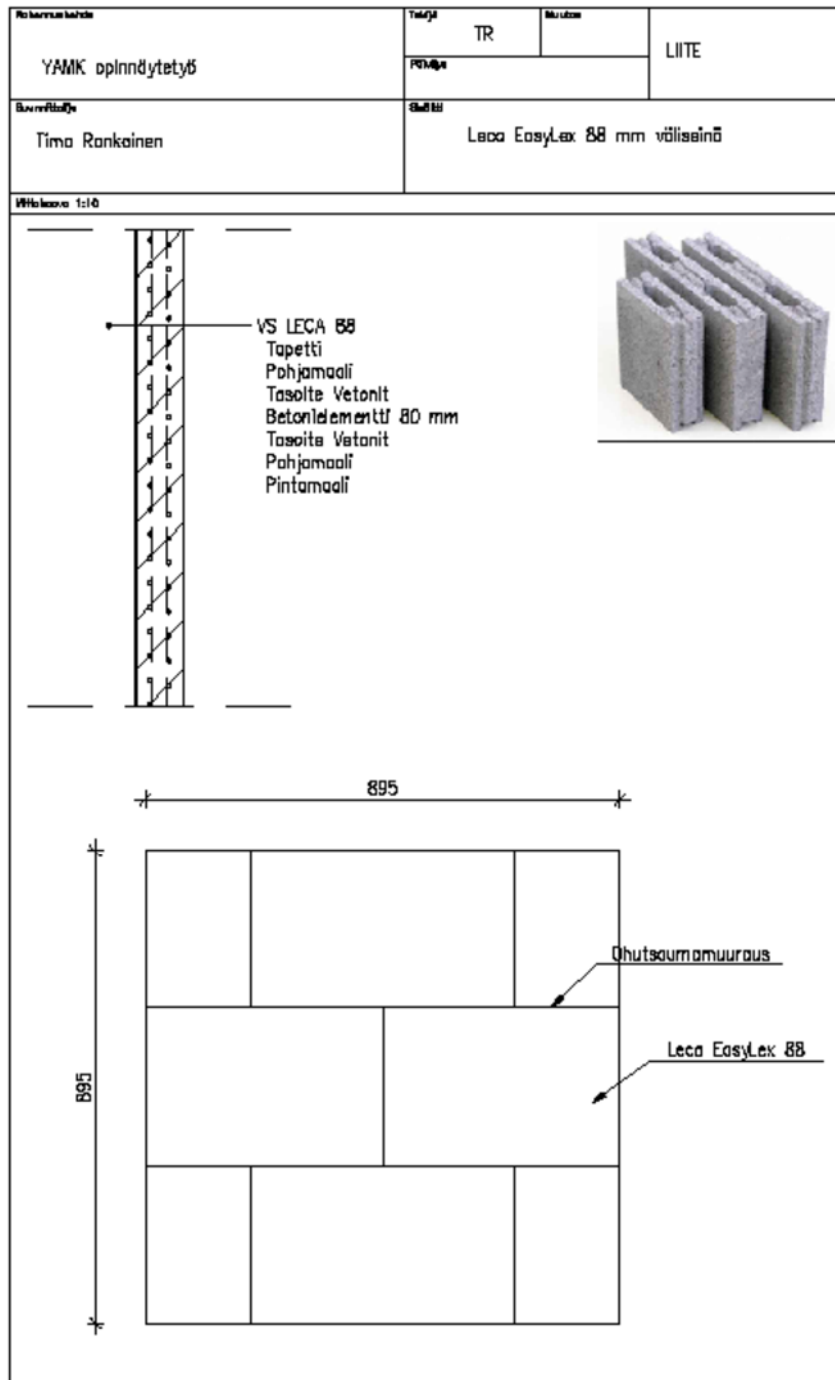


KUVA 25. Kahi-runkoponttirakenne

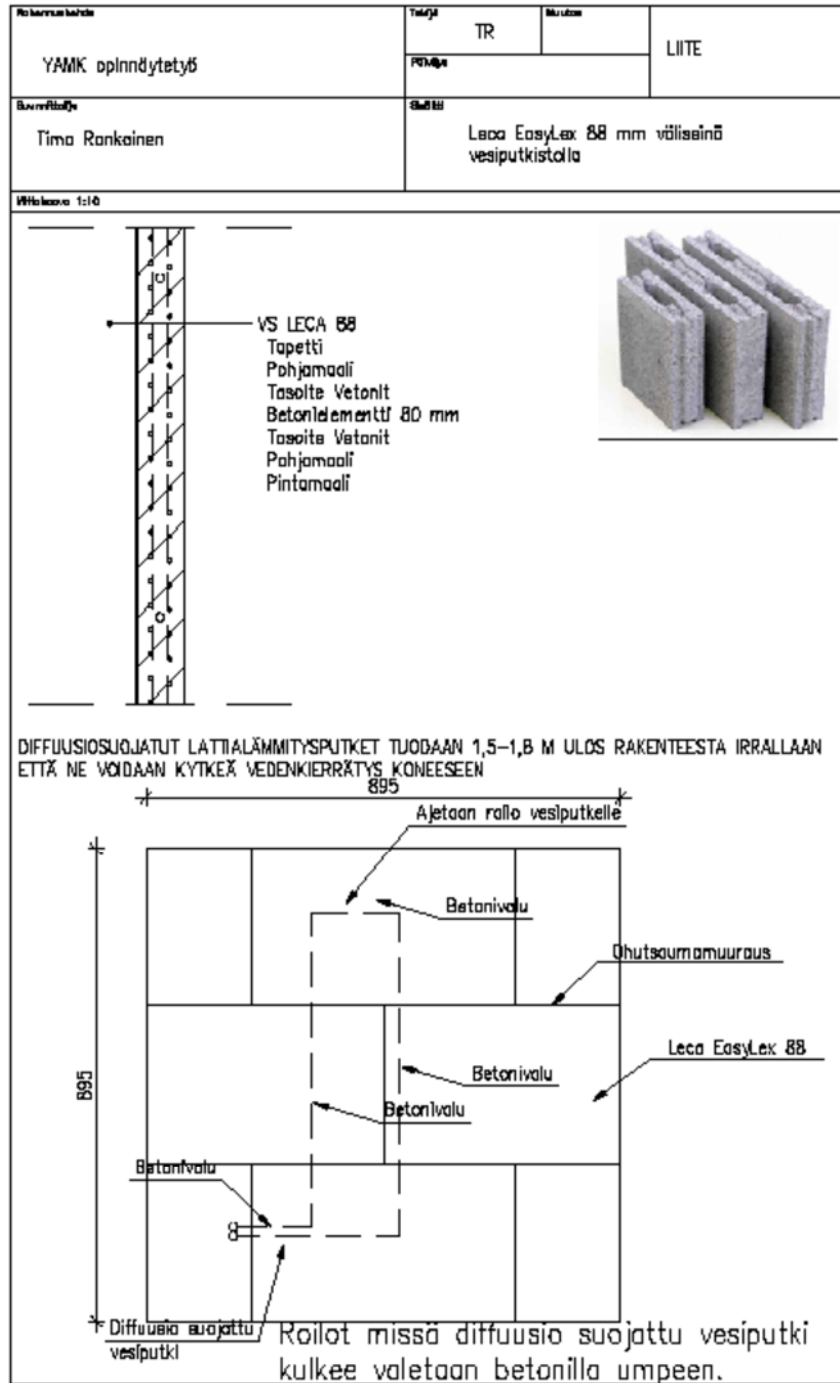
Kuva 26. Kahi-runkoponttirakenne vesiputkistolla



Kuva 26. Kahi-runkoponttirakenne vesiputkistolla



KUVA 27. Leca EasyLex-rakenne



KUVA 28. Leca EasyLex-rakenne vesiputkistolla

Seuraavaksi tutkittiin Kahi-runkoponttirakenteet, rakenteet on esitetty kuvissa 25 ja 26. Tämän jälkeen tutkittiin Leca EasyLex-rakenteet. Ne on esitetty kuvissa 27 ja 28. Koska RH %:n todettiin aiheuttavan myös lämpötilan hetkellisiä heilahteluja, kostutus poistettiin tutkimuskammioista. Kostutuksesta todettiin myös, että se ei vaikuta tuloksiin pidemmällä välillä, mutta aiheuttaa hetkellisiä lämpötilan muutoksia ja voi näin ollen vääristää mitattavia lämpötiloja. Myös tutkimuskammio vaihdettiin. Mittaukset suoritettiin itse rakennetussa teltassa, joka on tehty Savonian tutkimuslaboratorion nurkkaan. Rakenne tehtiin 50x50 mm puusta, jonka molemmille puolille on laitettu höyrynsulkukalvo. Höyrynsulkukalvo tiivistettiin ympäröiviin rakenteisiin ja puurunkoon höyrynsulkuteipillä. Telttaan asennettiin kulkemista varten niin sanottu muovinen remonttiovvi. Teltta on esitetty kuvassa 29. Varsinaista eristettä ei seinärakenteessa ole, mutta kuten mittaustulokset osoittavat, teltassa olosuhteet saatiin pysymään vakiona. Ulkopuolista kostutusta ei käytetty tutkimuksessa. Termohaude sijoitettiin teltan vieressä olevaan jääkaappiin, että myös kiertävän veden lämpötila saataisiin pysymään mahdollisimman tasaisena.



KUVA 29. Teltta tutkimuskammio ulkoa

Tutkimuskammioon määriteltiin tutkimuksen ajaksi seuraavat asiat:

- Mittausväli antureissa ja loggereissa on 10 min.
- Rakenteisiin suoritetaan lämpökamera kuvaus 24 tunnin välein.
- Rakenne on ensin 2 vrk + 21 °C:n lämpötilassa. Jos kyseessä on vesiputkiton sisältävä rakenne niin, vesi ei kierrä rakenteessa näiden kahden vuorokauden aikana.

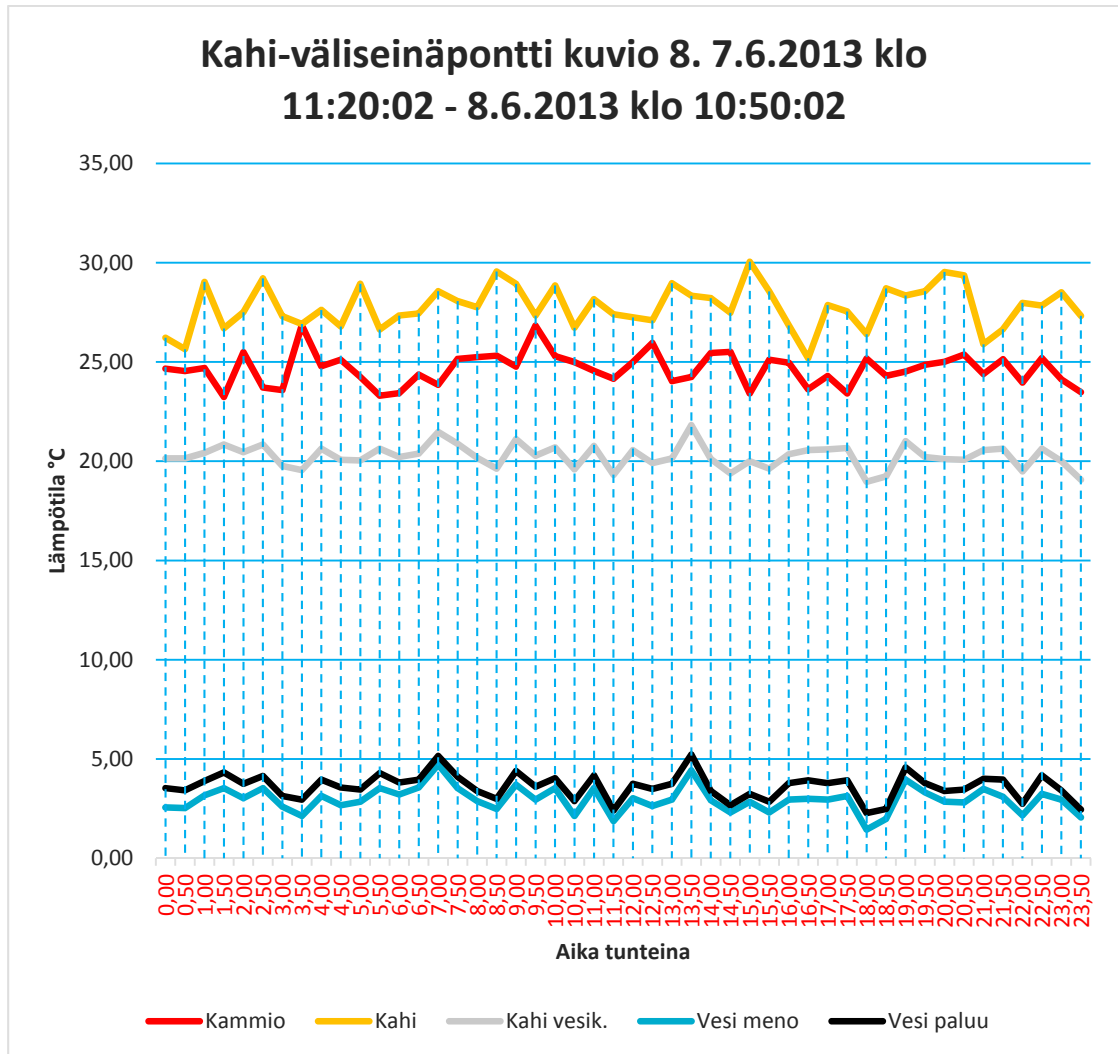
- Sen jälkeen tutkimuskammion olosuhteet nostetaan + 26 °C:seen, viiden vuorokauden ajaksi. Jos kyseessä on vesiputkiston sisältävä rakenne, niin putkistoon laitetaan kiertämään vesi, jonka lämpötila on + 5 °C.
- Viimeiseksi lämpötila lasketaan takaisin + 21 °C:seen, kahden vuorokauden ajaksi. Jos kyseessä on vesiputkiston sisältävä rakenne, niin putkistossa jatketaan veden kierrättämistä.
- Testi toistetaan samanlaisena kaksi kertaa peräkkäin.
- Kaikissa lämpötiloissa RH % on luontainen kammiossa oleva kosteus %, ilman kostutusta.
- Veden lämpötilan mittaus tehdään ennen rakennetta ja rakenteen jälkeen.
- Kun rakenne puretaan, tarkistetaan rakenteessa olevien antureiden paikka ja se merkitään kuviin.
- Testin lopuksi rakenteesta otetaan digikamerakuva ja tarkastellaan, onko vesikiertoisessa rakenteessa pinnoissa havaittavissa mitään muutoksia.
- Lämmityksessä käytetään säteily lämmityslaitteistoa, ettei puhaltava lämmin ilma lämmitä rakenteita. Kahi-väliseinäpönttirakenne on "imenyt" lämpöä suoraan lämpöpuhaltimesta puhaltavasta lämpimästä ilmasta ja on ollut lämpimämpi kuin tutkimuskammiossa ollut ilman lämpötila. Säteilylämmitin ei kierrätä tutkimuskammiossa olevaa ilmaa, joten sinne asennetaan tuuletin, joka kierrättää ilmaa niin, että se tasaantuu kammiossa.
- Rakenteiden reunat vuorataan XPS eristeellä, ettei niihin johdu lämpöä reunoista, vaan pelkästään "julkisivuista".
- Vesijohdot eristetään rakenteen ulkopuolella.

5 TUTKIMUKSISTA SAADUT TULOKSET

5.1 Kahi-väliseinäpöntti

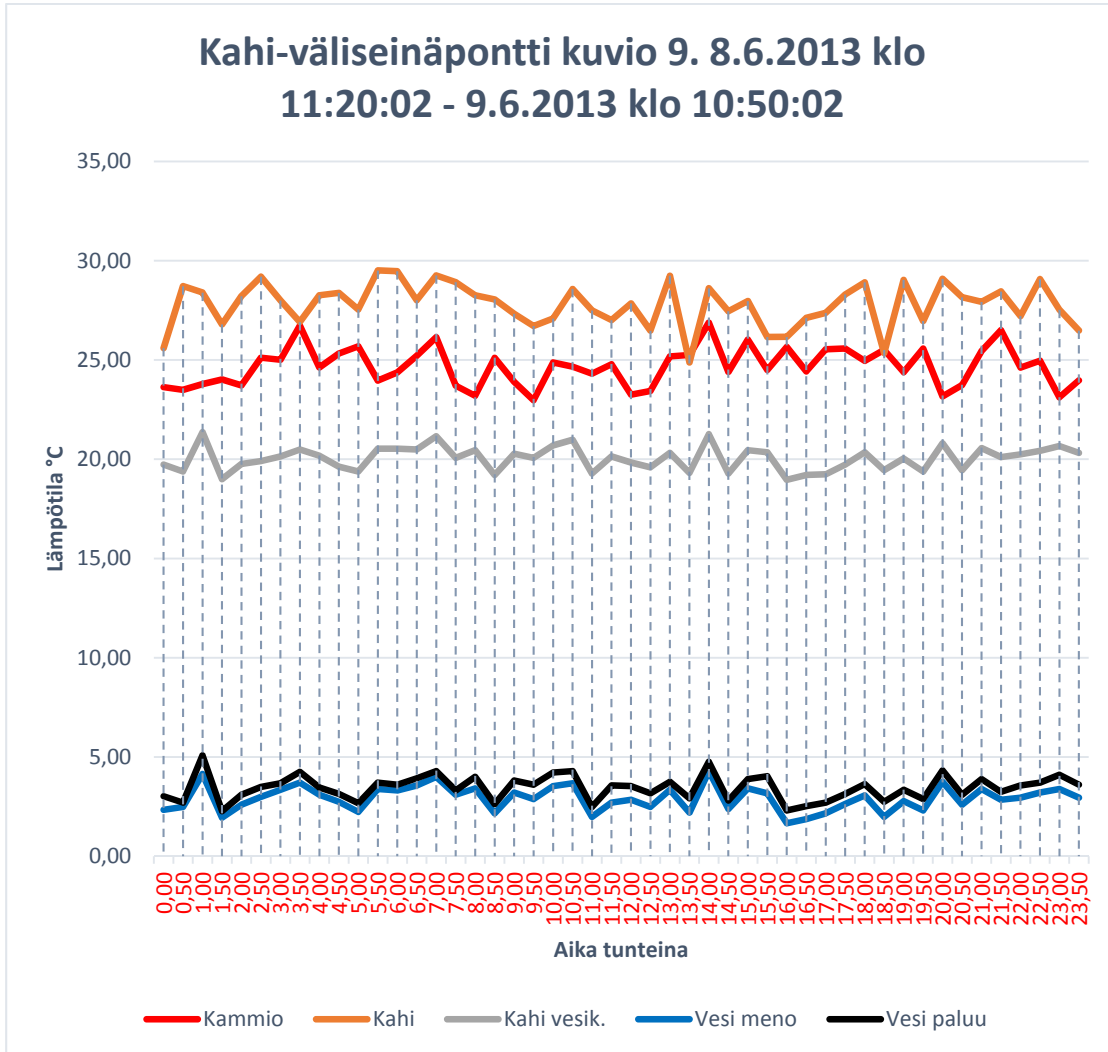
Ensimmäisenä tutkittiin Kahi-väliseinäpönttiä. Tutkimuksessa käytetty ulkoinen kostutus aiheutti lämpötilojen heilahteluja. Erilaisten tutkimuskammion häiriöiden takia kaikkia mittauksia ei saatu tallennettua. Kaikki mittaustulokset, joita Kahi-väliseinäpöntistä voidaan käyttää, on esitetty tässä luvussa. Anturit sijaitsivat rakenteessa seuraavasti: Anturi 1 oli vasemmalla 300 mm rakenteen yläreunasta ja 220 mm rakenteen vasemmasta reunasta. Anturi 2 oli oikealla 300 mm rakenteen yläreunasta ja 220 mm rakenteen oikeasta reunasta. Anturi 3 oli rakenteen keskellä ja 400 mm rakenteen alareunasta.

Seuraavat kuviot 8 – 14 on tehty tutkimuskammioista saatujen mittaustulosten perusteella.



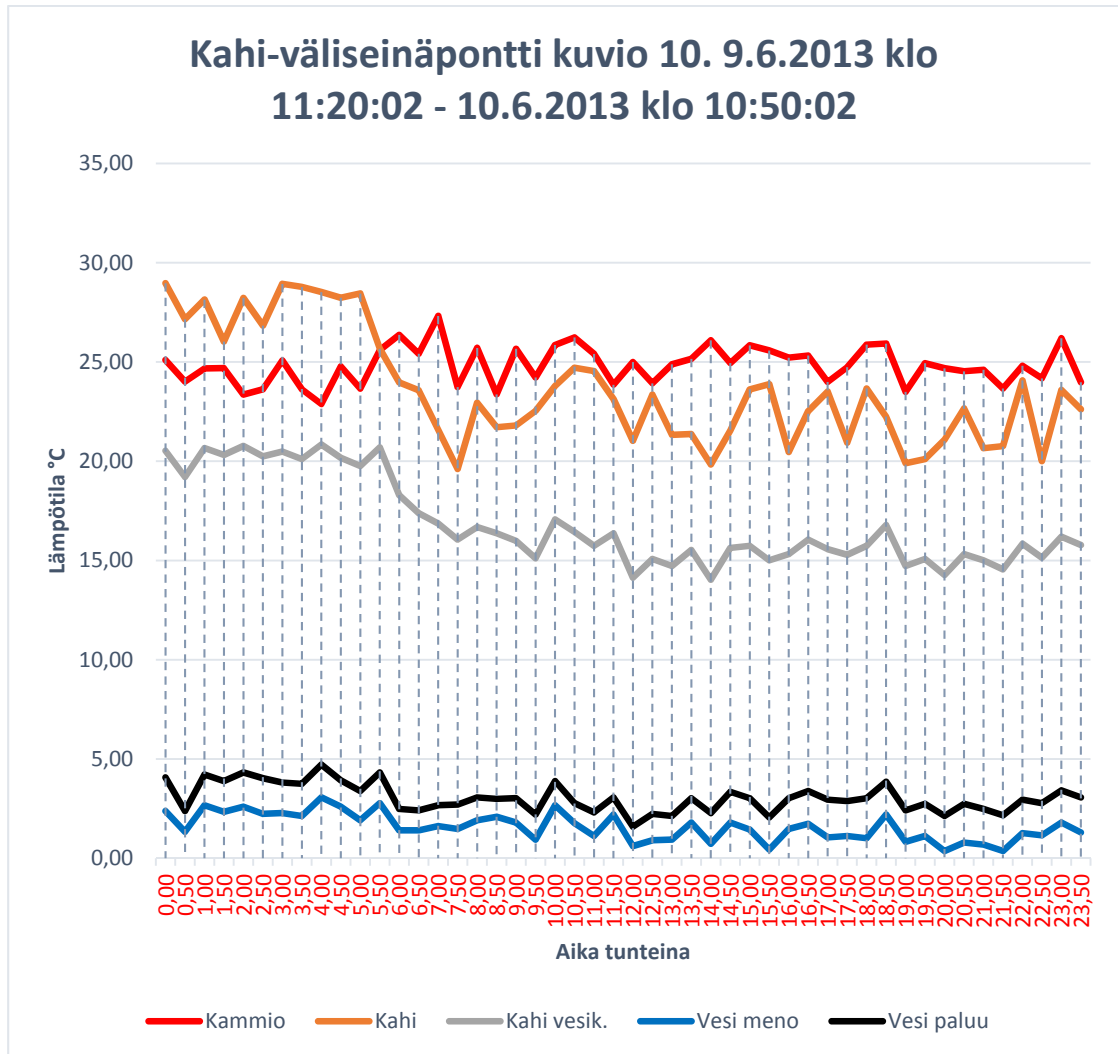
KUVIO 8. Kahi-väliseinäponti

Kuviossa 8 tutkimuskammion lämpötila on noin 25 °C. Rakenteeseen menevän veden lämpötila on noin 3 °C. Rakenteesta palaavan veden lämpötila on noin yhden asteen lämpimämpi. Kahi-väliseinäponttirakenne on lämmennyt lämpimämmäksi kuin kammio, mutta vesikiertoinen Kahi-väliseinäponttirakenne on jäähtynyt vesikierron ansiosta noin 20 °C:seen. Vesikierrolla on selkeä jäähdytys vaikutus rakenteeseen. Ilman vesikiertoa oleva Kahi-väliseinäponti on lämmennyt tutkimuskammion lämpötilaa korkeammaksi.



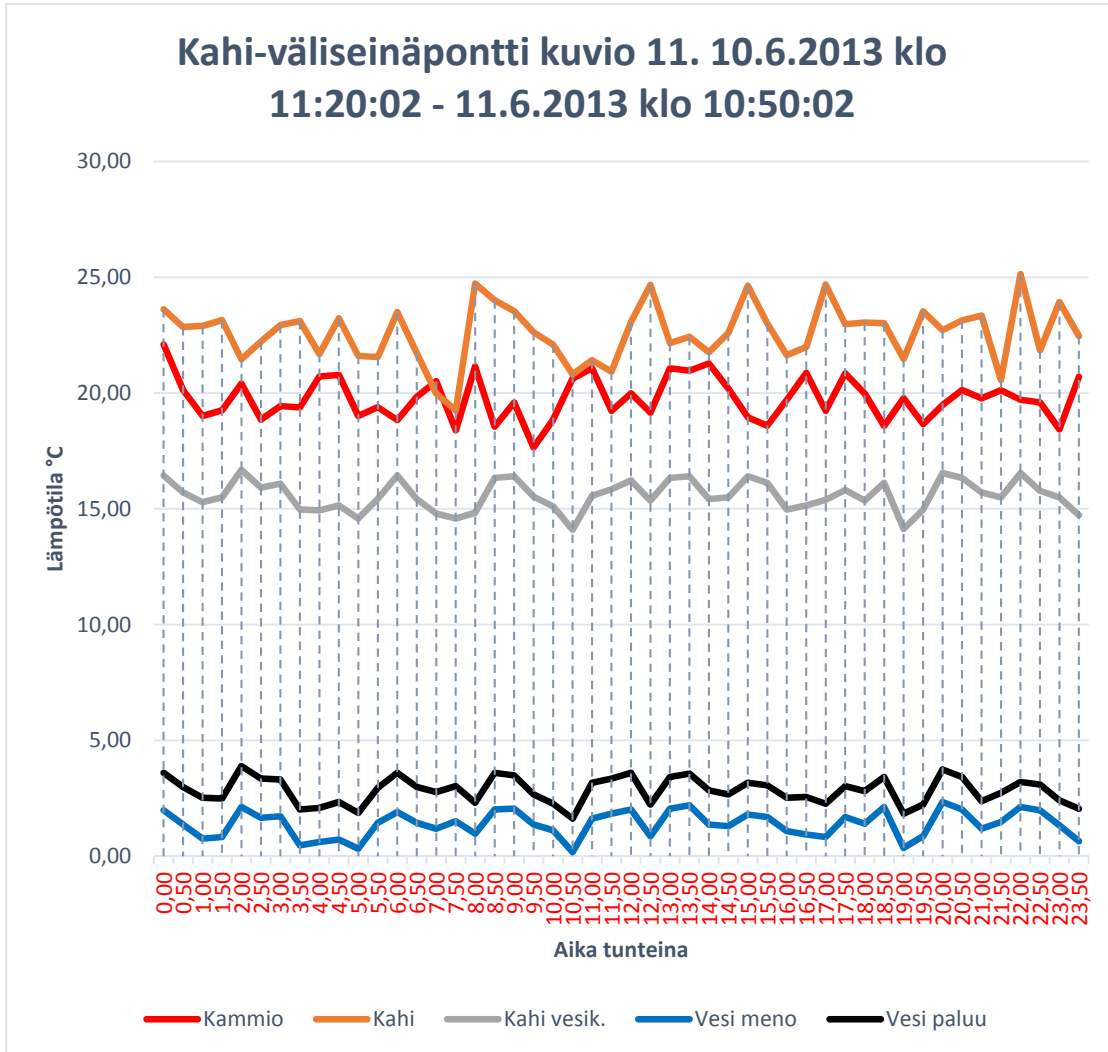
KUVIO 9. Kahi-väliseinäponti

Kuviossa 9 tilanne on tasaantunut ja lämpötilat ovat samanlaisia kuin kuviossa 8. Vesikierrolla on selkeä jäähdytys vaikutus rakenteeseen. Ilman vesikiertoa oleva Kahi-väliseinäponti on lämmennyt tutkimuskammion lämpötilaa korkeammaksi.



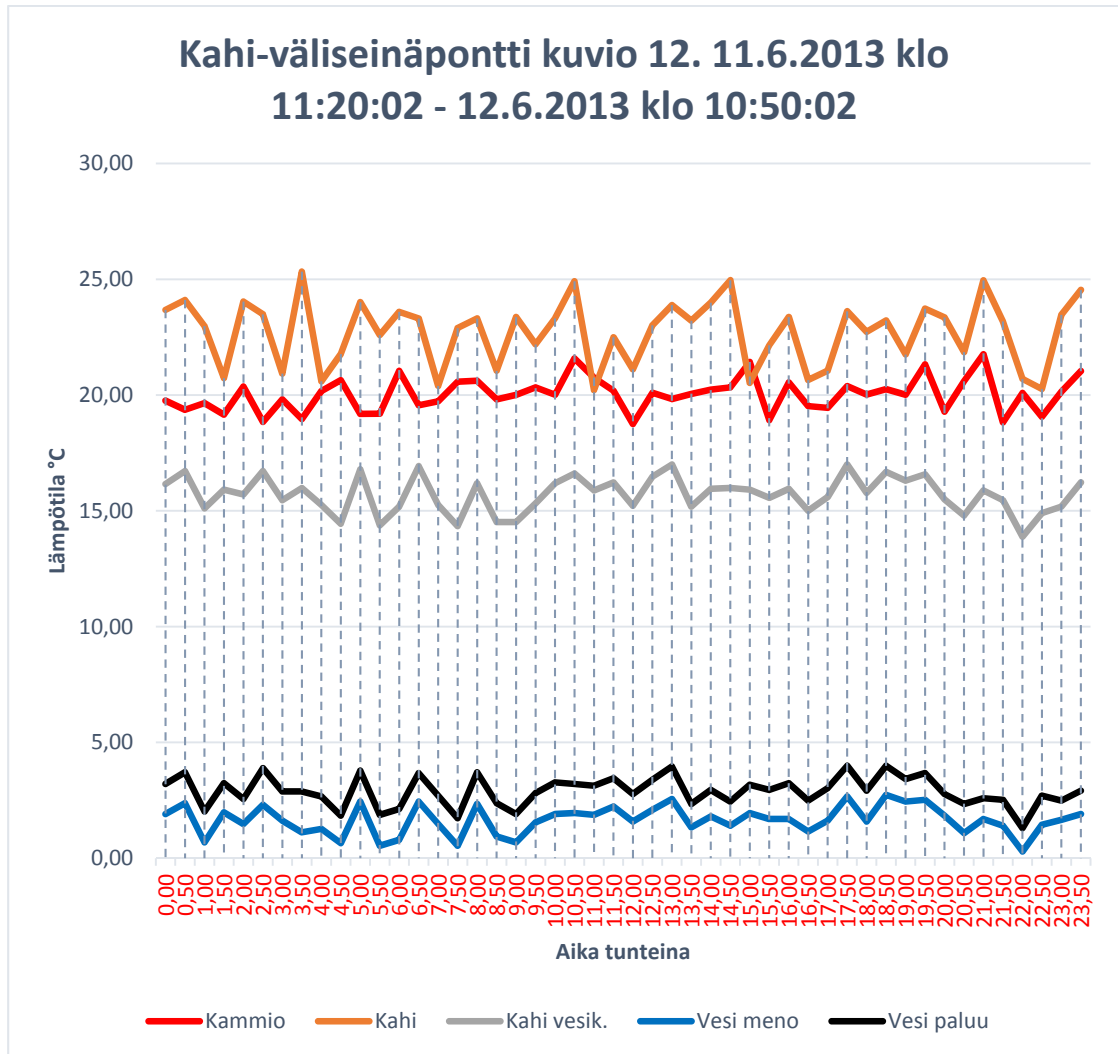
KUVIO 10. Kahi-väliseinäponti

Kuviossa 10 on oletettavasti säädetty lämmityslaitteena toimivaa lämpöpuhallinta niin, että se ei osoita suoraan tutkittaviin rakenteisiin tai sen toiminta on loppunut. Kahi-väliseinä rakenne on jäähtynyt kammion lämpötilan alapuolelle. Samalla vesikiertoinen Kahi-väliseinä rakenne on jäähtynyt noin viisi astetta. Tämän jälkeen lämpötilat ovat tasaantuneet.



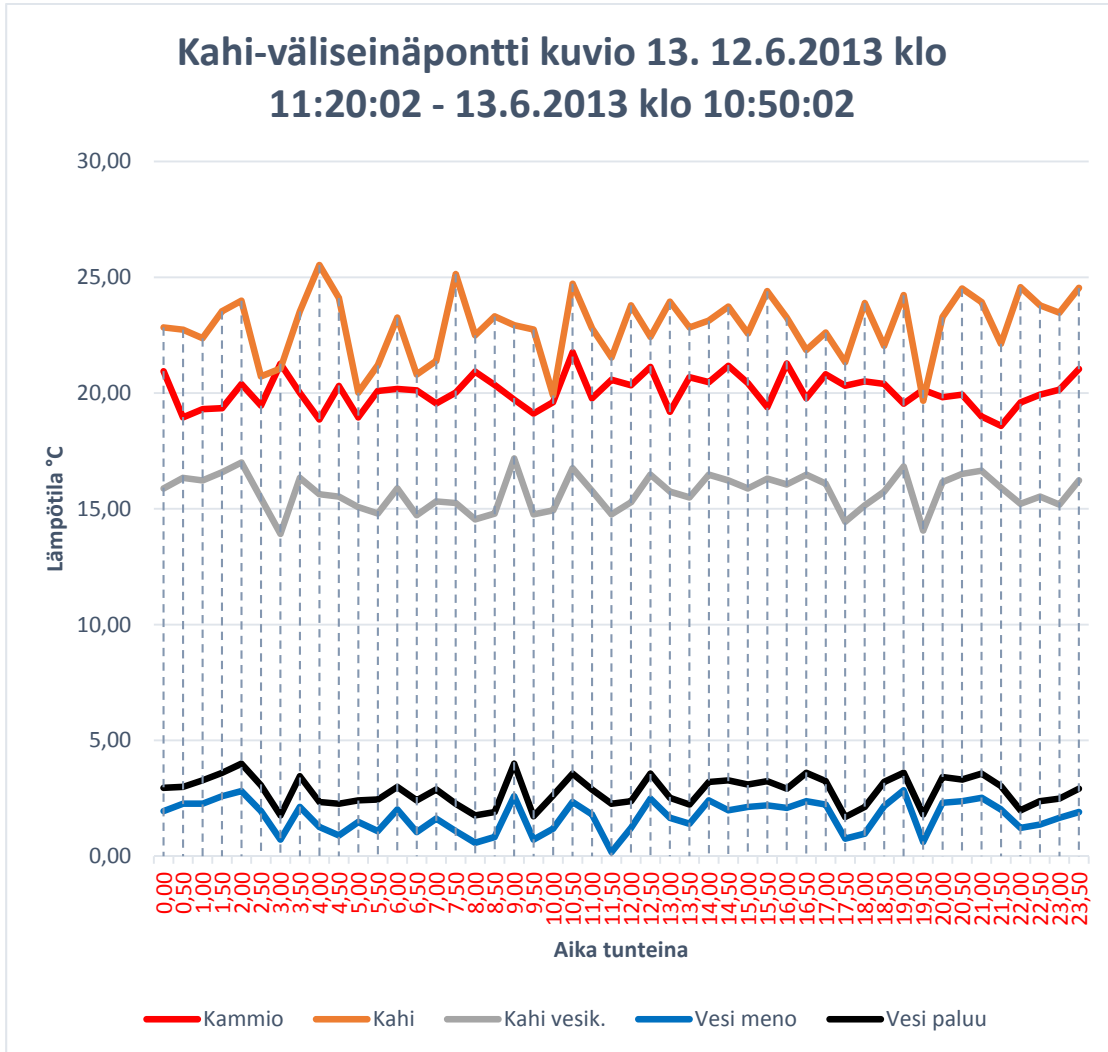
KUVIO 11. Kahi-väliseinäponti

Kuviossa 11 tilanne on muuttunut niin, että ilman vesikiertoa oleva Kahi-väliseinära-
kenne on taas lämmennyt tutkimuskammion lämpötilaa korkeammaksi. Vesikiertoinen
Kahi väliseinäraakenne on pysynyt saavuttamassaan lämpötilassa eli noin 15 °C:ssa.
Veden lämpötila on pysynyt samanlaisena kuin aikaisemmissakin kuvioissa.



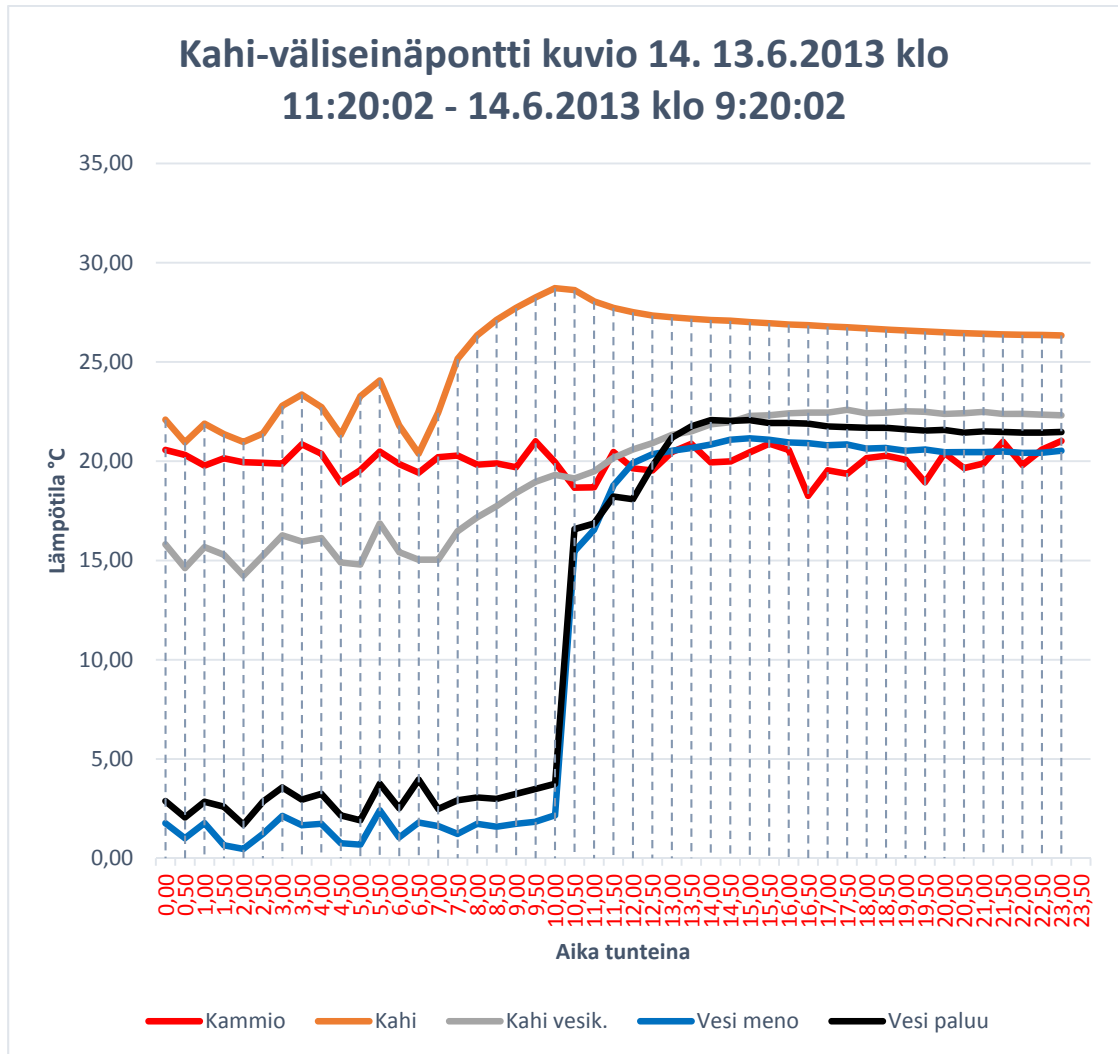
KUVIO 12. Kahi-väliseinäponti

Kuviossa 12 tilanne on samanlainen kuin kaaviossa 11. Ilman vesikiertoa oleva Kahi-väliseinä rakenne on pysynyt tutkimuskammion lämpötilaa korkeamana. Vesikiertoinen Kahi väliseinä rakenne on pysynyt saavuttamassaan lämpötilassa eli noin 15 °C:ssa. Veden lämpötila on pysynyt samanlaisena kuin aikaisemmissakin kuvioissa.



KUVIO 13. Kahi-väliseinäponti

Kuviossa 13 tilanne on samanlainen kuin kaavioissa 11 ja 12. Ilman vesikiertoa oleva Kahi-väliseinä rakenne on pysynyt tutkimuskammion lämpötilaa korkeampana. Vesi-kiertoinen Kahi väliseinä rakenne on pysynyt saavuttamassaan lämpötilassa eli noin 15 °C:ssa. Veden lämpötila on pysynyt samanlaisena kuin aikaisemmissakin kuvioissa.



KUVIO 14. Kahi-väliseinäponti

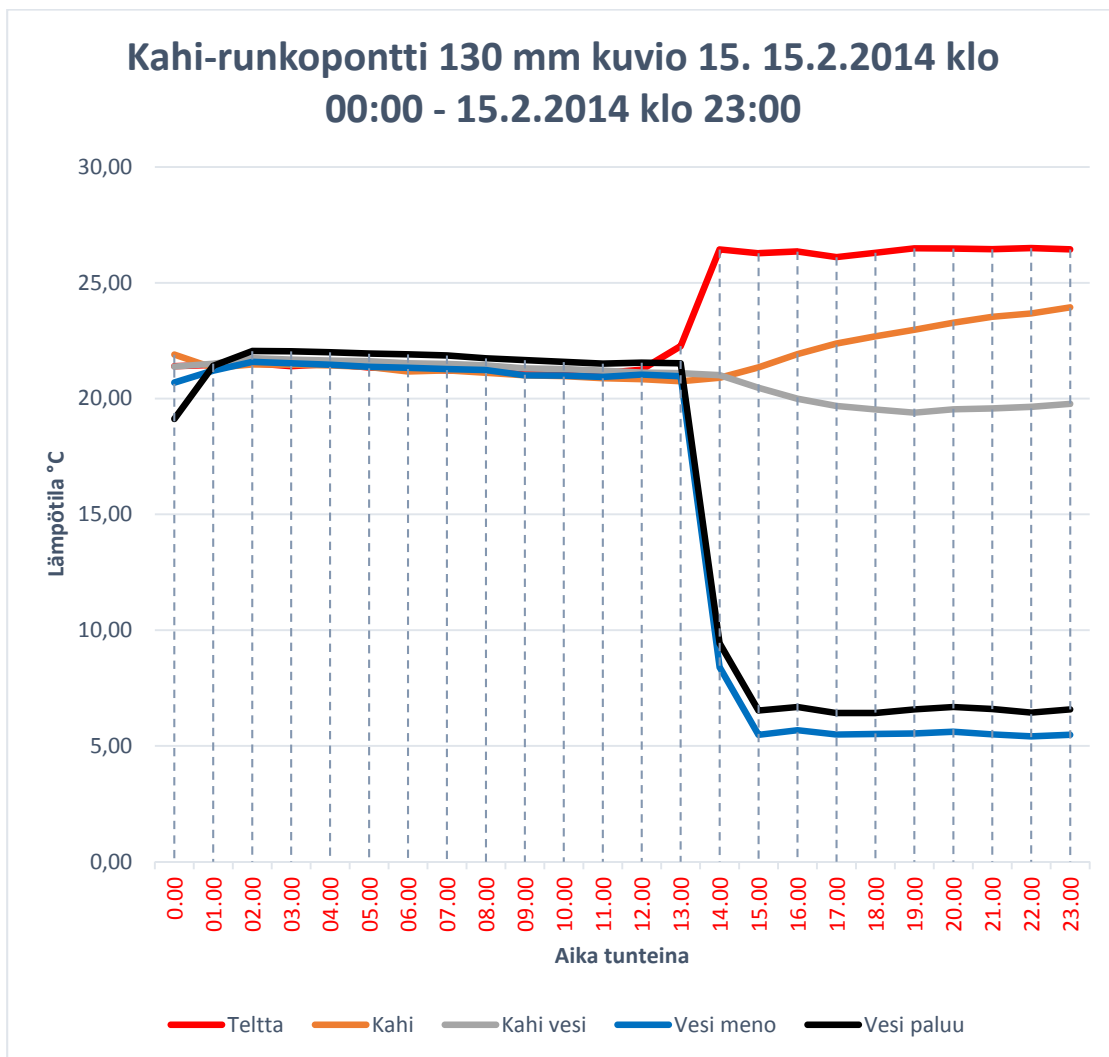
Kuviossa 14 veden jäähdytys on lopetettu tunnin 9 kohdalla. Veden kierrättämistä on kuitenkin jatkettu vesikiertoisessa Kahi-rakenteessa. Vesikiertoinen Kahi-rakenne on lämmennyt lämpimämmäksi kuin kammion lämpötila.

5.2 Kahi-runkoponti

Seuraavat mittaustulokset saatiin Kahi-runkopontista. Veden virtaus rakenteisiin mitattiin ja se oli 2,93 l/min. Kuvioissa käytetyt lämpötilat on laskettu jokaiselle tunnille kuuden eri mittauksen perusteella aritmeettisena keskiarvona. Rakenteissa on ollut kolme eri anturia, ja ne on sijoitettu puoleen väliin rakennetta eli esim. Kahi-runkoponti rakenteessa ne ovat 65 mm:n syvyydellä pinnasta. Ilman vesikierto tutkitun Kahi-rakenteen yksi anturi ei toiminut, joten tässä rakenteessa on ollut vain kaksi mittaustulosta

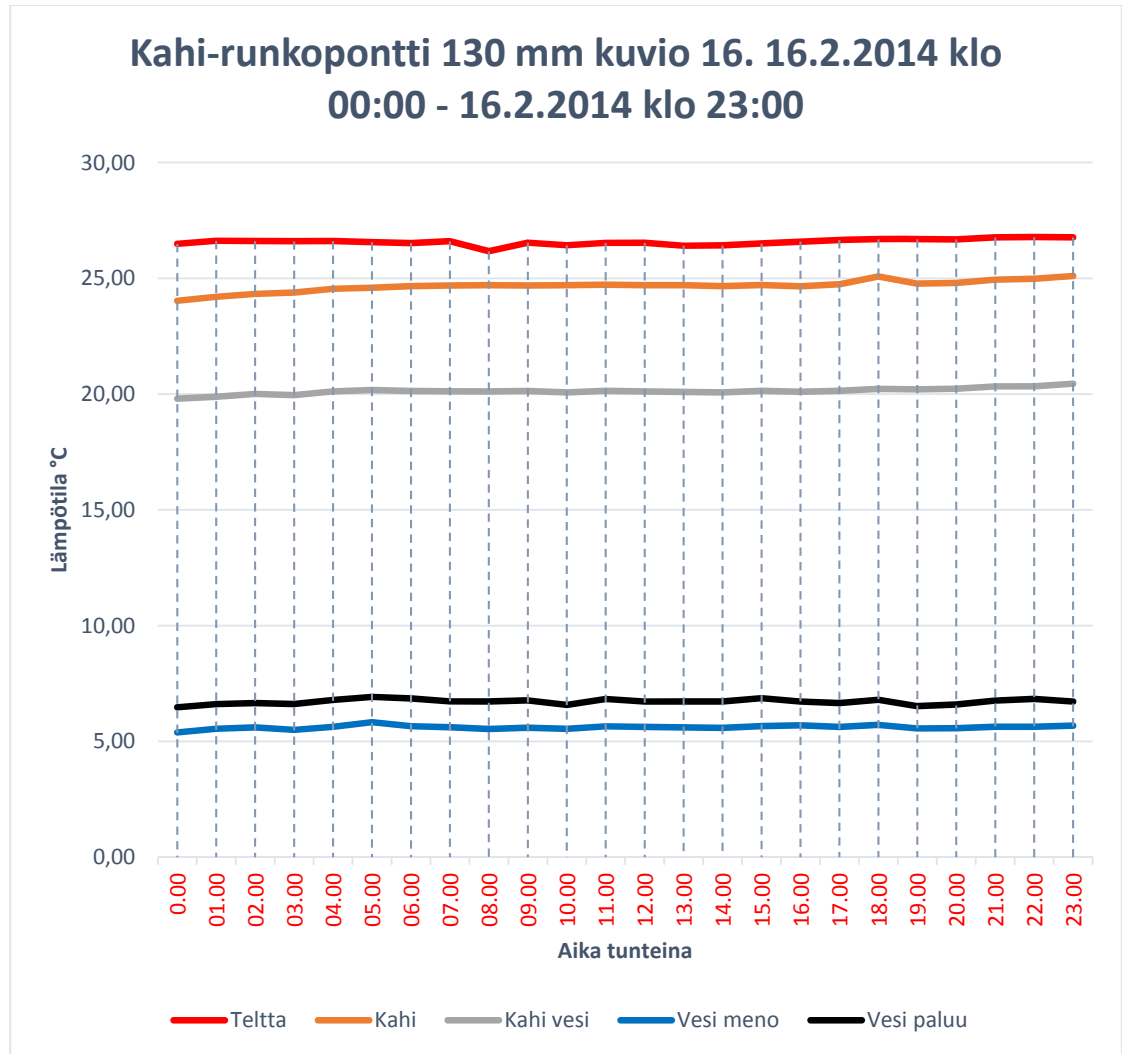
kymmenessä minuutissa. Teltassa on ollut kahdeksan eri anturia. Lisäksi teltan ulkopuolella oli yksi anturi. Kaikissa antureissa mittaussväli oli kymmenen minuuttia. Teltan lämpötila laskettiin sisäpuolella olevien antureiden aritmeettisena keskiarvona. Teltassa oli myös pieni puhallin, joka kierrätti ilmaa niin, että se tasasi lämpötiloja. Teltassa oli samaan aikaan myös Leca EasyLex-rakenteet. Mittaukset voitiin kuitenkin suorittaa vain kahteen rakenteeseen ja teltan olosuhteisiin yhdellä kerralla. Rakenteet sijoitettiin symmetrisesti teltaan. Anturit sijaitsivat rakenteessa seuraavasti: Anturi 1 oli vasemmalla 300 mm rakenteen yläreunasta ja 220 mm rakenteen vasemmasta reunasta. Anturi 2 oli oikealla 300 mm rakenteen yläreunasta ja 220 mm rakenteen oikeasta reunasta. Anturi 3 oli rakenteen keskellä ja 400 mm rakenteen alareunasta.

Seuraavat kuvat 15 – 22 on tehty tutkimuskammiosta saatujen mittaustulosten perusteella.



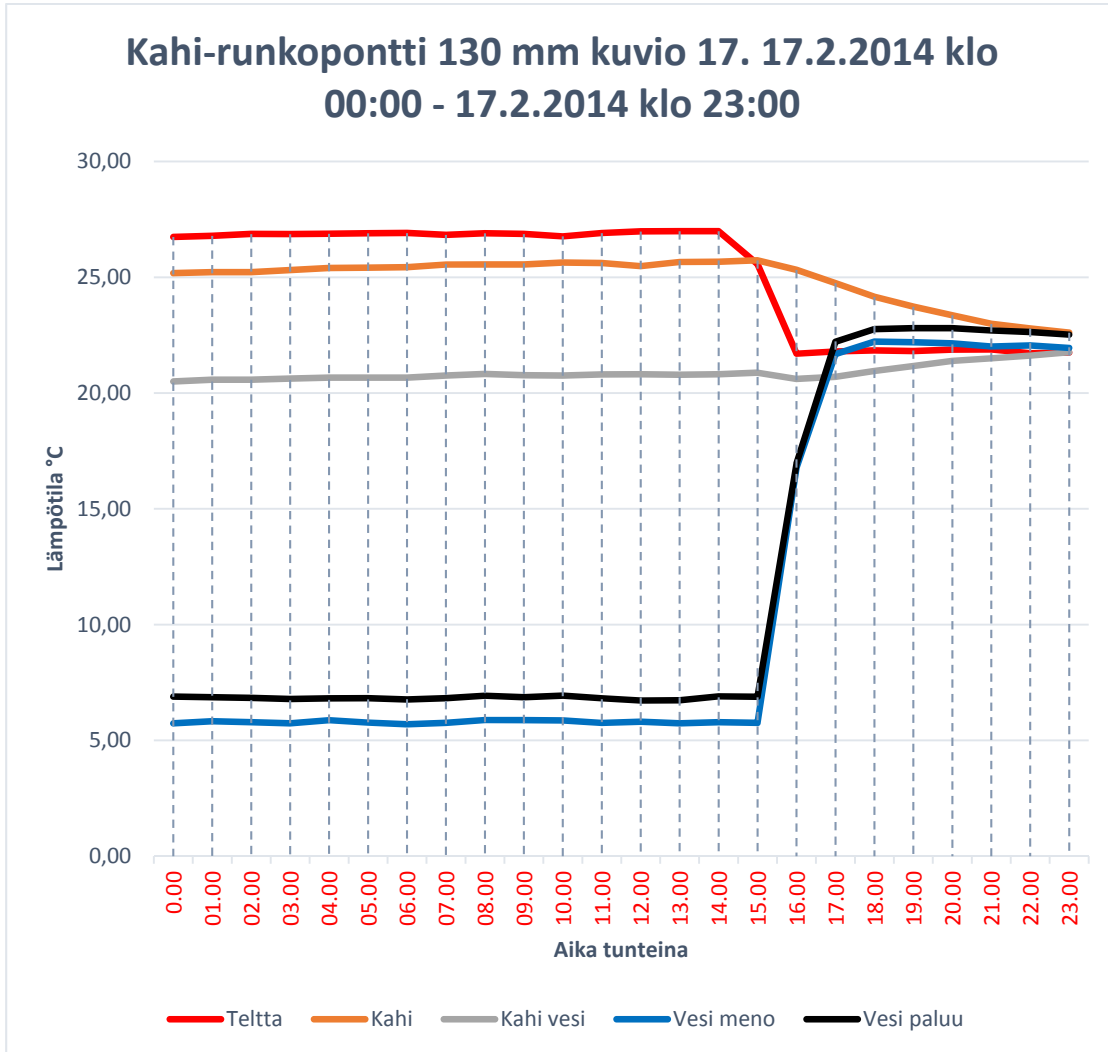
KUVIO 15. Kahi-runkopontti

Kaaviossa on havaittavissa lämpötilojen tasaantuminen, jonka jälkeen lämpötilaa on nostettu ja kiertävän veden jäähdytys on aloitettu. Vesikiertoisen Kahiin lämpötila alkaa laskea heti kun vedenkierrätys on aloitettu, vaikka tutkimuskammion lämpötila nousee



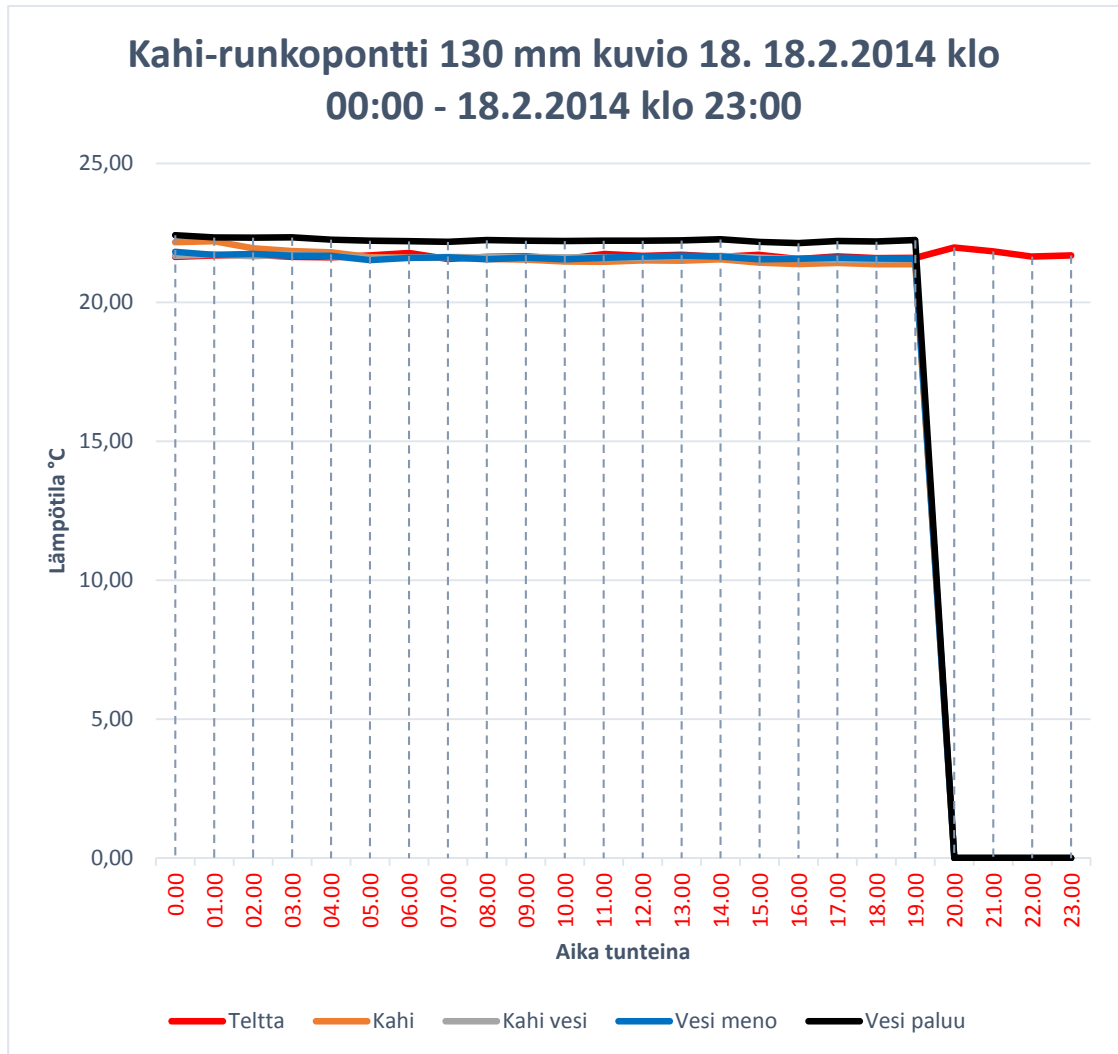
KUVIO 16. Kahi-runkopontti

Lämpötilat ovat tasaantuneet kaikissa mitattavissa kohteissa. Vesikiertoisen Kahi-runkopontin lämpötila on noin 6 °C matalampi kuin tutkimus teltan lämpötila. Kahiin ilman vesikiertoa olevan rakenteen lämpötila on noin 1 °C:n verran matalampi kuin tutkimus teltan lämpötila.



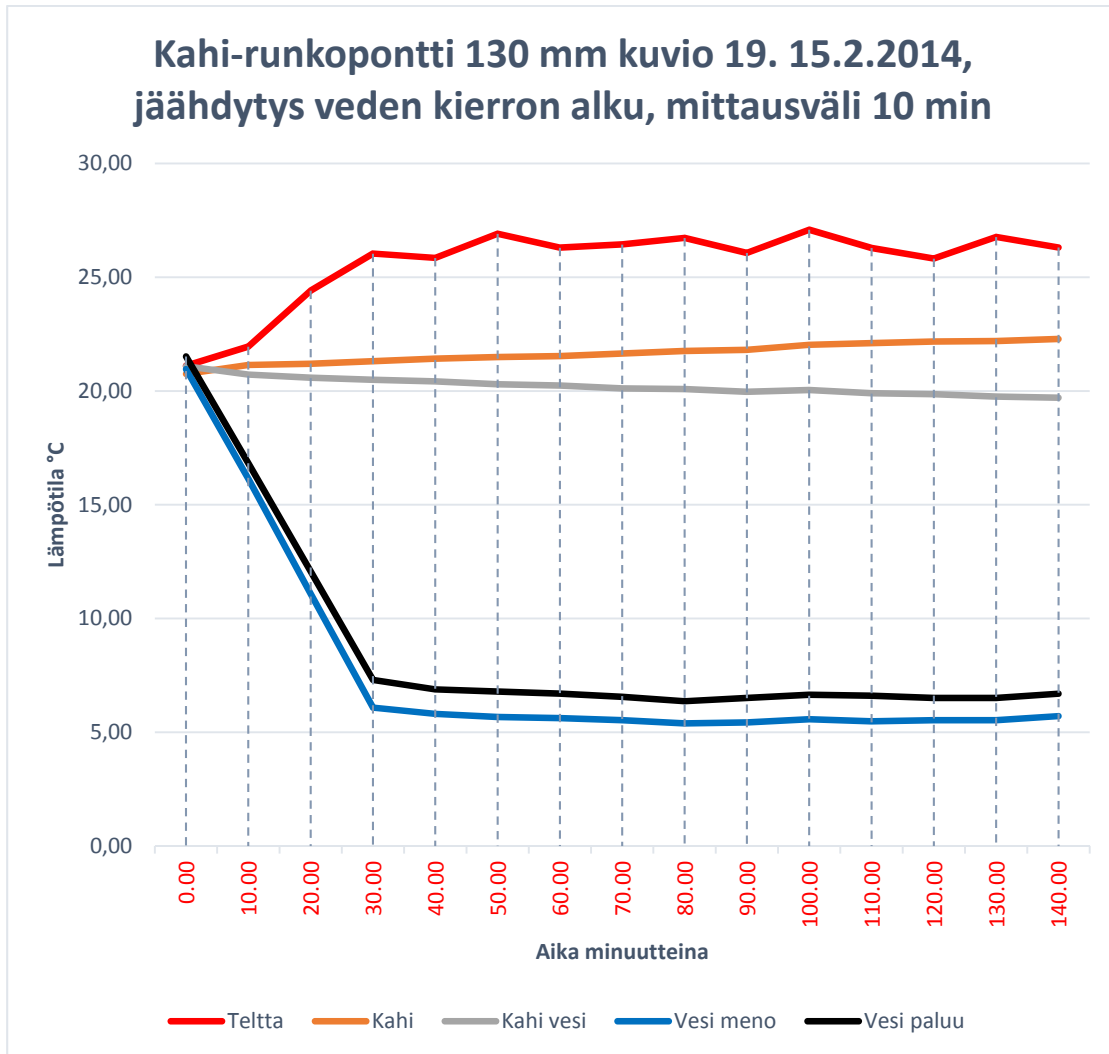
KUVIO 17. Kahi-runkopontti

Lämpötilojen tasaantumisen jälkeen tutkimus teltan lämpötila on pudotettu ja kiertävän veden jäähdytys on lopetettu. Kahi-runkopontin lämpötila laskee kohti tutkimuskammion lämpötilaa. Noin yhdeksän tunnin jälkeen lämpötila on lähes sama kuin tutkimuskammion lämpötila. Vesikiertoisen Kahi-runkopontin lämpötila lähtee nousuun tunnin kuluttua veden lämpötilan noususta.



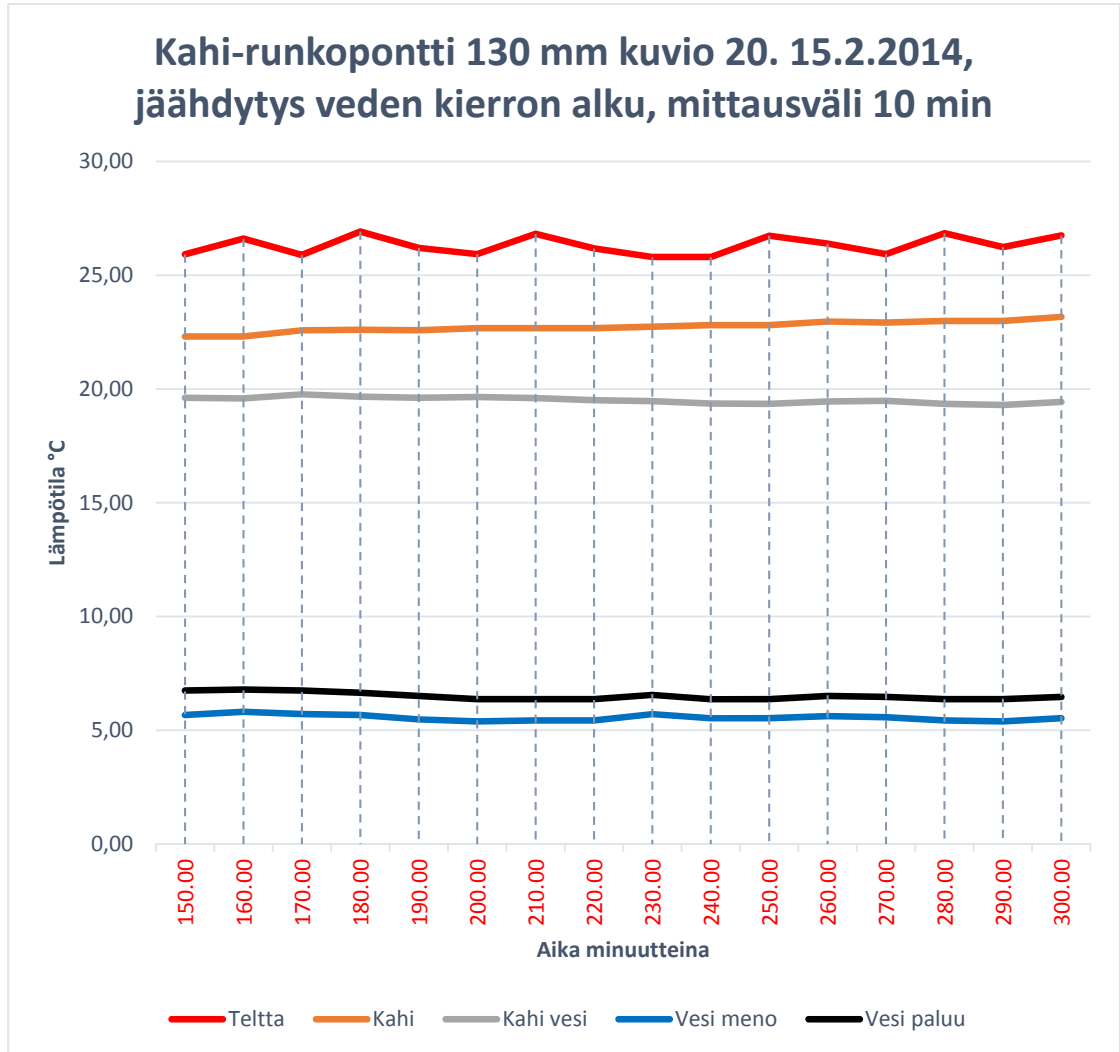
KUVIO 18. Kahi-runkopontti

Tilanne on tasaantunut lämpötilan laskun ja veden jäähdytyksen jälkeen. Mittaukset vedestä ja rakenteista on lopetettu klo 19.00. Lämpötilat noudattelevat tutkimuskammion lämpötilaa. Vain kiertävä vesi on hieman lämpimämpää kuin tutkimuskammion ilma.



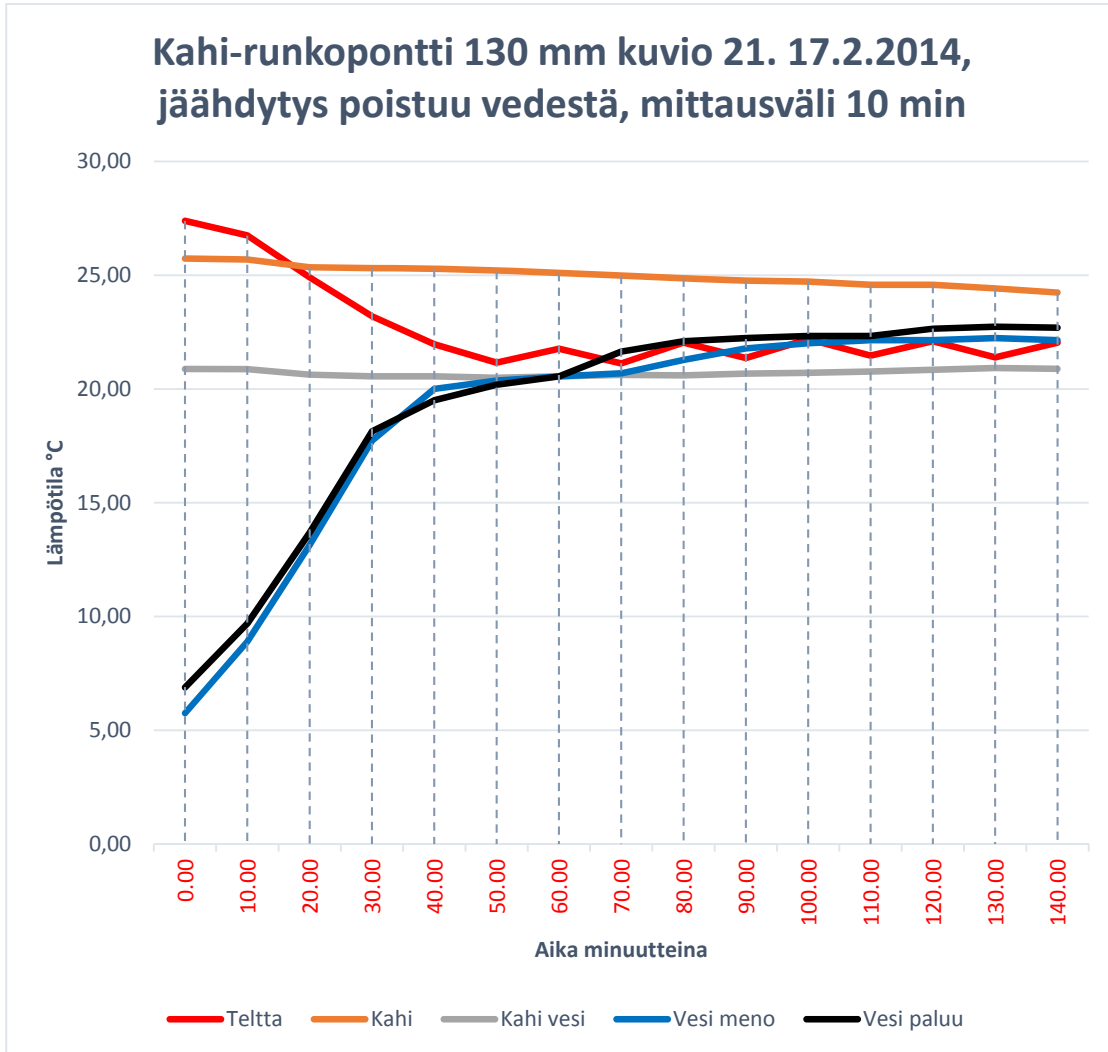
KUVIO 19. Kahi-runkopontti

Kaaviossa on kuvattu lyhyemmällä aikavälillä lämpötilan nousun ja jäähdytyksen aloituksen ajankohta. Kaaviossa mittausväli näkyy minutteina.



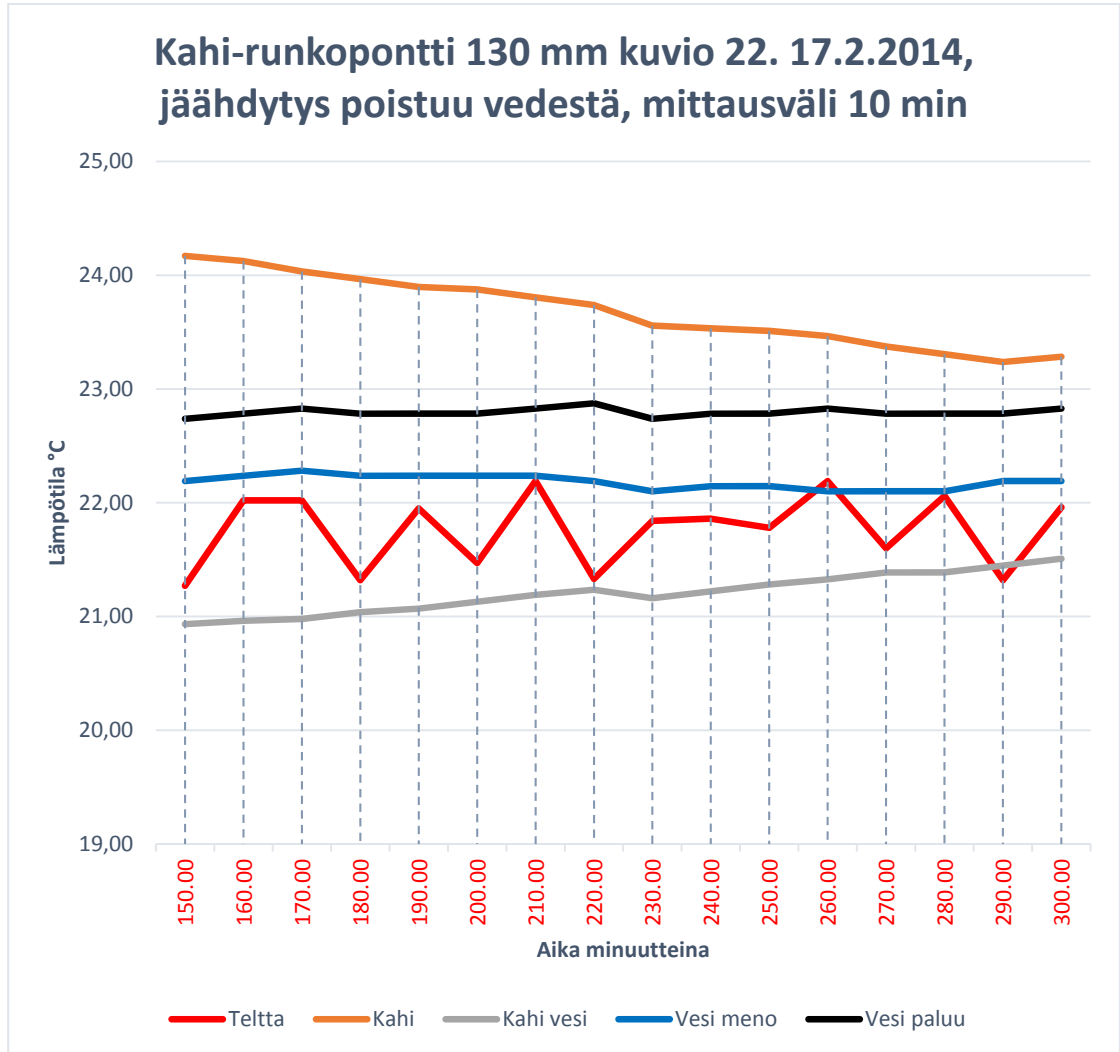
KUVIO 20. Kahi-runkopontti

Kaaviossa on kuvattu lyhyemmällä aikavälillä lämpötilan nousun ja jäähdytyksen aloituksen ajankohta. Kaaviossa mittausväli näkyy minutteina.



KUVIO 21. Kahi-runkopontti

Kaaviossa on kuvattu lyhyemmällä aikavälillä lämpötilan laskun ja jäähdytyksen lopetuksen ajankohta. Kaaviossa mittausväli näkyy minutteina.



KUVIO 22. Kahi-runkopontti

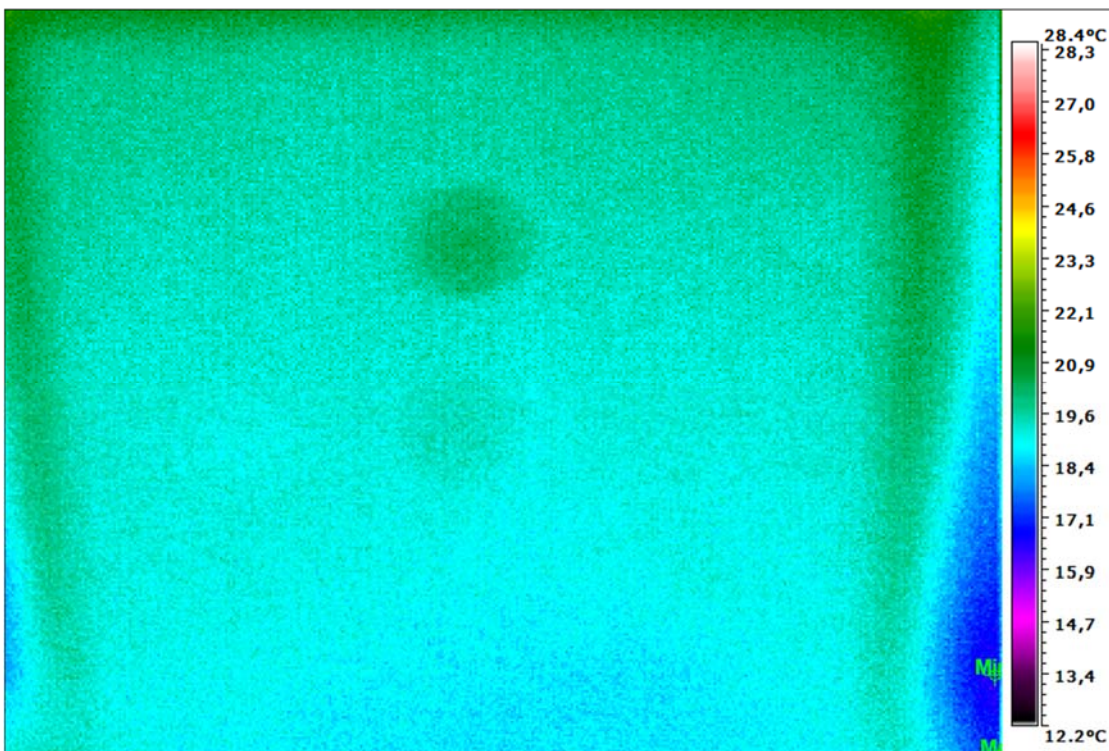
Kaaviossa on kuvattu lyhyemmällä aikavälillä lämpötilan laskun ja jäähdytyksen lopetuksen ajankohta. Kaaviossa mittausväli näkyy minuutteina.

Seuraavaksi esitetään rakenteista otetut lämpökamera- ja digikuvat. Lämpökamerakuvien otsikoissa on esitetty kuvien kuvaushetki.



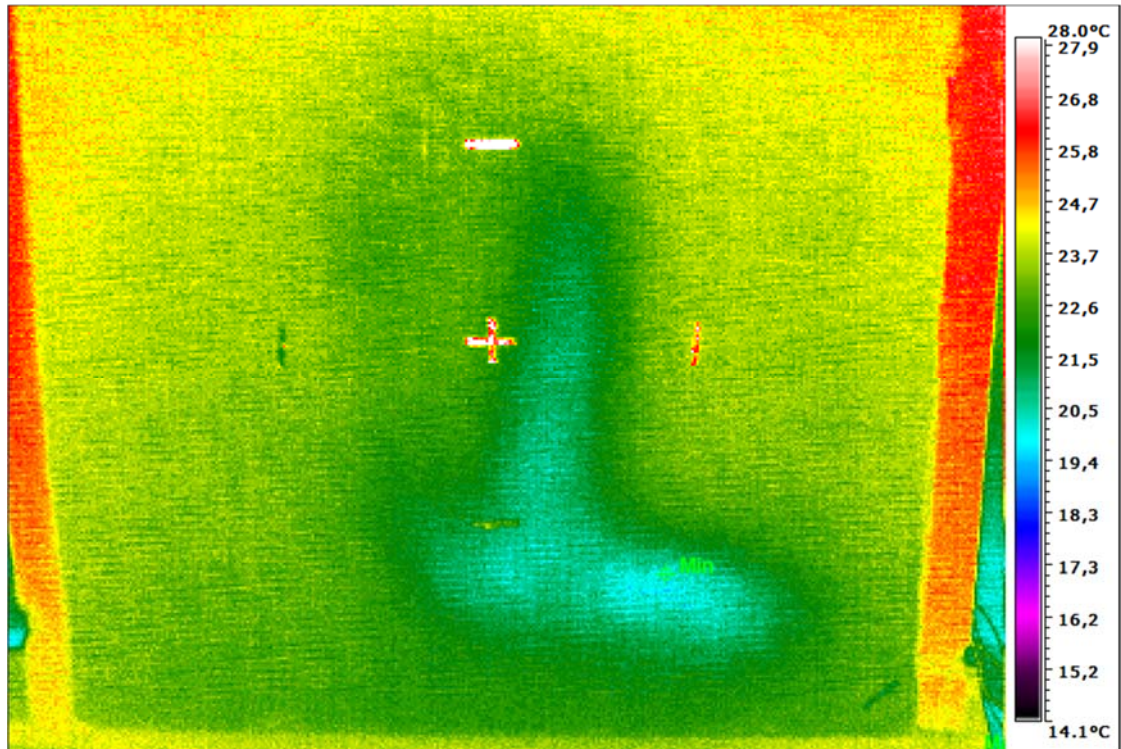
KUVA 30. Vesikiertoinen Kahi-runkopontti, digikuva tutkitusta rakenteesta

Kuvasta 30 on havaittavissa heijastavat teipit, jotka helpottavat etäisyyksien tulkintaa lämpökamerakuvissa.



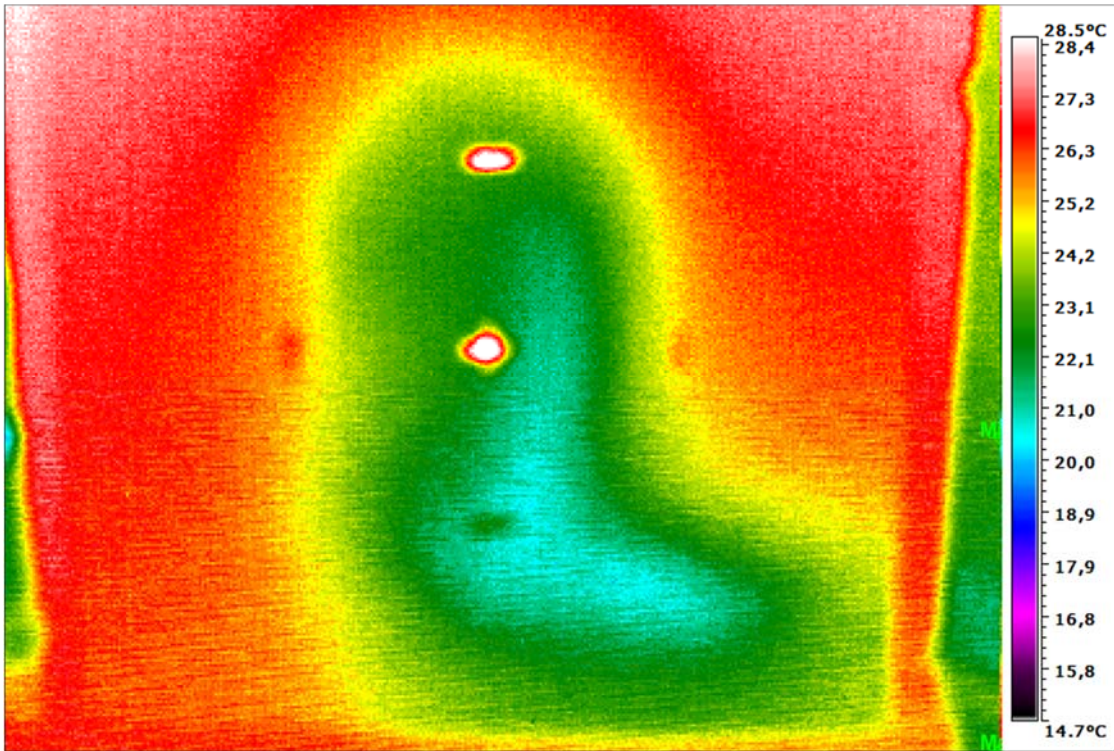
KUVA 31. Vesikiertoinen Kahi-runkopontti, lähtötilanne ennen jäähdytyksen alkua

Kuvassa 31 rakenteen lämpötilat ovat tasaantuneet. Lämpötila mittaukset on aloitettu.



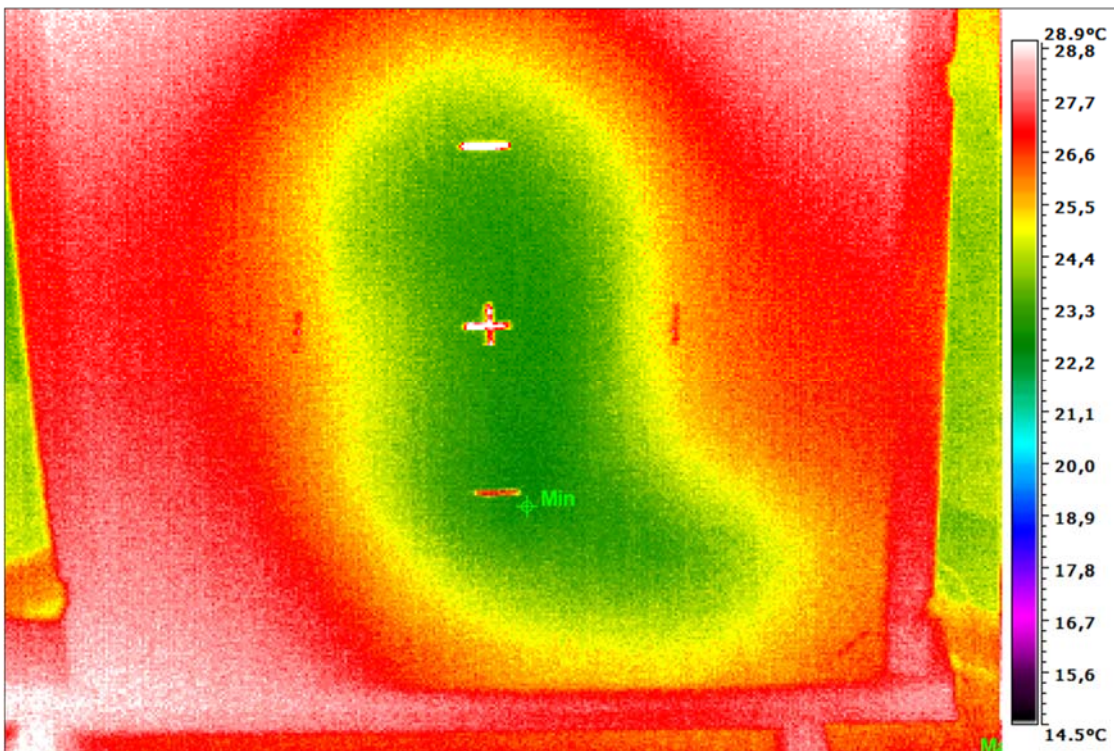
KUVA 32. Vesikiertoinen Kahi-runkopontti, 60 minuuttia jäähdytyksen aloituksen jälkeen

Kuvasta 32 on havaittavissa, että lämpötila ympäristössä on noussut ja kiertävän veden jäähdytysvaikutus alkaa vaikuttamaan rakenteeseen.



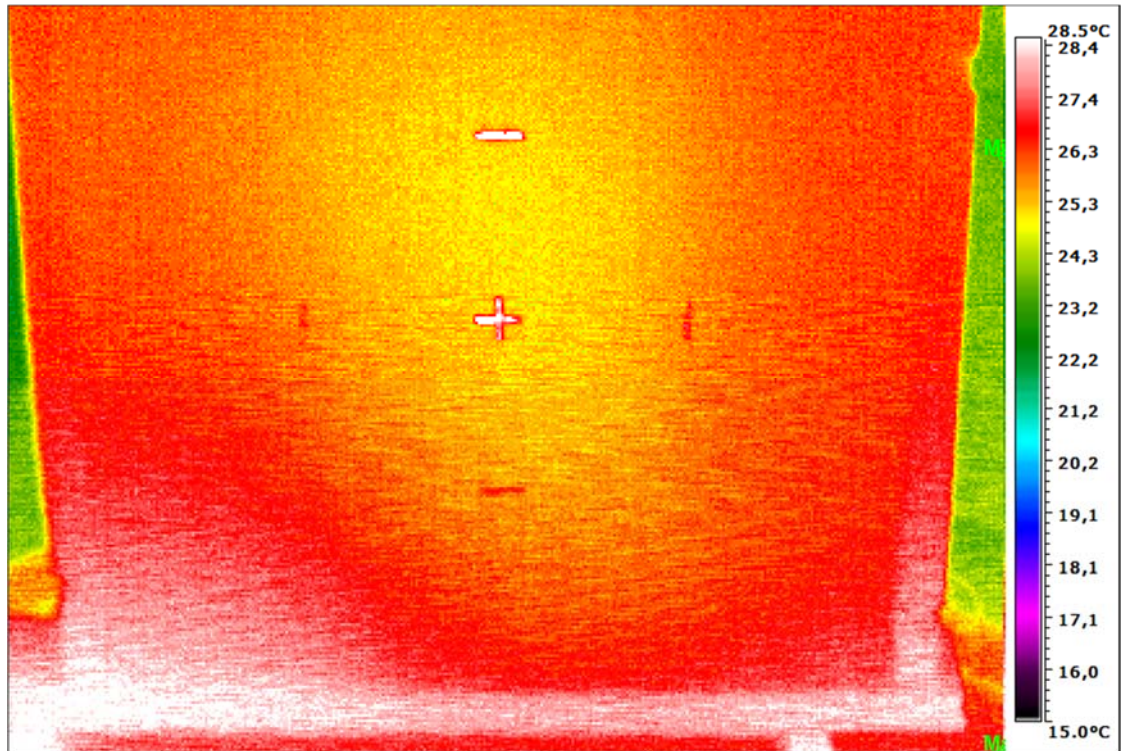
KUVA 33. Vesikiertoinen Kahi-runkopontti, noin kaksi vuorokautta veden kierrätyksen aloituksesta

Kuvasta 33 on havaittavissa, että kiertävän veden jäähdytysvaikutuksen alue on levinnyt huomattavasti.



KUVA 34. Vesikiertoinen Kahi-runkopontti, 60 minuuttia veden jäähdytyksen ja lämmönlaskun jälkeen

Kuvasta 34 on havaittavissa, että rakenteen lämpötilat ovat tasaantumassa. Vesikierron jäähdytysvaikutus on häviämässä rakenteesta.



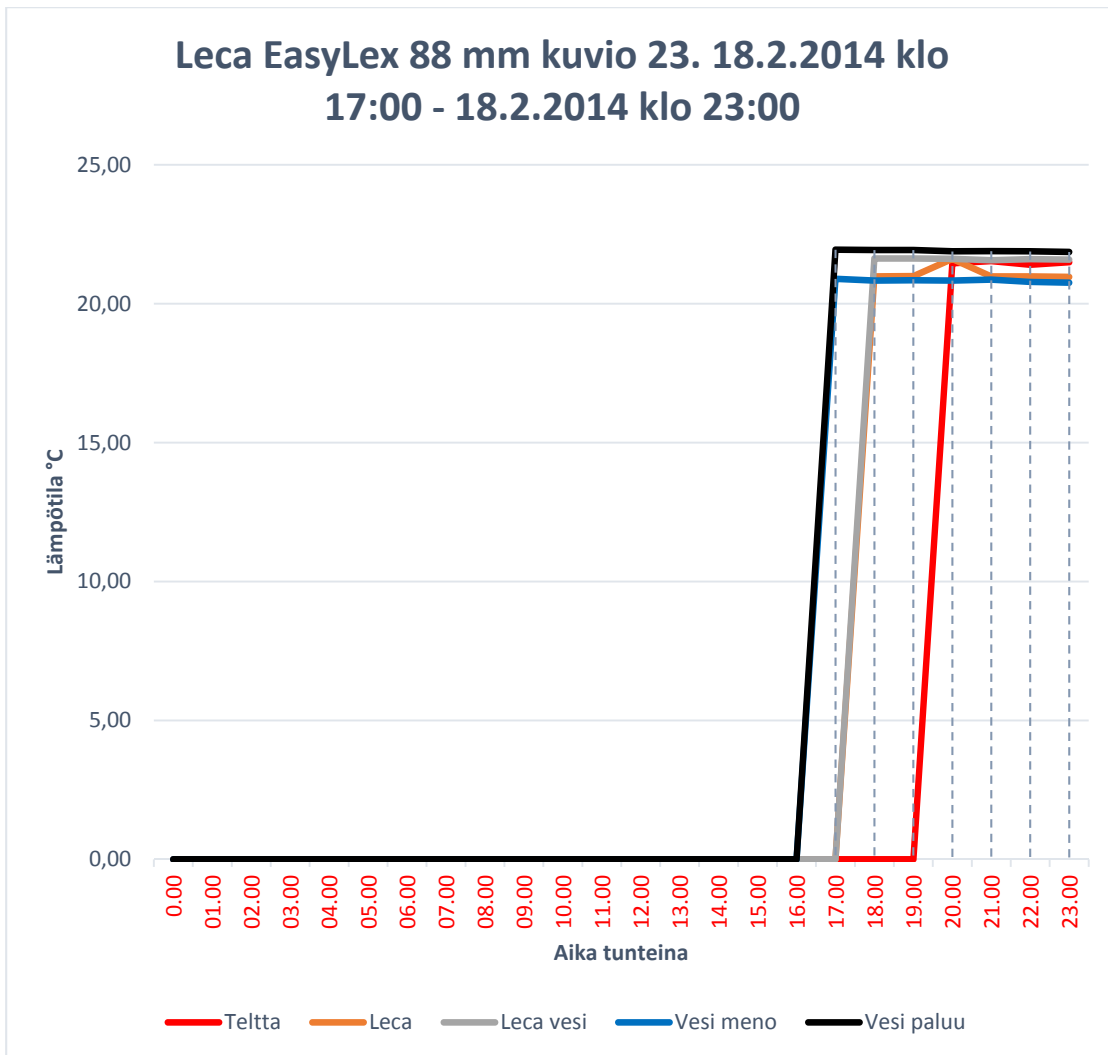
KUVA 35. Vesikiertoinen Kahi-runkopontti, 5,5 tuntia veden jäähdytyksen ja lämmönlaskun jälkeen

Kuvasta 35 on havaittavissa, että vesikierron jäähdytysvaikutusta ei ole enää havaittavissa. Rakenteen lämpötilat ovat tasaantuneet.

5.3 Leca EasyLex

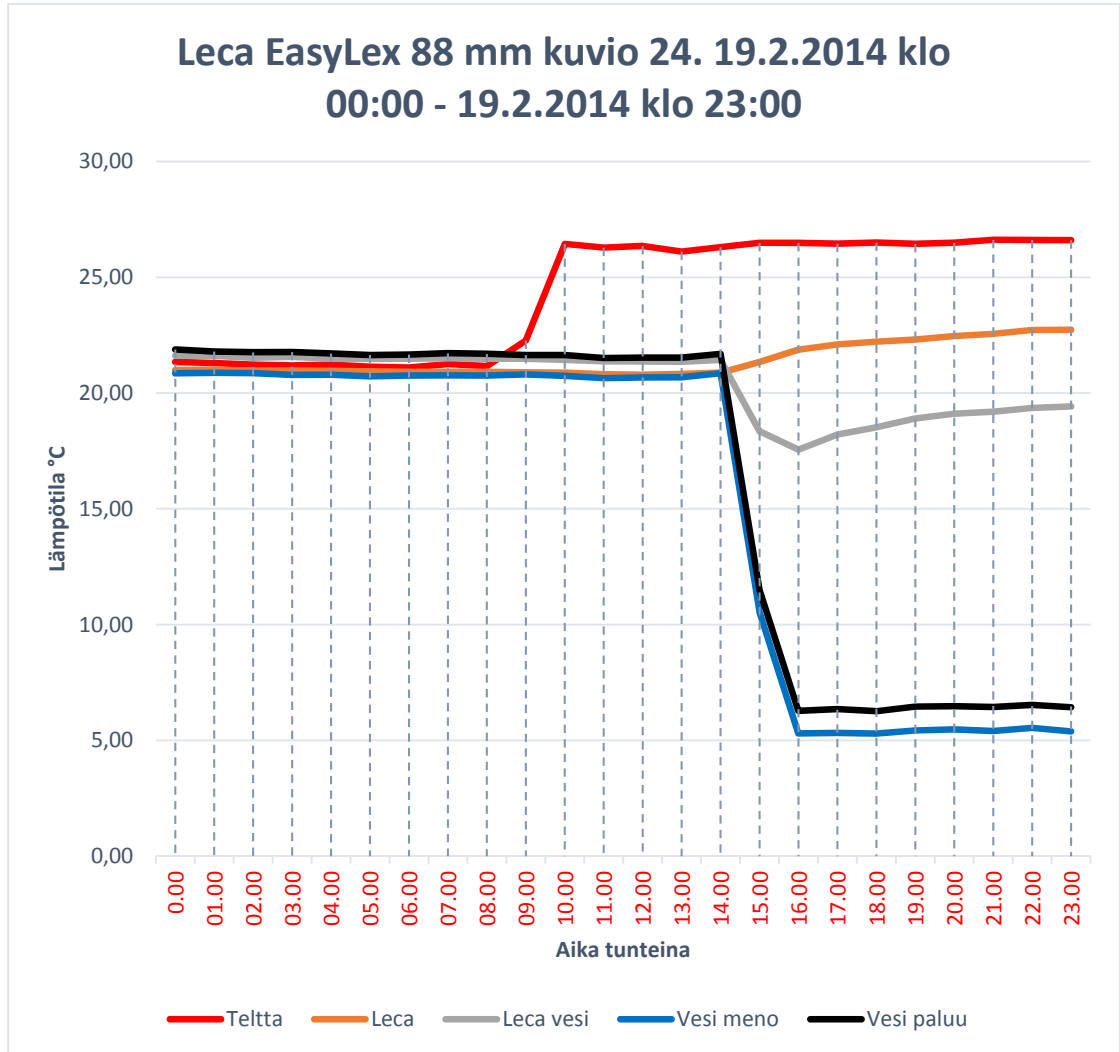
Viimeiset mittaustulokset saatiin Leca EasyLexistä. Myös nämä mittaukset suoritettiin itserakennetussa teltassa. Ulkopuolista kostutusta ei käytetty myöskään tässä tutkimuksessa. Kaikki olosuhteet ja mittaukset olivat samanlaisia kuin Kahi-runkoponttirakenteista suoritettuna. Leca-rakenteiden kaikki anturit toimivat, eli kaikista rakenteista saatiin kolme mittausta. Anturit sijaitsivat rakenteessa seuraavasti: Anturi 1 oli vasemmalla 280 mm rakenteen yläreunasta ja 210 mm rakenteen vasemmasta reunasta. Anturi 2 oli oikealla 280 mm rakenteen yläreunasta ja 210 mm rakenteen oikeasta reunasta. Anturi 3 oli rakenteen keskellä ja 300 mm rakenteen alareunasta.

Seuraavat kuvat 23 – 31 on tehty tutkimuskammioista saatujen mittaustulosten perusteella.



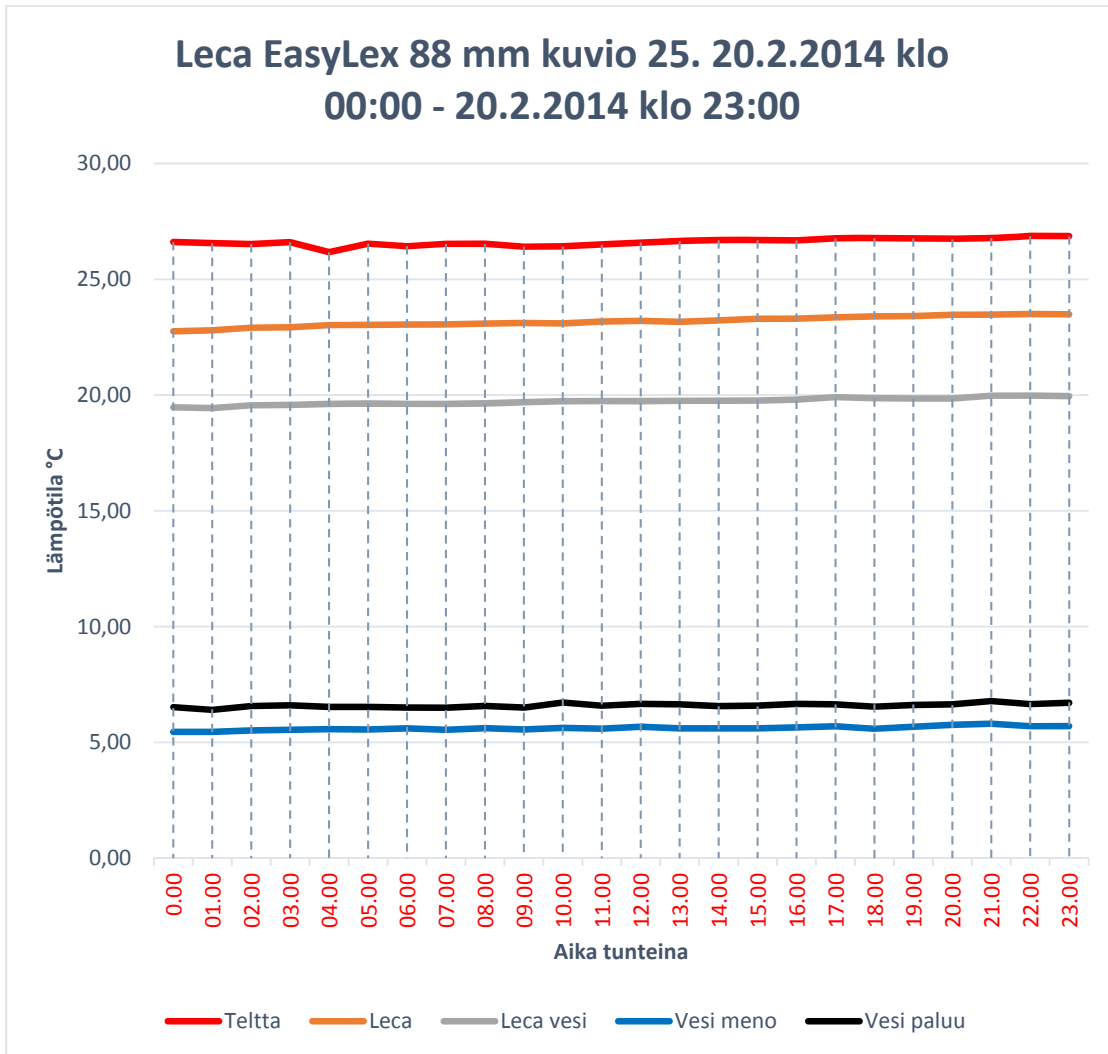
KUVIO 23. Leca EasyLex

Kuviossa 23 näkyy tutkimuksen mittausten aloitus. Rakenne on laitettu tasaantumaan tutkimustelttaan ja mittaukset rakenteista on aloitettu.



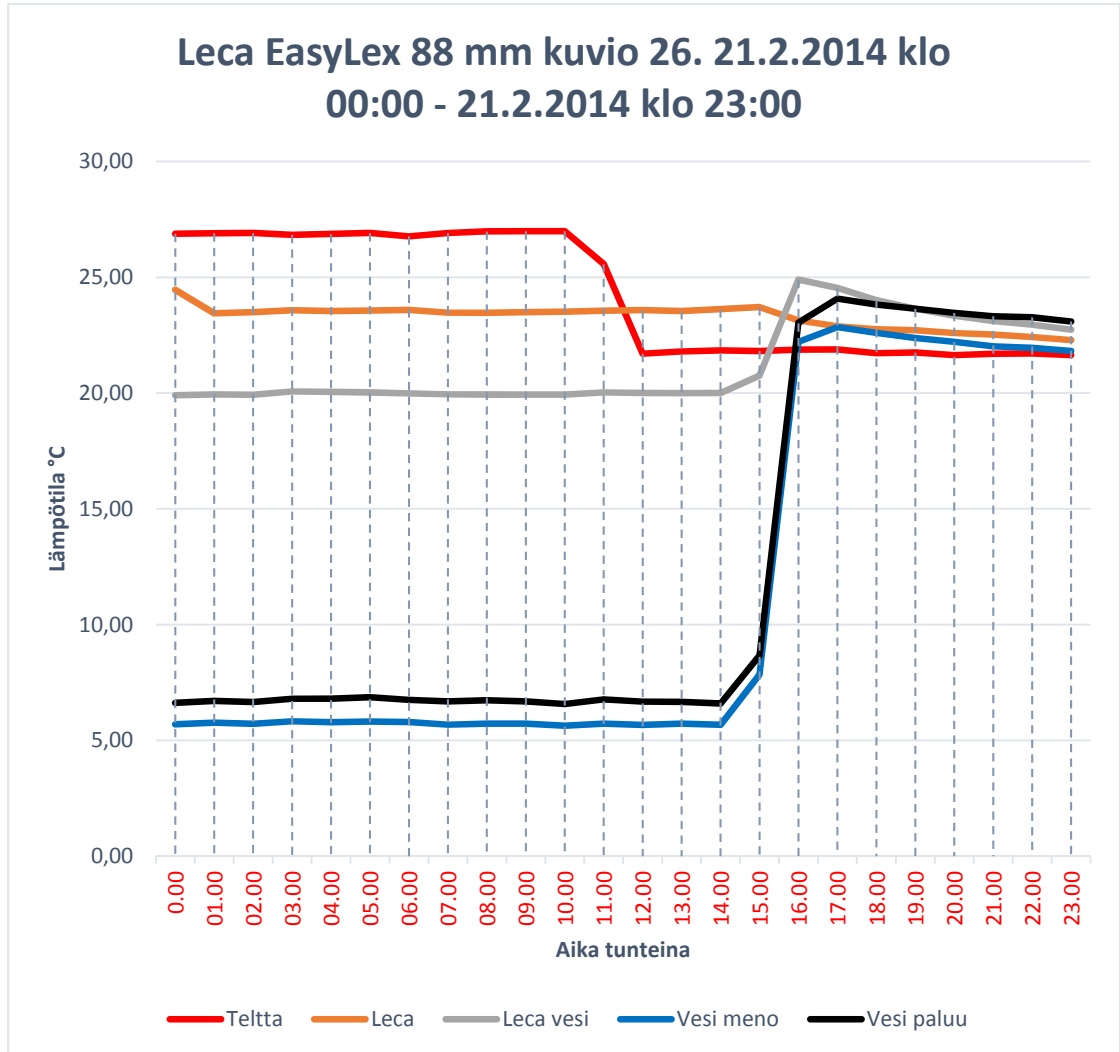
KUVIO 24. Leca EasyLex

Kuviossa 24 on huomattavissa, että lämpötilojen tasaantuminen on tapahtunut. Ensin nostettiin tutkimusteltan lämpötila, ja noin kuusi tuntia myöhemmin aloitettiin veden jäähdytys ja kierrätys. Kuvioissa 28 ja 29 näkyy veden kierrätyksen aloitus tarkemmin. Näissä kuvioissa tarkastelu väli on kymmenen minuuttia eli sama kuin tutkimusteltan ja rakenteiden mittaussväli.



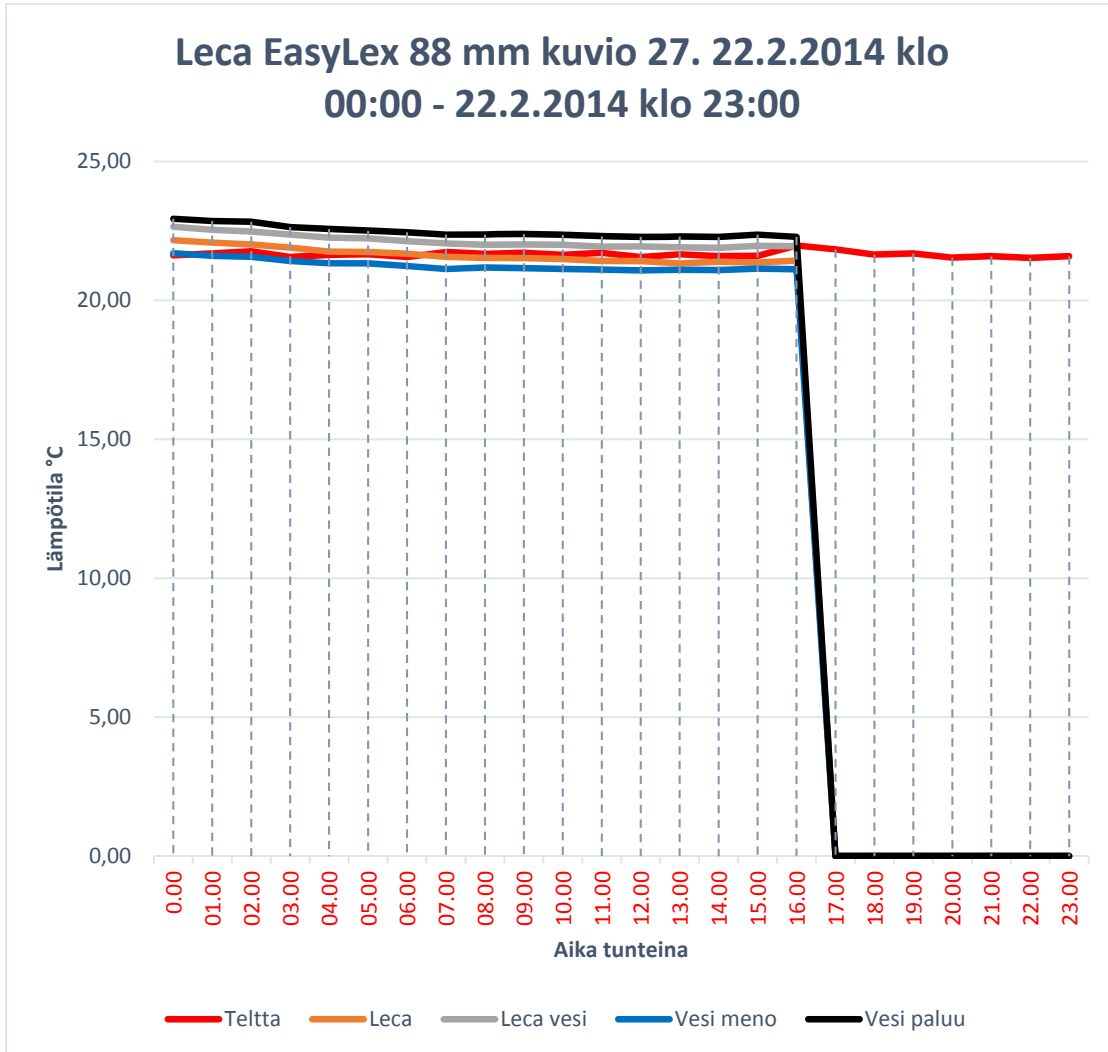
KUVIO 25. Leca EasyLex

Kuviossa 25 lämpötilojen voidaan havaita tasaantuneen. Vesikiertoinen Leca EasyLex-rakenteen lämpötila on noin kuusi astetta matalampi kuin tutkimusteltan.



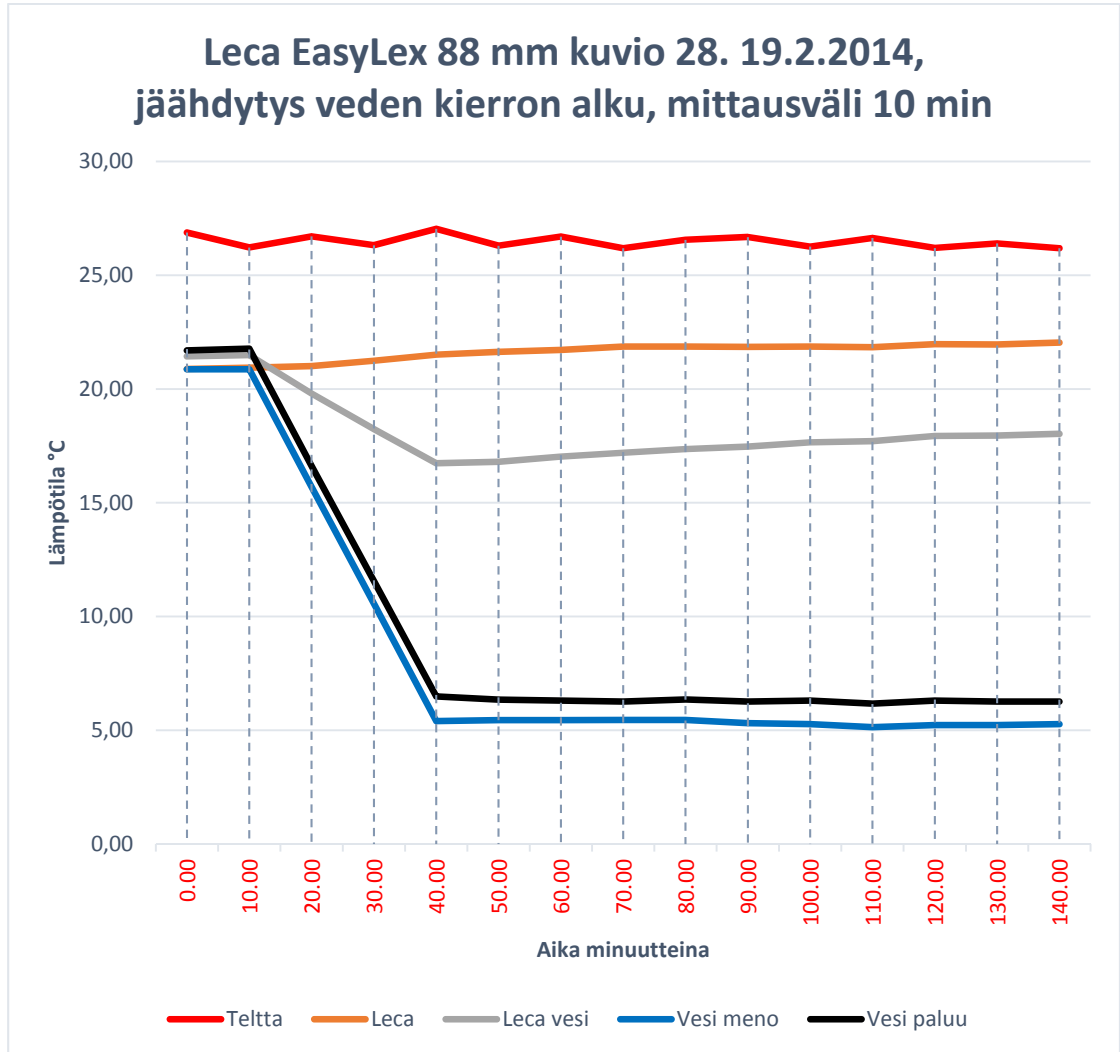
KUVIO 26. Leca EasyLex

Kuviossa 26 tunnin 10.00 kohdalla lämpötila tutkimusteltassa lasketaan ja tunnin 14.00 kohdalla veden jäädytys lopetetaan. Lämpötilan lasku tapahtui noin kahden tunnin kuluessa. Leca EasyLex-rakenteet pysyivät kuitenkin useamman tunnin saavuttamassaan lämpötilassa. Kiertävän veden lämmön nousu nosti vesikiertoisen Leca EasyLex-rakenteen lämpimämmäksi kuin tutkimuskammion lämpötila. Kuvioissa 30 ja 31 on kuvattu tarkemmin lämpötiloissa tapahtuvat muutokset. Mittausväli näissä kuvioissa on kymmenen minuuttia.



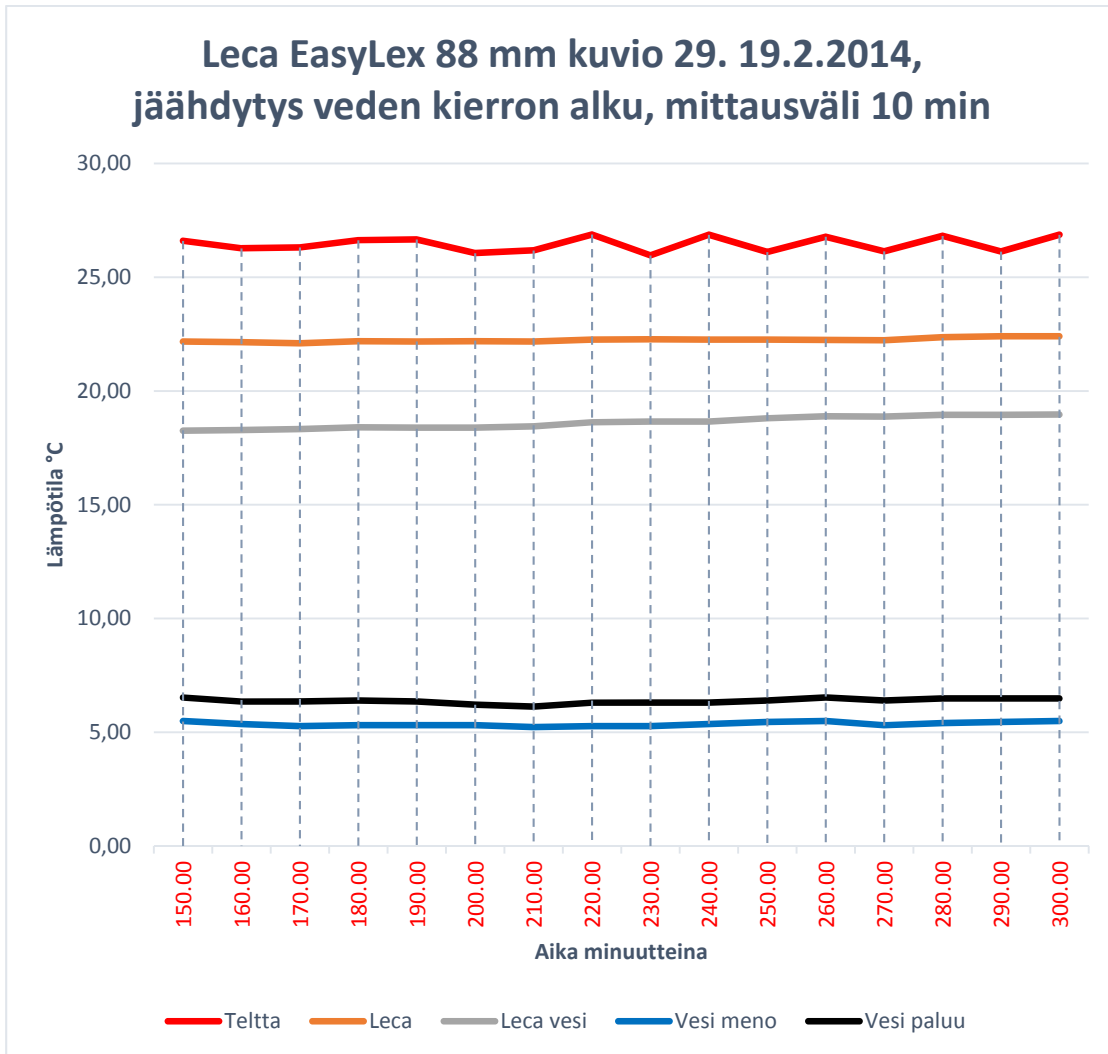
KUVIO 27. Leca EasyLex

Kuviossa 27 on havaittavissa lämpötilojen tasaantuminen tutkimusteltassa. Mittaukset rakenteissa ja vedenkierrossa on lopetettu tunnin 16:00 kohdalla. Tutkimusteltan kohdalla lämpötilan mittausta on jatkettu. Rakenteiden lämpötilat noudattelevat tutkimuskammion lämpötilaa.



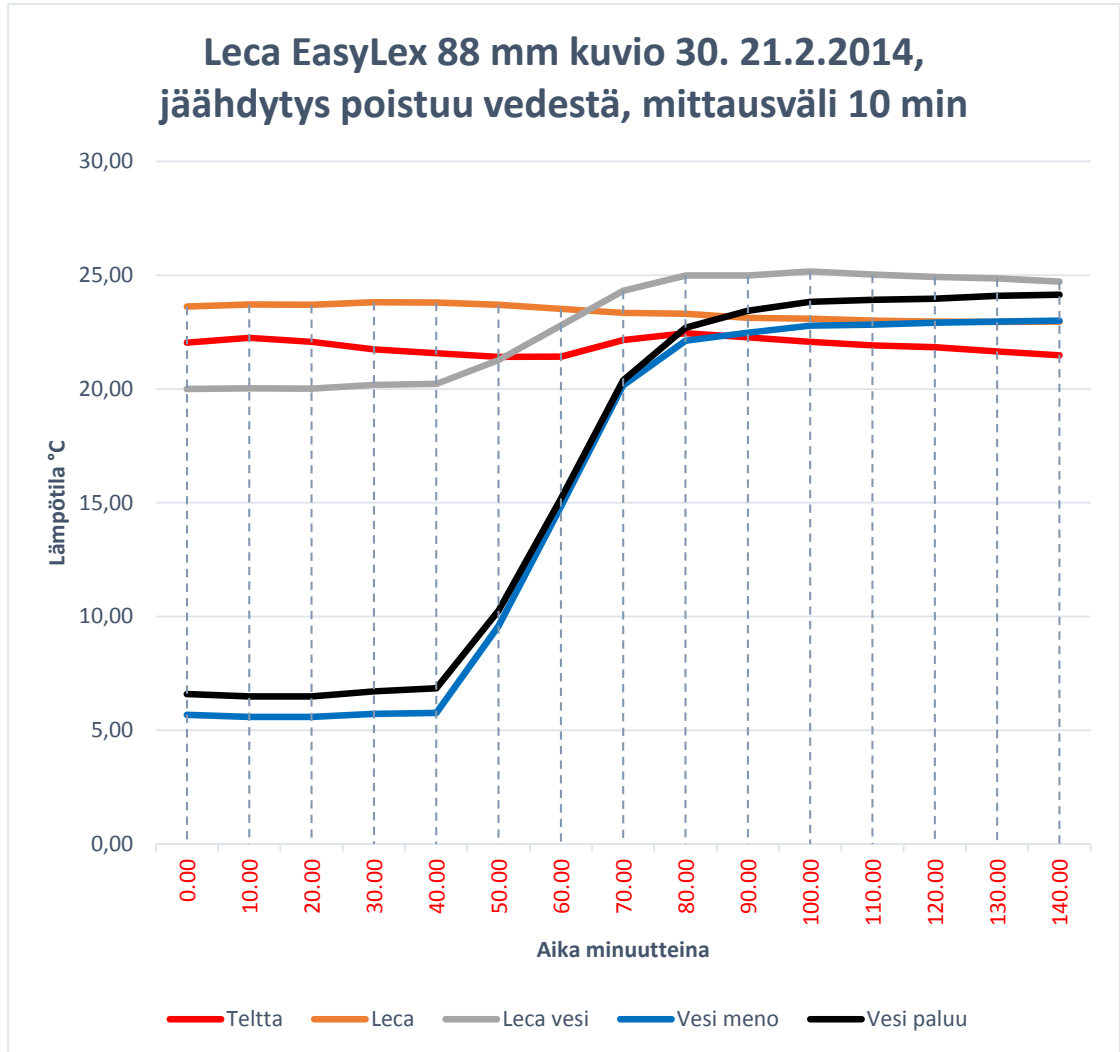
KUVIO 28. Leca EasyLex

Kuviossa 28 on havaittavissa tarkemmin rakenteissa ja lämpötiloissa tapahtuvat muutokset, kun kiertävän veden jäähdytys on aloitettu. Tämä tarkempi kuvaus jatkuu myös kuviossa 29.



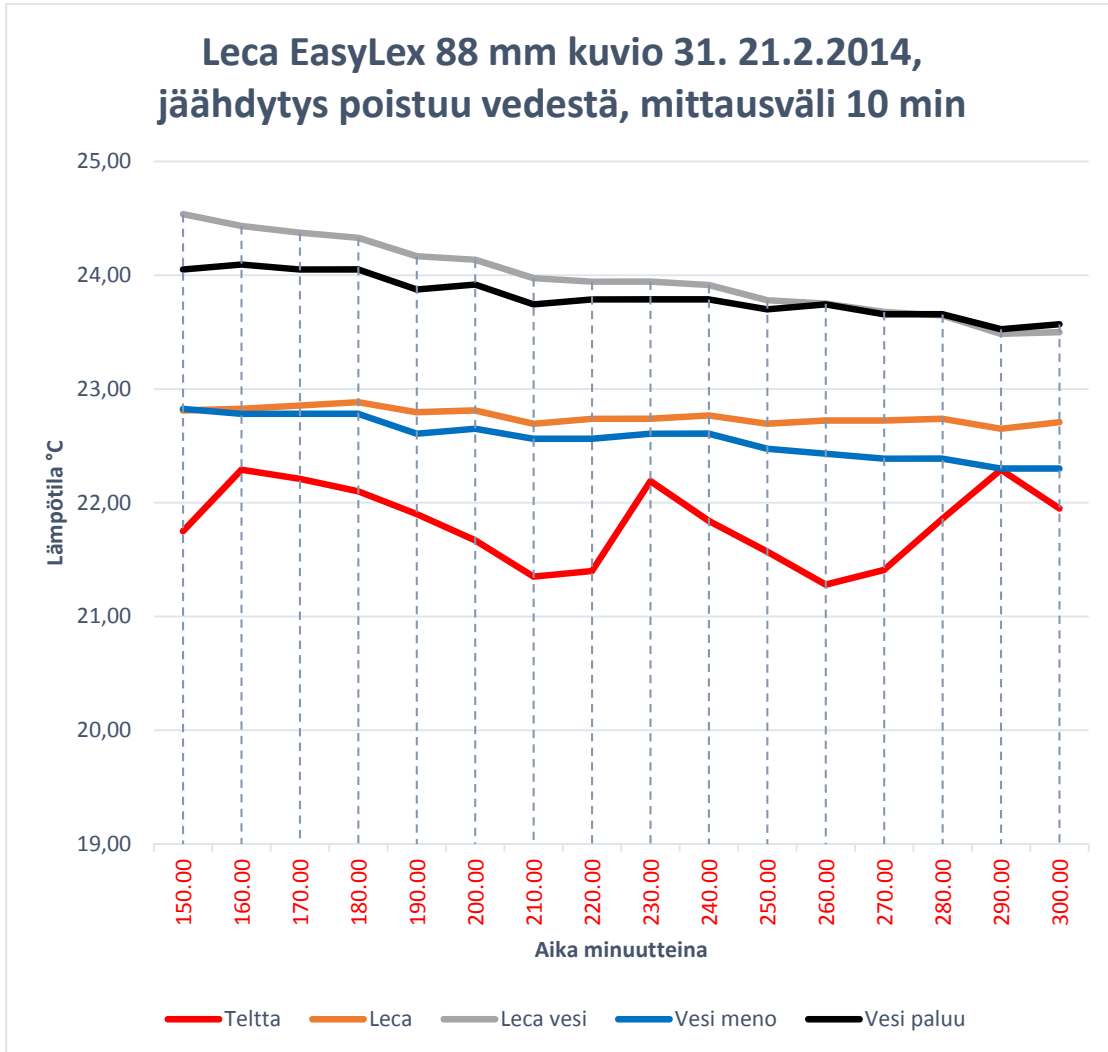
KUVIO 29. Leca EasyLex

Kuviossa 29 taulukointi lämpötiloista jatkuu kymmenen minuutin välein. Lämpötilat ovat tasaantuneet.



KUVIO 30. Leca EasyLex

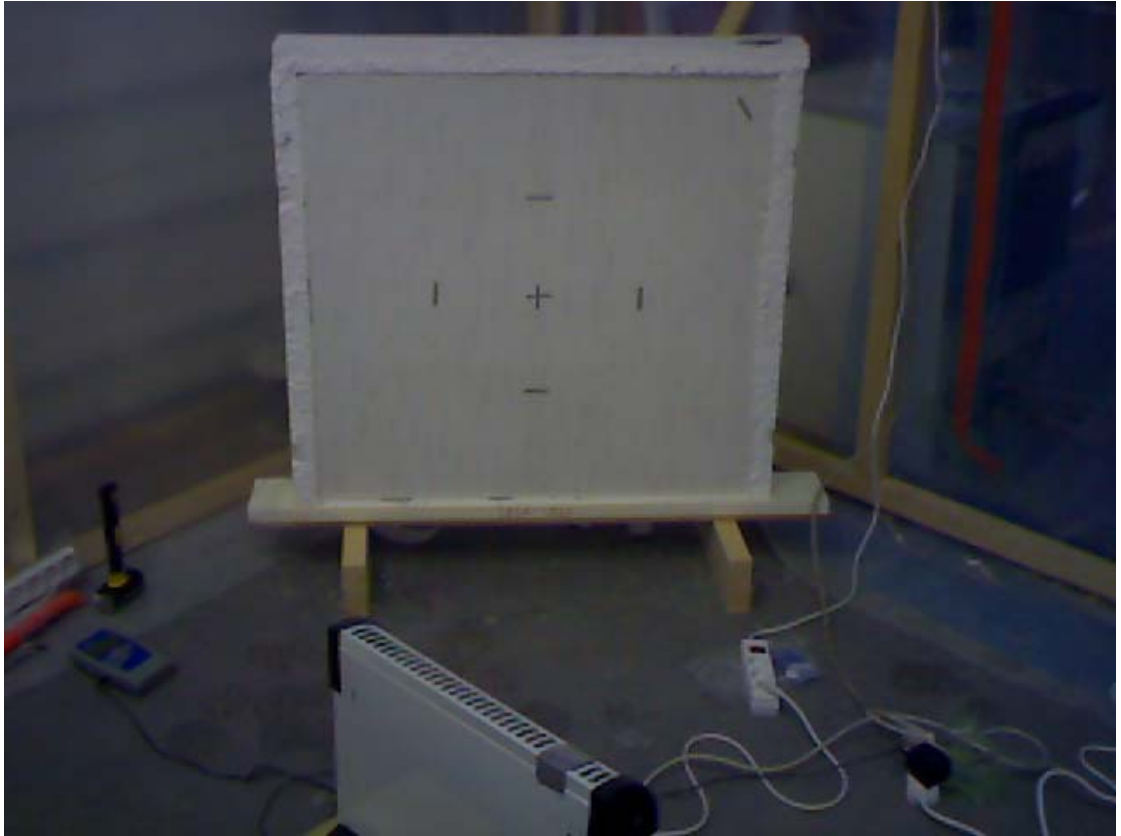
Kuviossa 30 on havaittavissa tarkemmin rakenteissa ja lämpötiloissa tapahtuvat muutokset. Mittausväli on kymmenen minuuttia. Kohdassa 40 minuuttia, veden jäähdytys lopetetaan.



KUVIO 31. Leca EasyLex

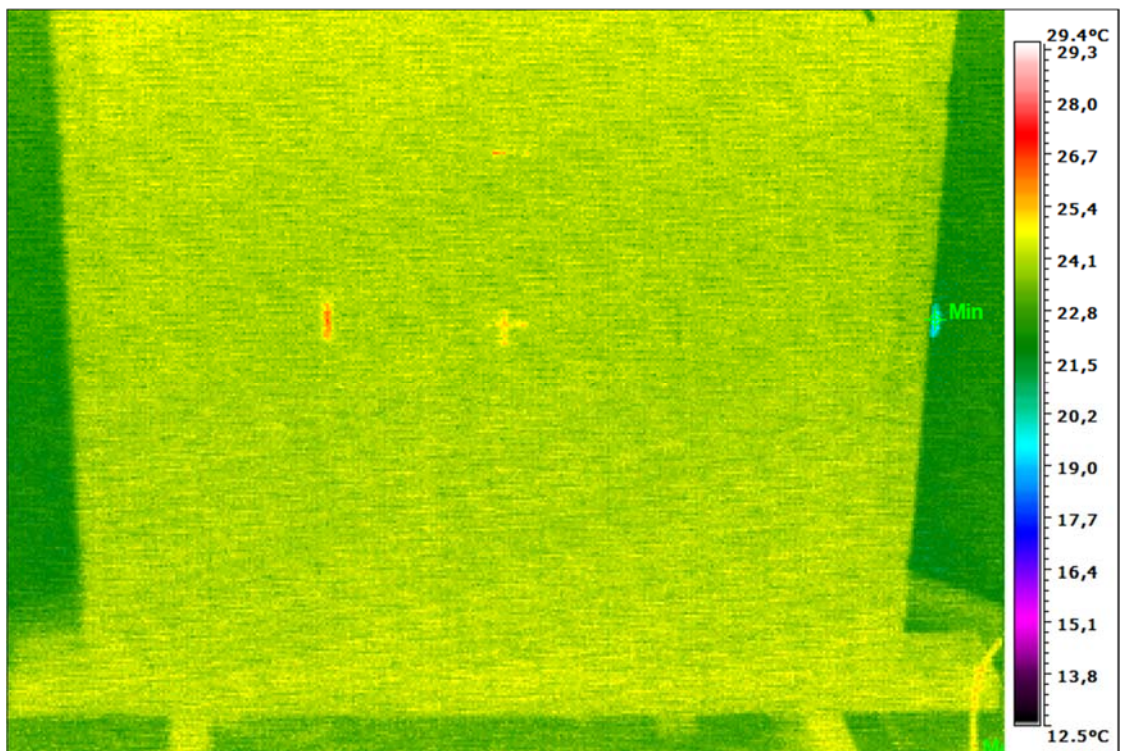
Kuviossa 31 taulukointi lämpötiloista jatkuu kymmenen minuutin välein.

Myös Leca EasyLex rakenteesta suoritettiin lämpökamerakuvaus. Lämpökamera- ja digikuvat esitetään seuraavaksi tässä luvussa. Lämpökamerakuvien otsikoissa on esitetty kuvien kuvaushetki.



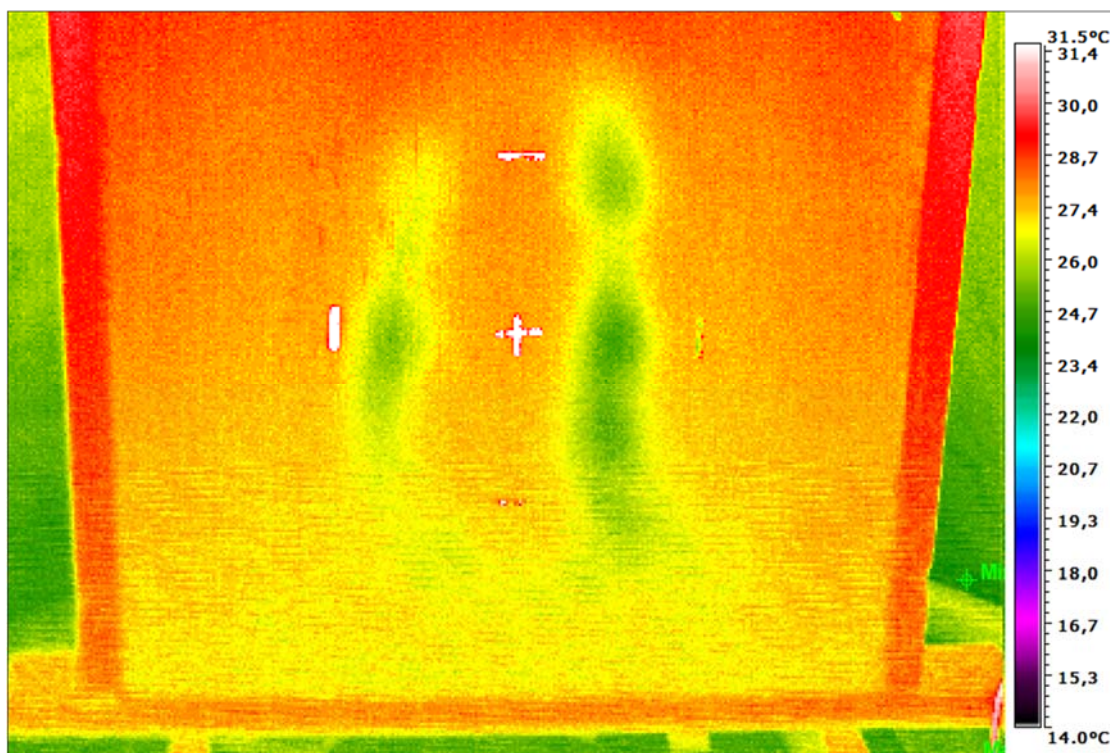
KUVA 36. Vesikiertoinen Leca EasyLex, digikuva tutkitusta rakenteesta

Kuvasta 36 on havaittavissa heijastavat teipit, jotka helpottavat etäisyyksien tulkintaa lämpökamerakuvissa.



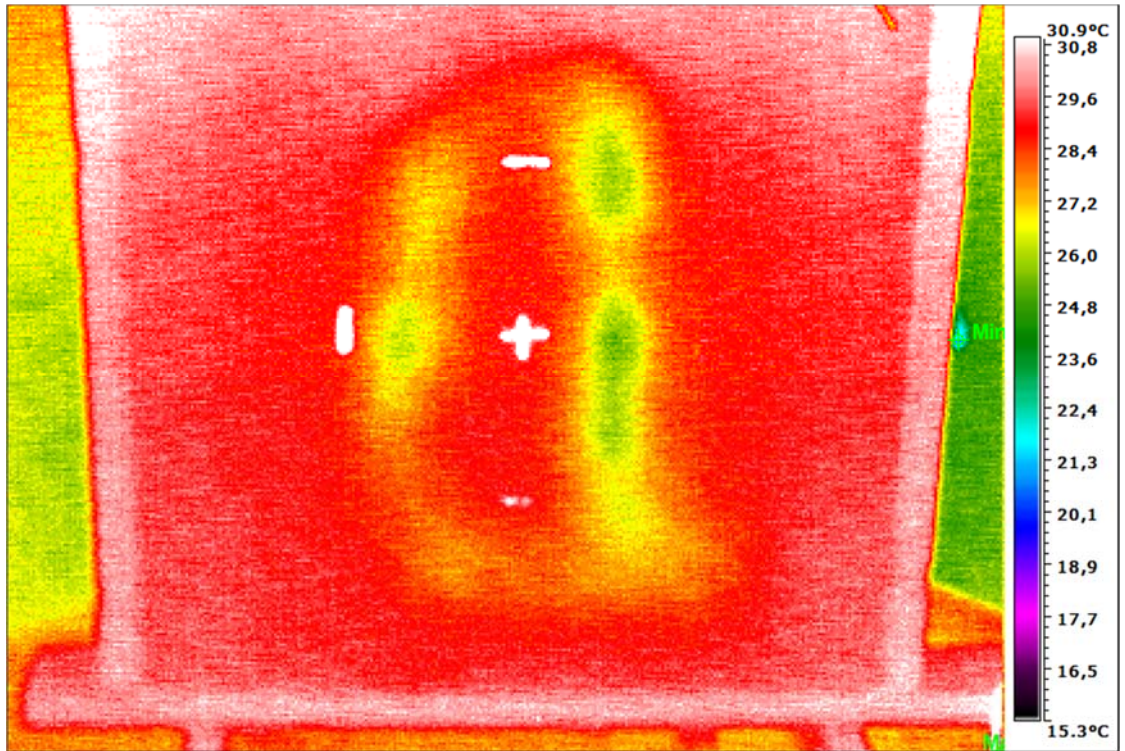
KUVA 37. Vesikiertoinen Leca EasyLex, lähtötilanne ennen veden kierrätyksen alkua

Kuvassa 37 rakenteen lämpötilat ovat tasaantuneet. Lämpötila mittaukset on aloitettu.



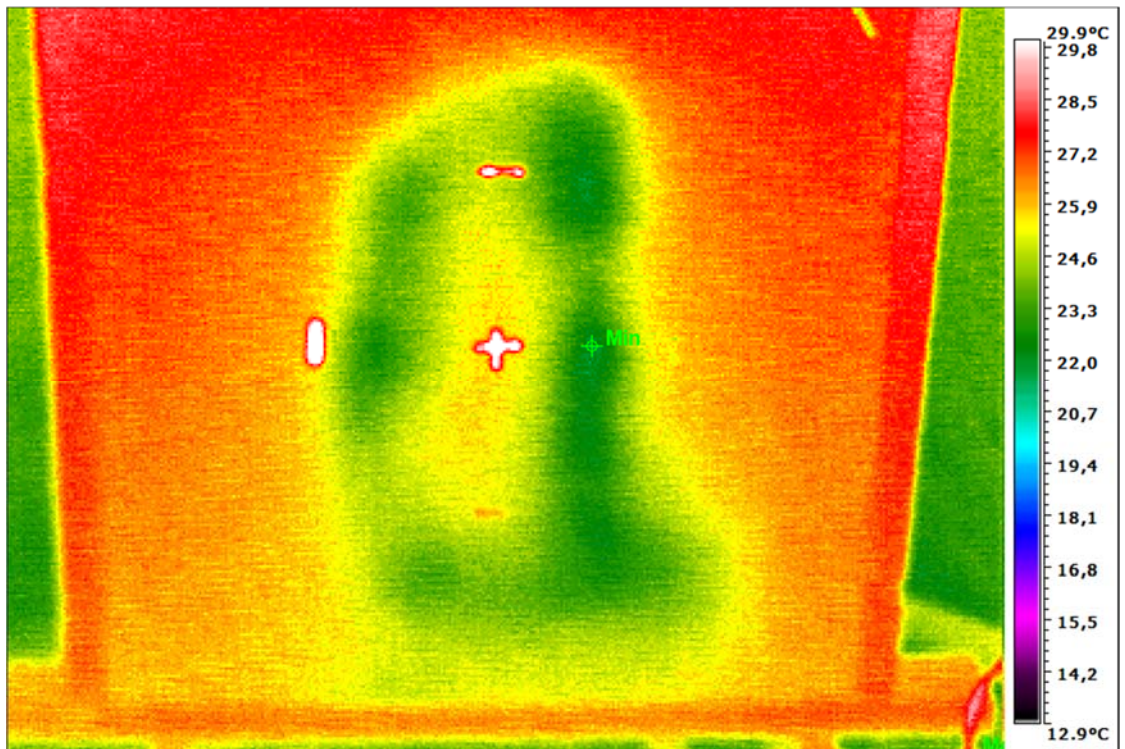
KUVA 38. Vesikiertoinen Leca EasyLex, 30 minuuttia veden kierrätyksen aloituksen jälkeen

Kuvasta 38 on havaittavissa, että lämpötila ympäristössä on noussut ja kiertävän veden jäähdysvaikutus alkaa vaikuttamaan rakenteeseen.



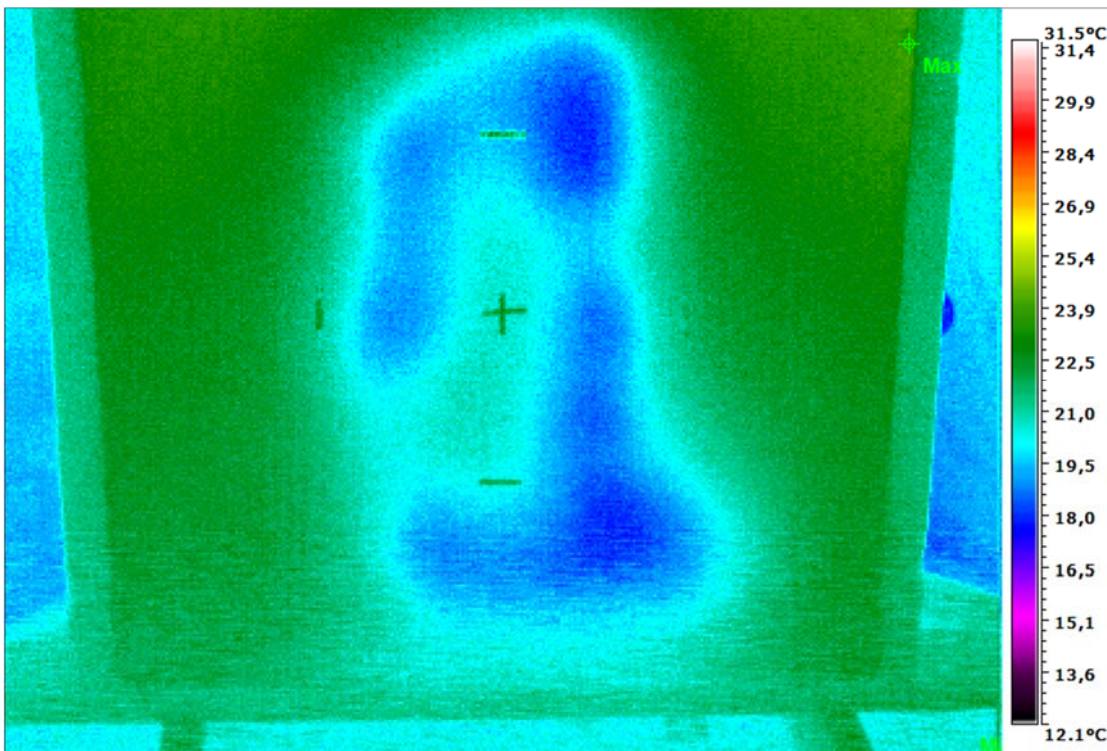
KUVA 39. Vesikiertoinen Leca EasyLex, 60 minuuttia veden kierrätyksen aloituksen jälkeen

Kuvassa 39 on havaittavissa, että jäähdytysvaikutus kasvaa rakenteessa.



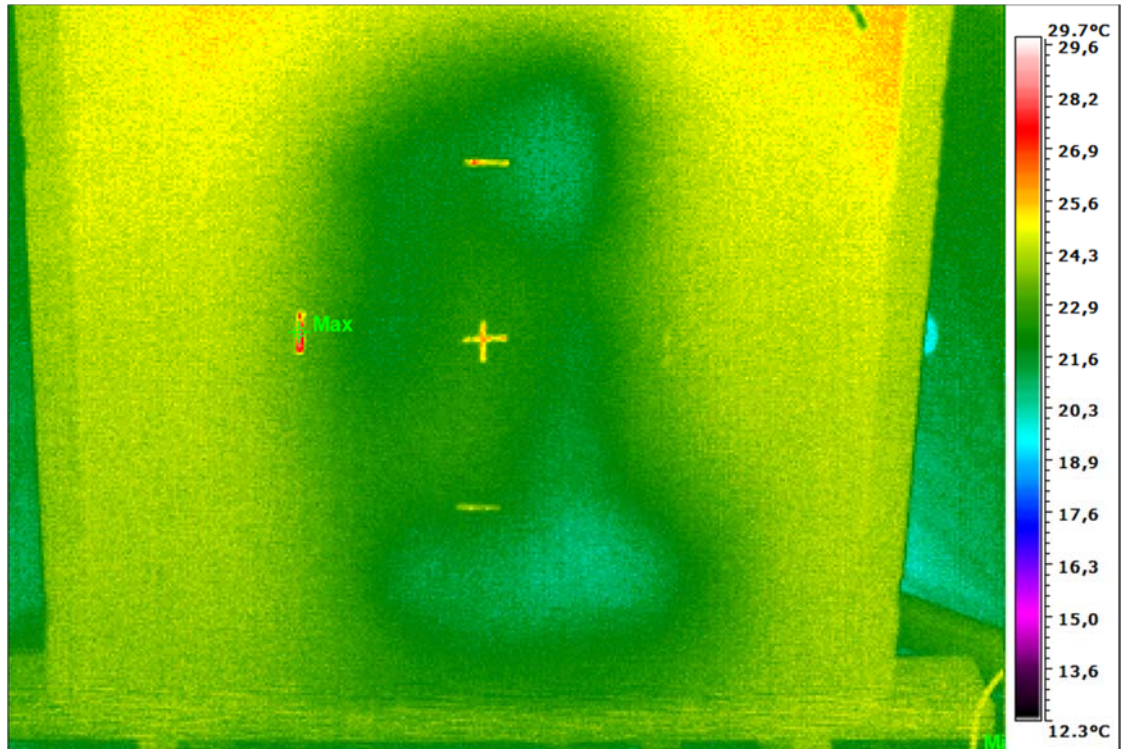
KUVA 40. Vesikiertoinen Leca EasyLex, 125 minuuttia veden kierrätyksen jälkeen

Kuvassa 40 on havaittavissa, että jäähdytysvaikutus kasvaa yhä rakenteessa.



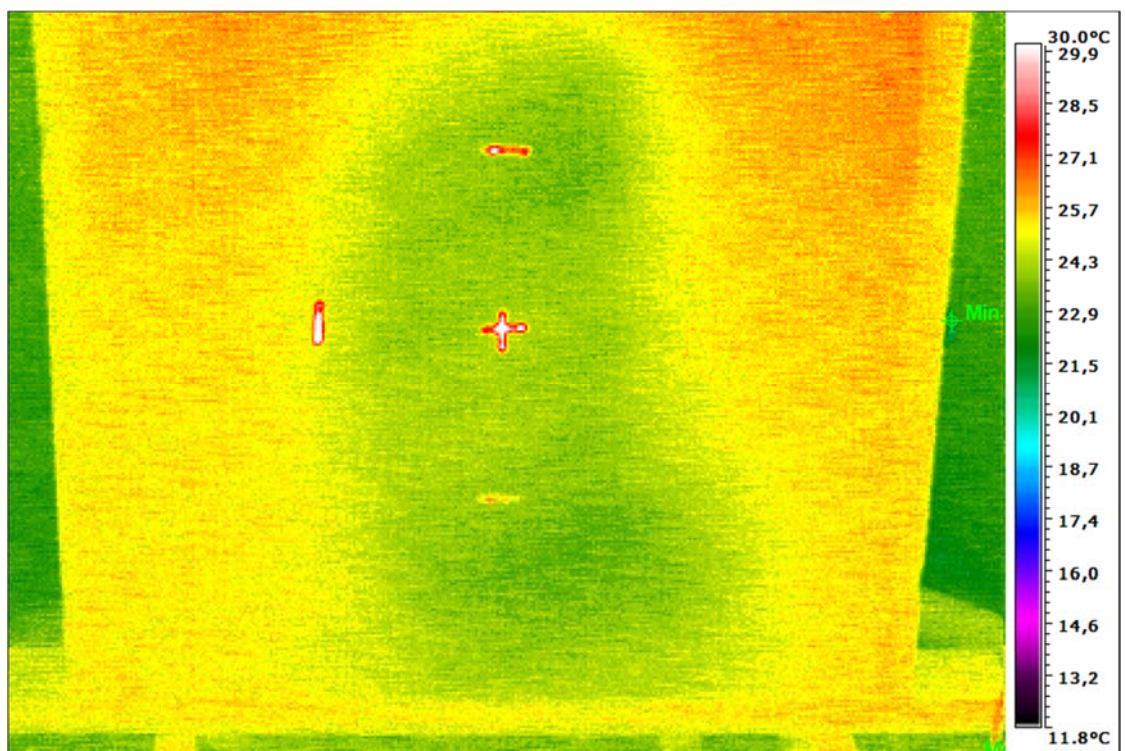
KUVA 41. Vesikiertoinen Leca EasyLex, noin 2 vuorokautta veden kierrätyksen jälkeen

Kuvassa 41 on havaittavissa, että tilanne on tasaantunut. Kiertävän veden jäähdytysvaikutus on selvästi havaittavissa kuvasta.



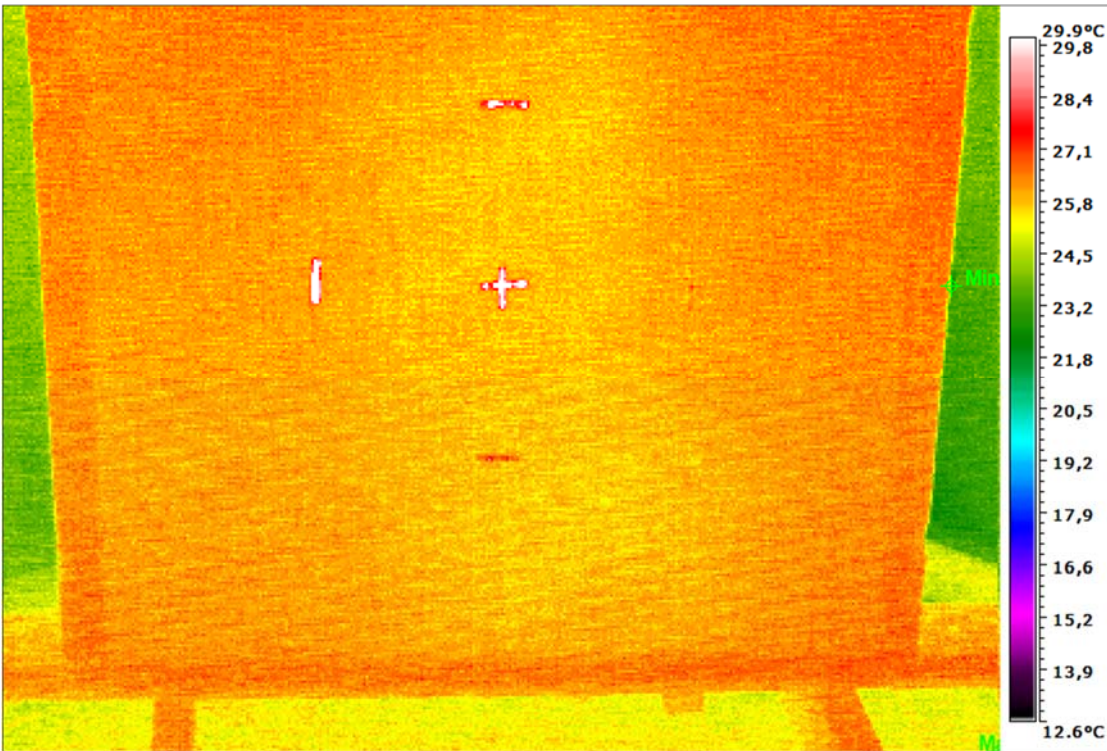
KUVA 42. Vesikiertoinen Leca EasyLex, 60 minuuttia veden jäädytyksen lopetuksesta ja lämpötilan laskusta

Kuvasta 42 on havaittavissa, että veden jäädytysvaikutus on lähes kokonaan hävinnyt rakenteesta.



KUVA 43. Vesikiertoinen Leca EasyLex, 115 minuuttia veden jäähdytyksen lopetuksesta ja lämpötilan laskusta

Kuvasta 43 on havaittavissa, että veden kierron jäähdytysvaikutus on lähes kokonaan hävinnyt.



KUVA 44. Vesikiertoinen Leca EasyLex, 3 tuntia 50 minuuttia veden jäähdytyksen lopetuksesta ja lämpötilan laskusta

Kuvasta 44 on havaittavissa, että rakenteen lämpötilat ovat tasaantuneet. Jäähdytysvaikutusta ei voida enää kuvasta havaita.

6 TUTKIMUKSEN TULOSTEN TULKINTA JA VERTAILU

Tässä luvussa tulkitaan mittaamalla tutkimuskammioista saatuja tuloksia, sekä EasIR-9-lämpökameralla otettuja lämpökamerakuvia. Lämpökamerakuvat tulkittiin ja muokattiin IRAnalyser-ohjelman avulla. Kahi-väliseinäponti rakenteesta ei saatu lämpökamerakuvia. Testit pyydettiin suorittamaan kahdesti samanlaisina peräkkäin, mutta laboratorio ehti tekemään testit vain kertaalleen.

6.1 Kahi-väliseinäponti

Väliseinäpontin mittauksista ei saatu kaikkia tuloksia mitattua lähinnä tutkimuskammiossa esiintyneiden häiriöiden vuoksi. Tutkimus on tehty välillä 7.6.2013 klo 11:20:02 - 14.6.2013 klo 9:20:02. Tältä väliltä on tarvittavat mittaukset tutkimukseen käytössä. Tutkimuskammiossa käytetty kosteutus aiheutti lämpötilojen heilahtelua. Pyydetty RH oli 65 %. RH vaihteli kuitenkin hieman yli 40 %:sta hieman alle 80 %:iin. Keskiarvo RH:lla oli 63,35 %. Mittausväli oli yksi minuutti. Kahi-väliseinäpönttirakenteet ovat ”imeeet” lämpöä suoraan lämpöpuhaltimesta puhaltavasta lämpimästä ilmasta. Varsinkin ilman vesikiertoista putkistoa oleva rakenne on ollut lämpimämpi kuin tutkimuskammiossa ollut ilman lämpötila. Lämmittimestä puhaltunut lämmin ilma on osunut suoraan Kahi-seinäarakenteisiin, ja vasta sen jälkeen ilma on sekoittunut tutkimuskammion ilmaan. Tätä ei voida todentaa, mutta näin on kuitenkin päätelty. Kuinka paljon puhaltava lämmitin on aiheuttanut kummallekin Kahi-rakenteelle ylimääräistä lämpökuormaa, ei voida varmasti arvioida. Saadut mittaustulokset on kuitenkin esitetty tässä opinnäytetyössä ja niistä voidaan varmasti saada apua seuraaviin tutkimuksiin.

Lähtötilanteena tässä tutkimuksessa voidaan pitää 7.6.2013 klo 11:20:02 tapahtunutta mittausta, jossa vesikierto on ollut päällä jo aikaisemmin vesikiertoisessa Kahi-väliseinäarakenteessa. Tällöin tutkimuskammion ilman lämpötila oli 24,66 °C, Kahi-väliseinäpönttiseinän lämpötila oli 26,22 °C ja vesikiertoisen Kahi-väliseinäpontin lämpötila oli 20,14 °C. Kahi-seinäarakenteeseen menevä vesi oli 2,56 °C, ja sieltä palaava vesi oli 3,53 °C. Vesi oli lämminnyt kiertonsa aikana 0,97 °C. Tämä noin yhden asteen lämmönero toistui koko tutkimuksen ajan silloin, kun veden kierto oli päällä. Veden mitattu kiertonopeus oli 2,93 l/min eli 0,04883 kg/s. Rakenteessa olevan diffuusiosuojatun putken halkaisija oli 16 mm. Putkea oli tämän rakenteen sisällä noin 1,80 metriä. Taulukossa 4 on minimi veden virtausnopeudeksi 15 mm:n putkelle ilmoitettu 0,024 kg/s ja 18 mm putkelle 0,030 kg/s. Tutkittavassa rakenteessa veden virtaus oli kuitenkin

0,04883 kg/s. Kuvion 7 mukaan veden virtaus q_m , ei lisää tehokkaasti lämmön siirtymistä P_L , kun tehokkuuden raja saavutetaan virtauksessa. Tässä tutkimuksessa veden virtausta termohauteesta ei ole saatu säädettyä, vaan virtausnopeudeksi määrittyi termohauteen luonnollisesti tuottama virtaus. Veden jäähdytysvaikutus on siis varmasti suurempi kun veden virtausnopeutta voidaan säädellä. Tämä virtausnopeuden muuntaminen on helppo toteuttaa oikeissa kohteissa käytettävien kiertovesipumpujen avulla.

Kuvioista 8 – 14 on tulkittavissa, että vesikierto Kahi-seinä rakenteessa on alentanut seinän lämpötilaa ja että seinän lämpötila seuraa kiertävän veden lämpötilaa erittäin tarkasti. Näiden kahden lämpötilan väliltä on löydettävissä yhteys, kuinka paljon voimme hyödyntää vesikiertoista Kahi-rakennetta jäähdytyksessä. Kuvioista 8 -14 on havaittavissa, että vesikiertoinen Kahi jäähtyy noin 5 °C, kun sitä verrataan tutkimuskammion lämpötilaan. Veden lämpötila on noin 3 °C. Vastaavissa olosuhteissa oleva Kahi-väliseinäponti ilman vesikiertoa, on koko tutkimuksen ajan vähintään 5 °C lämpimämpi kuin vesikiertoinen vastaava rakenne. Kuviossa 14 tapahtuva kiertävän veden lämmön nousu, tunnin numero 10 kohdalla, ei saa lämpötilaa nousemaan samassa suhteessa Kahi kohdalla. Kiertävän veden lämmön nousu tuntien 10 – 14 välillä on 18,68 °C, mutta vesiputkiston sisältävän Kahi-väliseinäpontin lämpötilan nousu on vain 2,55 °C. Tutkimuskammion lämpötila oli tuolloin noin 20 °C. Vesikiertoinen Kahi-rakenne oli siis myös lämmennyt noin asteen lämpimämmäksi kuin tutkimuskammion ilman lämpötila. Tämä kuvastaa sitä, että kun Kahi-väliseinä rakennetta jäähdytetään, niin rakenne ei reagoi nopeasti, vaan pystyy tasaamaan lämpöhuippuja rakenteeseen varatun energian avulla. Tässäkin siis puhaltava lämmitin on sotkenut tutkimustuloksia ja niiden luotettavuutta.

Voidaan kuitenkin todeta, että vesikiertoisella Kahi-väliseinäponttirakenteella on tutkimuksen perusteella jäähdytysvaikutusta. Tutkimuksen puutteellisuuden ja virhe arvioiden takia tätä rakennetta ei arvioida tarkemmin. Laskennalliset tarkastelut suoritetaan myös tälle rakenteelle muissa luvuissa, yhdessä muiden rakenteiden kanssa. Tutkimuksessa on huomioitu myös, että jäähdytysputkisto ei tällaisen lyhyen tutkintajakson aikana aiheuttanut rakenteen pinnoille mitään visuaalisesti huomattavia vaurioita. Rakenteessa sisällä oleva diffuusiosuojattu putki on siis "välittänyt" jäähdytystä rakenteeseen, mutta ei siis aiheuta vaurioita rakenteelle.

6.2 Kahi-runkopontti

Veden mitattu kiertonopeus rakenteessa oli 2,93 l/min eli 0,04883 kg/s ja rakenteessa olevan diffuusiosuojatun putken halkaisija oli 16 mm. Putkea oli tämän rakenteen sisällä 1,82 metriä. Taulukossa 4 on minimi veden virtausnopeudeksi 15 mm:n putkelle ilmoitettu 0,024 kg/s ja 18 mm putkelle 0,030 kg/s. Tutkittavassa rakenteessa veden virtaus oli kuitenkin 0,04883 kg/s. Kuvion 7 mukaan veden virtaus q_m , ei lisää tehokkaasti lämmön siirtymistä P_L , kun tehokkuuden raja saavutetaan virtauksessa. Tässä tutkitussa tapauksessa veden virtausta termohauteesta ei ole saatu säädettyä, vaan virtausnopeudeksi määrittyi termohauteen luonnollisesti tuottama virtaus. Veden jäähdytys vaikutus on siis varmasti suurempi kun veden virtausnopeutta voidaan säädellä. Tämä virtausnopeuden muuntaminen on helppo toteuttaa oikeissa kohteissa käytettävien kiertovesipumppujen avulla. Kun rakenne purettiin, huomattiin, että Kahin roiloihin valettu betoni ei ollut tasaisesti putken ympärillä. Betonia puuttui kahdesta kohdasta noin 3 cm:n matkalta, edestäpäin katsottuna vasemmalla puolella olevasta putken ympärystä. Tämä on havaittavissa myös lämpökamerakuvassa 33.

Voidaan kuitenkin todeta että, vesikiertoisella Kahi- runkopontti rakenteella on tutkimuksen perusteella jäähdytysvaikutusta. Vastaavissa olosuhteissa oleva Kahi-runkopontti ilman vesikiertoa on koko tutkimuksen ajan vähintään 5 °C lämpimämpi kuin vesikiertoinen vastaava rakenne. Laskennalliset tarkastelut suoritetaan myös tälle rakenteelle muissa luvuissa yhdessä muiden rakenteiden kanssa. Tutkimuksessa on huomioitu myös että jäähdytysputkisto ei tällaisen lyhyen tutkintajakson aikana aiheuttanut rakenteen pinnoille mitään visuaalisesti huomattavia vaurioita. Rakenteessa sisällä oleva diffuusiosuojattu putki on siis ”välittänyt” jäähdytystä rakenteeseen, mutta ei siis aiheuta vaurioita rakenteelle.

Kahi-runkopontti lämpökamerakuvista voi huomata jäähdyttävän veden vaikutuksen. Lämpökamerakuvien katseluun tarkoitellulla ohjelmalla on mahdollista tarkastella kuvia tarkemmin. Tähän opinnäytetyöhön mukaan otettuja kuvia voidaan kuitenkin vain tarkastella värierojen perusteella. Ohjelmalla näkee pistemäisesti jokaisen kohdan lämpötilan ja havaitut asiat ovat helpommin tulkittavissa ohjelman avulla. Opinnäytetyöhön on liitetty vain muutamia lämpökamerakuvia niistä havaittujen asioiden tueksi. Kaikki alkuperäiset kuvat on toimitettu opinnäytetyön toimeksiantajalle. Tutkittaviin rakenteisiin on liimattu pienet heijastavan teipin palat osoittamaan, miten kiertävä vesi vaikuttaa rakenteeseen. Ristimäinen teippaus on rakenteen keskellä. Ristimäisen teippauksen ympärillä olevat teipit ovat 200 mm:n päässä ristin keskipisteestä. Huomattavaa

on että vesiputken virtausta ei voitu säätää ja vesijohtoa on vain 1,82 m:ä rakenteen sisällä.

Tässä kappaleessa on tarkoitus kuvata lämpökamerakuvien perusteella tarkemmin, mitä tutkittavassa Kahi-runkoponttirakenteissa on tapahtunut. Kuvassa 32 näkyy, mitä rakenteessa on tapahtunut 60 minuuttia jäähdytetyn veden kierrätyksen aloituksen jälkeen. Tutkimus teltan lämpötila oli tällöin 26,44 °C. Vaaleansininen osa lämpökamerakuvassa 32 on 19,3 -20,5 °C. Tumman vihreä osa on 21,3 -21,8 °C. Keltainen alue, johon on sekoittunut hieman vihreää on lämpötilaltaan 23,3 -24,8 °C. Nämä lämpötilat ovat havaittavissa myös kuvan vieressä olevasta pystydiagrammista. Lämpökuvasta voidaan todeta, että 60 minuutin kohdalla jäähdytyksen aloittamisesta, rakenteen pinta ei vielä tasaisesti jäähtynyt. Rakenteessa kiertävä vesi ja sen vaikutus on kuitenkin huomattavissa. Samoin voidaan huomata puuttuva betonivalu vasemmalla. Vesijohdon jäähdytysvaikutus ei ole siirtynyt Kahi-rakenteeseen, koska välittäjä aineena toimiva betoni puuttuu osittain. Kuvassa 33 rakenteessa on kiertänyt jäähdytetty vesi noin kaksi vuorokautta. Jäähtynyt vaaleansininen alue on levinnyt huomattavasti verrattuna kuvan 32 tilanteeseen. Vaaleansinisellä alueella lämpötilat ovat 19,1 – 20,7 °C. Punaisella alueella lämpötilat ovat välillä 26,6 – 28,1 °C. Aloitusvaiheessa vesikiertoisesta Kahi-rakenteesta otettiin lämpökamerakuvat kymmenen minuutin välein, 60 minuuttiin asti. Tämän jälkeen seuraava kuva on otettu noin kahden vuorokauden kuluttua. Ote-
tuista lämpökamerakuvista ei voida päätellä varmasti, kuinka nopeasti maksimi teho jäähdytyksessä voidaan saavuttaa. Huomioitavissa on kuitenkin se, että viileämpi alue leviää rakenteessa. Kahi-runkopontissa olevat reiät toimivat varmasti osittain eristeenä ja estävät tehokkaamman leviämisen. Kahi-runkopontissa olevat reiät, mihin asennettiin vesiputki, valettiin betonilla umpeen. Viereisiä pystyreikiä ei kuitenkaan täytetty, vaan ne ovat ”ilmaa” täynnä ja toimivat näin ollen eristeenä estäen jäähdytetyn alueen leviämistä. Tämäkin huomio tukee sitä, että vaakaputkiston asentaminen Kahi-runkoponttipalkkiharkkoon ja sen valaminen betonilla umpeen saattaisi parantaa jäähdytyksen leviämistä rakenteessa. Aikaisemmin todettiin, että tämä on varmasti myös asennusteknisesti helpompi tapa asentaa jäähdytysputkisto. On syytä huomioida myös, että rakenne ei jäähdy kokonaisuudessaan tasaisesti vaan rakenteen reunoille jää huomattavasti lämpimämpiä alueita. Syytä ovat varmasti ainakin virtausnopeus vedessä, pieni putkimäärä rakenteen sisällä ja pystyreikien eristysvaikutus. Näihin kaikkiin asioihin on syytä kiinnittää huomiota tulevilla lisätutkimuksissa.

Kuvassa 34 on esitetty Kahi-runkoponttirakenne 60 minuuttia veden jäähtymisen lopettamisen ja lämmönlaskun jälkeen. Kuvasta on huomattavissa, että rakenteen lämpötilat ovat alkaneet tasaantua. Vihreä alue keskellä on noin 23 °C. Punainen alue on noin 27 °C. Tutkimus teltan lämpötila oli tuolloin 21,77 °C. Rakenteeseen jäänyt lämpö yhdessä tutkimus teltan lämmön kanssa, on lämmittänyt rakennetta ja saanut sen lämpimämmäksi kuin teltan lämpötila. Kuvassa 35 on havaittavissa, että rakenne on tasaantunut lähes tasalämpöiseksi alueeksi.

Vesikiertoisesta Kahi-runkoponttirakenteesta voidaan todeta, että kun rakenteen lämpötiloja verrataan tutkimusteltan lämpötiloihin, niin rakenne seuraa niitä viiveellä. Huomioitavaa on myös se, että kiertävän vedenvaikutus on havaittavissa selkeästi. Kiertävä vesi jäähtyy rakennetta noin 5 °C verrattuna tutkimus teltan lämpötiloihin. Jäähdytysvaikutus ylittää kuitenkin tutkitussa rakenteessa vain noin 100 mm:n päähän vesijohtosta. Asennettujen vesijohtojen väli on vaakasuunnassa noin 150 mm, ja tämä vesijohtojen väli on kuitenkin jäähtynyt. Vesijohtojen välissä on kiinteä ainetta, joka mahdollistaa jäähtymisen leviämisen. Lisäksi molemmista suunnista jäähtyttävälle vesijohtoilta tulee ”jäähdytysmatkaa” vain noin 75 mm.

6.3 Leca EasyLex

Leca EasyLex-rakenteella on myös jäähdytysvaikutusta. Noin viisiasteisella vesikiertolla rakenne jäähtyi noin kuusi astetta tutkimusteltan lämpötilaa matalammaksi. Tutkimusteltan lämpötilaa nostettiin noin viisi astetta, mutta kiertävä vesi pysyi hieman yli 20-asteisena. Tällöin Leca EasyLex-rakenne säilytti lämpötilansa, joka oli sama kuin veden lämpötila. Kun kiertävää vettä aloitettiin jäähtyttää, Leca EasyLex rakenne jäähtyi. Leca EasyLexin rakenne pysyi yli viisi astetta matalampana kuin tutkimusteltan lämpötila. Samaan aikaan ilman vesikiertoa oleva rakenne oli kolme astetta korkeampi kuin vesikiertoinen Leca EasyLex-rakenne ja noin kolme astetta matalampi kuin tutkimusteltan lämpötila.

Kaavioissa 26, 30 ja 31 on havaittavissa, että kun veden jäähdytys poistetaan, Leca EasyLex-rakenteen lämpötila nousee noin viisi astetta. Leca EasyLexin lämpötilakäyrä noudattelee palaavan veden lämpötilakäyrää. Leca EasyLex ja palaava vesi alkavat lähentyä tutkimusteltan lämpötilaa, joka on noin kaksi astetta matalampi kuin vesikiertoisen Leca EasyLex-rakenteen ja palaavan veden lämpötila. Ilman vesikiertoa oleva Leca EasyLex-rakenne on lämmennyt noin yhden asteen verran lämpimämmäksi kuin tutkimusteltan lämpötila. Ilman vesikiertoa oleva Leca EasyLex aloittaa jäähtymisen

tutkimusteltan lämpötilan mukaisesti. Noin kymmenessä tunnissa ilman vesikiertoa oleva Leca EasyLex-rakenne tasaantuu tutkimuskammion lämpötilan kanssa. Vesikiertoisessa Leca EasyLex rakenteessa tasaantuminen vie saman ajan, mutta lämpötila jää noin yhden asteen verran lämpimämmäksi kuin tutkimusteltan lämpötila. Syynä tähän voidaan pitää kiertävää vettä, jonka paluu lämpötila on hieman vesikiertoista Leca EasyLex-rakennetta lämpimämpi. Veden mitattu kiertonopeus oli 2,93 l/min eli 0,04883 kg/s ja rakenteessa olevan diffuusiosuojatun putken halkaisija oli 16 mm. Putkea oli tämän rakenteen sisällä 1,78 metriä. Taulukossa 4 on minimivirtausnopeudeksi 15 mm:n putkelle ilmoitettu 0,024 kg/s ja 18 mm putkelle 0,030 kg/s. Tutkittavassa rakenteessa veden virtaus oli kuitenkin 0,04883 kg/s. Kuvion 7 mukaan veden virtaus q_m , ei lisää tehokkaasti lämmön siirtymistä P_L , kun tehokkuuden raja saavutetaan virtauksessa. Tässä tutkitussa tapauksessa veden virtausta termohauteesta ei ole saatu suuremmaksi. Veden jäähdytysvaikutus on siis varmasti suurempi kun veden virtausnopeutta voidaan säädellä. Tämä virtausnopeuden nosto on helppo toteuttaa oikeissa kohteissa käytettävien kiertovesipumppujen avulla.

Voidaan todeta että, vesikiertoisella Leca EasyLex-rakenteella on tutkimuksen perusteella jäähdytysvaikutusta. Vastaavissa olosuhteissa oleva Leca EasyLex ilman vesikiertoa, on koko tutkimuksen ajan vähintään 5 °C lämpimämpi kuin vesikiertoinen vastaava rakenne. Laskennalliset tarkastelut suoritetaan myös tälle rakenteelle muissa luvuissa yhdessä muiden rakenteiden kanssa. Tutkimuksessa on huomioitu myös, että jäähdytysputkisto ei tällaisen lyhyen tutkintajakson aikana aiheuttanut rakenteen pinnoille mitään visuaalisesti huomattavia vaurioita. Rakenteessa sisällä oleva diffuusiosuojattu putki on siis ”välittänyt” jäähdytystä rakenteeseen, mutta ei siis aiheuta vaurioita rakenteelle.

Leca EasyLex-lämpökamerakuvista voi huomata jäähdyttävän vedenvaikutuksen. Lämpökamerakuvien katseluun tarkoitellulla ohjelmalla on mahdollista tarkastella kuvia tarkemmin. Tähän opinnäytetyöhön mukaan otettuja kuvia voidaan kuitenkin vain tarkastella värierojen perusteella. Ohjelmalla näkee pistemäisesti jokaisen kohdan lämpötilan, ja havaitut asiat ovat helpommin tulkittavissa ohjelman avulla. Opinnäytetyöhön on liitetty vain muutamia lämpökamerakuvia niistä havaittujen asioiden tueksi. Kaikki alkuperäiset kuvat on toimitettu opinnäytetyön toimeksiantajalle. Tutkittaviin rakenteisiin on liimattu pienet heijastavan teipin palat osoittamaan, miten kiertävä vesi vaikuttaa rakenteeseen. Ristimäinen teippaus on rakenteen keskellä. Ristimäisen teippauksen ympärillä olevat teipit 200 mm:n päässä ristin keskipisteestä. Huomattavaa on että, vesijohtoa on vain 1,78 m rakenteen sisällä.

Tässä seuraavassa tekstissä on tarkoitus kuvata lämpökamerakuvien perusteella, mitä tutkittavassa Leca EasyLex-rakenteissa on tapahtunut. 60 minuuttia jäähtyksen aloituksen jälkeen tutkimus teltan lämpötila oli 26,26 °C. Vesikierron vaikutus on huomattavissa kuvissa 38 ja 39. Myös Leca EasyLex-rakenteessa oli kolme eri kohtaa, joissa roiloihin valettu betoni ei ollut täyttänyt koko roiloa. Ylhäällä putken alapuolella oli ilmaa rakenteen ja vesijohdon välissä. Betoni puuttui kokonaan noin 4 cm:n matkalla myös vasemmalla alhaalla ja oikealla ylhäällä. Nämä puutteet on havaittavissa kuvissa 38 ja 39. Kuvassa 41 on havaittavissa, kuinka jäähtyminen on levinnyt. Leca EasyLex-rakenteessa jäähtymisen leviäminen on noin 80 mm vesijohdosta. Jäähtyminen tulee myös helpommin rakenteen pintaan kuin Kahi-runkoponttirakenteessa. Jos verrataan kuvia 41 ja 33, huomataan, että Leca EasyLex-rakenteessa jäähtymisvaikutus näkyy pinnassa paremmin kuin vastaavana ajankohtana kuvatussa Kahi-runkoponttirakenteessa. Kahi-runkopontti on 130 mm paksu ja Leca EasyLex 88 mm. Lisäksi Kahi-runkopontti on noin puolet tiheämpää kuin Leca EasyLex. Nämä rakenteelliset erot selittävät lämpötilaerot.

Kuvassa 42 on esitetty Leca EasyLex-rakenne 60 minuuttia veden jäähtymisen lopettamisen ja lämmönlaskun jälkeen. Kuvasta on huomattavissa, että rakenteen lämpötilat ovat alkaneet tasaantua. Vihreä alue keskellä on noin 23 °C. Tutkimus teltan lämpötila oli tuolloin 21,92 °C. Rakenteeseen jäänyt lämpö yhdessä tutkimus teltan lämmön kanssa on lämmittänyt rakennetta ja saanut sen lämpimämmäksi kuin teltan lämpötila. Tämä sama asia oli havaittavissa myös Kahi-runkopontissa tapahtuneessa rakenteen lämpiämisessä. Kuvassa 44 on havaittavissa, että rakenne on tasaantunut lähes tasalämpöiseksi alueeksi. Kuvassa 44 aikaa oli kulunut 3 tuntia 50 minuuttia veden jäähtymisen lopetuksesta ja lämpötilan laskusta.

6.4 Laskennalliset tarkastelut rakenteille

Tässä luvussa tarkastellaan tutkittavia rakenteita laskemalla. Arvoina käytetään tutkimuksesta saatuja tuloksia sekä eri aineille yleisesti tunnettuja arvoja.

Tutkittavien seinärakenteiden jäähtymisessä kyseessä on suljettu systeemi. Suljettu systeemi voi vaihtaa energiaa, mutta ei ainetta ympäristönsä kanssa. Tutkittavaa kohdetta sanotaan yleensä systeemiksi ja tarkastelun ulkopuolelle jäävää osaa ympäristöksi. Lämpöopin II pääsäännön mukaan lämpö siirtyy itsestään lämpimämmästä kap-

paleesta kylmempään. Jos lämpöä siirretään kylmemmästä kappaleesta kuumempaan, täytyy tehdä työtä. Tässä tutkimuksessa tehty työ oli veden kierrätystä rakenteen sisällä vesijohdoissa.

Ensimmäiseksi tarkasteltiin laskemalla kuinka paljon 1 m² eri rakenteissa voi luovuttaa energiaa jos lämpötila muuttuu viisi astetta. Tällä haluttiin tarkastella lähinnä maksimi arvoa, mitä eri rakenteista olisi mahdollista hyödyntää jäähdytykseen tai lämmitykseen.

Rakenteiden luovuttama energia, laskenta kaavalla 1.

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad \text{KAAVA 1}$$

Q = lämpöenergia

c = ominaislämpökapasiteetti Kahille ja Lecalle [1000 J/kg K]

m = Kahi väliseinäponti massa 112 kg/m², Kahi runkoponti massa 205 kg/m², Leca EasyLex massa 73,3 kg/m²

ΔT = lämpötilan muutos [5 °C]

Muunnos jouleista wateiksi tehtiin kaavalla 2

$$p = W/T \quad \text{KAAVA 2}$$

Kahi väliseinäpontin luovuttama energia 1 m²:n alueelta, jos lämpötila muuttuu 5 °C:tta.

$$\Delta Q = 0,56 \text{ MJ}$$

$$p = 311 \text{ W}$$

Kahi runkopontin luovuttama energia 1 m²:n alueelta, jos lämpötila muuttuu 5 °C:tta.

$$\Delta Q = 1,025 \text{ MJ}$$

$$p = 569 \text{ W}$$

Leca EasyLexin luovuttama energia 1 m²:n alueelta, jos lämpötila muuttuu 5 °C:tta.

$$\Delta Q = 0,3665 \text{ MJ}$$

$$p = 204 \text{ W}$$

Seuraavaksi tarkasteltiin laskennallista kylmätehoa. Veden meno- ja paluulämpötilan ero oli kaikissa tapauksissa noin 1 °C, ja myös virtausnopeus on kaikissa tapauksissa sama.

Systeemin jäähdystystehon laskenta kaavalla 3.

$$\Phi = qv \cdot C_{pv} \cdot \rho_v \cdot \Delta T \quad \text{KAAVA 3}$$

Φ = kylmäteho [kW]

qv = virtaama [m^3/s]

C_{pv} = veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/kg °C]

ρ_v = veden tiheys [kg/m^3]

ΔT = meno- ja paluuv veden välinen lämpötilaero [°C]

Jäähdystystehon laskemiseen käytin seuraavia arvoja:

$qv = 2,93 \text{ l/min} = 0,04883 \text{ l/s} = 0,00004883 \text{ m}^3/s$

$C_{pv} = 4,19 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

$\rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$

$\Delta T = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$

$\Phi = 0,2046 \text{ kW}$

Näillä arvoilla sain siis kylmätehoksi (Φ) 0,2046 kW = 204,6 W. Tämä on siis tällä mitatulla virtauksella maksimiarvo, joka voidaan saavuttaa yhden asteen lämpötilaerolla. Virtausta muuttamalla on siis mahdollista saada myös toisenlaisia kylmätehoja järjestelmällä. Lähdekirjallisuus antoi virtauksen minimi arvoksi 15 mm:n putkelle 0,024 kg/s. Jos suoritetaan samalla kaavalla 3 laskenta tälle virtaukselle, saadaan kylmätehoksi 100,6 W. Puolet pienempi virtaus siis pienentää jäähdystystehoa myös puolella. Kaaviossa 7 on kuitenkin laskettu rajoja, joiden jälkeen virtauksen nosto ei enää oleellisesti paranna jäähdystystehoa. Kaavion 7 mukaan tehokkuuden raja esimerkiksi 80 %:n hyötysuhteelle saavutetaan virtaamalla 0,04 kg/s. Tämän jälkeen kaaviossa olevan käyrän nousukulma loivenee huomattavasti, eikä hyötysuhde kasva enää niin nopeasti kuin alle 0,04 kg/s virtauksilla.

Seuraavassa on laskettu vesijohdon aiheuttama lämpöhäviö Φ/l . Tarkastellaan myös, kuinka paljon yksi metri vesijohtoa voisi siirtää kylmää rakenteeseen. Lambda arvona on käytetty vain Kahin arvoa 0,75 W/mK tai Lecan arvoa 0,30 W/mK. Betonin osuus roilossa on huomioitu Lecana tai Kahina. Betonin huomioiminen parantaisi hieman saatuja arvoja, mutta tällä laskenta tavalla ei anneta liian hyvää tulosta lämpöhäviöstä. Kaikissa rakenteissa lämpötila ero veden ja rakenteen välillä oli noin 14 °C. Tätä arvoa on käytetty seuraavissa laskuissa. Kaava kertoo kohtisuoraan pintaan kohti suuntautuvan lämpövirran määrän.

Lämpöhäviö putkesta rakenteeseen

$$\Phi/l = \lambda * (2 * \pi * \Delta T) / (\ln(R_1/R_2))$$

KAAVA 4

λ = Lambda arvo eristeenä toimivalle kerrokselle

π = Pii (3,14)

ΔT = Vesijohdon ja pinnanlämpötilan erotus (14 °C)

R_1 = Vesijohdon säde (8 mm)

R_2 = Eristeenä toimivan kerroksen säde (Kahi-väliseinäponti 34,5 mm, Kahi-runkoponti 57 mm, Leca EasyLex 36 mm)

Tuloksiksi sain lämpöhäviölle seuraavat arvot

Kahi-väliseinäponti

$$\Phi/l = 45,14 \text{ W/m}$$

Kahi-runkoponti

$$\Phi/l = 33,60 \text{ W/m}$$

Leca EasyLex

$$\Phi/l = 17,54 \text{ W/m}$$

Saadut arvot kertovat kuinka paljon suoraan pintaa kohti siirtyy putken lämpöhäviönä jäähtytystä yhdestä metrillä putkea. Laskenta perustui siis tutkimuskammioista saattuihin mittaustuloksiin.

Seuraava kaava on REHVA ohjekirjasta, ja se kertoo meille laskennallisesti kuinka mitaamalla rakenteen pinnan ja huoneen lämpötilat, voidaan laskea siitä saavutettava jäähtytymisen määrä. Lämmön siirtymisestä tilaan on määriteltävissä luonteenomainen käyrästä, jonka perusteella voidaan määrittää kertoimet laskutoimituksiin. Kertoimeen vaikuttaa onko tilan lämpötila korkeampi kuin seinä, jolloin kyseessä on jäähtytys, vai onko tilan lämpötila matalampi kuin seinä, jolloin kyseessä on lämmitys. Tutkituilla seinärakenteilla tämä on kummassakin tapauksessa sama eli niissä käytetään kertoimena arvoa 8. Erot kertoimessa tulevat lattia- ja kattorakenteissa. (Babiak ym. 2013, 22 - 24.)

Nyt pintalämpötilojen mittaukset on suoritettu rakenteiden sisältä puolesta välistä. Rakenteen varmasti tasaantuisi saman lämpöiseksi kuin sisällä vallitseva lämpötila. Näin ei kuitenkaan ole täysin tapahtunut laskentaan mukaan otetuilla arvoilla. Pinnan lämpötila-

lan keskiarvo on siis otettu vain mittaavista antureista. Tutkimuskammioiden lämpötilojen mittausta pitää paikkansa. Suuremmilla tutkimuskappaleilla ja suuremmalla putkimäärällä nämä käytetyt arvot todennäköisesti pitäisivät paremmin paikkansa. Seinän lämmityksen ja jäähdytyksen laskentaan käytetään kaavaa 5. (Babiak ym. 2013, 22 - 24.)

$$q = 8(\theta_i - \theta_{s,m})$$

KAAVA 5

q = lämmitys-/jäähdytysteho [W/m^2]

θ_i = operatiivinen sisälämpötila

$\theta_{s,m}$ = pinnan lämpötilan keskiarvo

8 = kerroin seinälämmitykselle tai jäähdytykselle seinässä

Tutkimuskammiosta ja tutkimusteltassa on tähän kaavaan laskettu valmiiksi mittausjaksolta aritmeettiset keskiarvot, θ_i operatiivisesta lämpötilasta ja $\theta_{s,m}$ pinnan lämpötilan keskiarvosta.

Kahi-väliseinäpöntti rakenteessa käytettiin laskennalliseen tarkasteluun ajanjaksoa 7.7.2013 klo 11.20 – 10.7.2013 klo 0.20. Tutkijan mielestä tilanne oli tällöin tasaantunut, ja saatuja tuloksia voitiin käyttää kaavan 5 arvoihin niin, että ne kuvastavat Kahi-väliseinäpönttirakenteen jäähdytysvaikutusta. Aritmeettiseen keskiarvoon laskettiin 122 mittaustulosta. Nämä 122 mittaustulosta oli jo valmiiksi laskettuja aritmeettisiä keskiarvoja, joissa oli muutettu minuutin välein tapahtunut mittausta kymmenen minuutin aritmeettiseksi keskiarvoksi. Saadut arvot olivat Kahi-väliseinäpöntti rakenteessa: $\theta_i = 24,88 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $\theta_{s,m} = 19,84 \text{ }^\circ\text{C}$. Tällä ajanjaksolla menevän veden keskilämpötila oli $2,73 \text{ }^\circ\text{C}$ ja palaavan veden keskilämpötila oli $3,49 \text{ }^\circ\text{C}$. Veden lämpötila eroksi muodostuu tällöin $0,76 \text{ }^\circ\text{C}$.

Laskenta suoritettiin kaavan 5 avulla.

$$q = 40,32 \text{ W/m}^2$$

Kahi-väliseinäpöntti rakenne on siis siirtynyt jäähdytysenergiaa tutkimuskammioon $40,32 \text{ W/m}^2$. Putkea rakenteessa on ollut noin 1,8 m (ei mitattu). Rakenteen koko oli 895 x 895 mm.

Kahi-runkoponttirakenteessa käytettiin laskennalliseen tarkasteluun ajanjaksoa 15.2.2014 klo 19.00 – 17.2.2014 klo 12.00. Tutkijan mielestä tilanne oli tällöin tasaantunut, ja saatuja tuloksia voitiin käyttää kaavan 5 arvoihin niin, että ne kuvastavat Kahi-runkoponttirakenteen jäähdytysvaikutusta. Aritmeettiseen keskiarvoon laskettiin 41 mittaustulosta. Mittaustulokset olivat taas aiemmin mitattujen arvojen aritmeettisiä keskiarvoja. Kaikki laskennalliseen tarkasteluun käytetyt arvot muodostuivat kuudesta aritmeettisestä keskiarvosta. Mittausväli oli kymmenen minuuttia, joka oli muodostettu yhden tunnin aritmeettiseksi keskiarvoksi. Saadut arvot olivat Kahi-runkoponttirakenteessa: $\theta_i = 27,30 \text{ °C}$ ja $\theta_{s,m} = 20,73 \text{ °C}$. Tällä ajanjaksolla menevän veden keskilämpötila oli $5,79 \text{ °C}$, ja palaavan veden keskilämpötila oli $6,90 \text{ °C}$. Veden lämpötilaeroksi muodostuu tällöin $1,11 \text{ °C}$.

Laskenta suoritettiin kaavan 5 avulla

$$q = 52,56 \text{ W/m}^2$$

Kahi-runkoponttirakenne on siis siirtynyt jäähdytysenergiaa tutkimuskammioon $52,56 \text{ W/m}^2$. Putkea rakenteessa on ollut noin $1,82 \text{ m}$ (mitattu). Rakenteen koko oli $895 \times 895 \text{ mm}$.

Kahi-runkoponttirakenteesta saadut tulokset kiinnostavat eniten opinnäytetyön toimeksiantajaa, joten tehdään joitakin oletuksia ja lasketaan kaavan 5 avulla yksi esimerkitapaus. Oletetaan että väliseinä rakennetaan Kahi-runkoponttipalkkiharkosta. Palkkiharkko mitat ovat $300 \times 198 \times 130 \text{ mm}$, ja siinä on 70 mm leveä ja 90 mm syvä ura avoimessa yläosassa. Kahi-runkoponttipalkkiharkko on muuten umpinaista Kahi-tiiltä, eikä siinä ei ole pystyroiloja. Tällaiseen palkkiharkkoon on helppo asentaa vaakaputkisto ja valaa ura umpeen esimerkiksi betonilla. Tällöin voidaan olettaa, että jäähdytys leviää tasaisesti vesijohdosta joka suuntaan. Lämpökamerakuvien avulla on voitu päätellä, että jäähdytys leviää noin 100 mm vesijohdon molemmille puolille, edestäpäin katsottuna. Jos vesijohdot asennetaan seinään jokaiseen vaakavarviin, niin vesijohtojen asennusväliksi tulee 184 mm . Tällöin jäähdytys kattaisi koko rakenteen. Jos rakenne olisi 3 m leveä ja $2,6 \text{ m}$ korkea, pinta-alaksi tulisi tällöin $7,8 \text{ m}^2$. Jäähdytysteho olisi äsken lasketun esimerkin mukaan $7,8 \text{ m}^2 * 52,56 \text{ W/m}^2 = 410 \text{ W}$.

Leca EasyLex-rakenteessa käytettiin laskennalliseen tarkasteluun ajanjaksoa 20.2.2014 klo 0.00 – 21.2.2014 klo 9.00. Tutkijan mielestä tilanne oli tällöin tasaantunut, ja saatuja tuloksia voitiin käyttää kaavan 5 arvoihin niin, että ne kuvastavat Leca

EasyLex-rakenteen jäähditysvaikutusta. Aritmeettiseen keskiarvoon laskettiin 33 mitaustulosta. Mittaustulokset olivat taas aiemmin mitattujen arvojen aritmeettisiä keskiarvoja. Kaikki laskennalliseen tarkasteluun käytetyt arvot muodostuivat kuudesta aritmeettisestä keskiarvosta. Mittausväli oli kymmenen minuuttia, joka oli muodostettu yhden tunnin aritmeettiseksi keskiarvoksi. Saadut arvot olivat Leca EasyLex-rakenteessa: $\theta_i = 27,50 \text{ }^\circ\text{C}$ ja $\theta_{s,m} = 20,40 \text{ }^\circ\text{C}$. Tällä ajanjaksolla menevän veden keskilämpötila oli $5,82 \text{ }^\circ\text{C}$ ja palaavan veden keskilämpötila oli $6,83 \text{ }^\circ\text{C}$. Veden lämpötila eroksi muodostuu tällöin $1,01 \text{ }^\circ\text{C}$.

Laskenta suoritettiin kaavan 5 avulla

$$q = 56,80 \text{ W/m}^2$$

Leca EasyLex-rakenne on siis siirtynyt jäähditysenergiaa tutkimuskammioon $56,80 \text{ W/m}^2$. Putkea rakenteessa on ollut noin $1,78 \text{ m}$ (mitattu). Rakenteen koko oli $895 \times 895 \text{ mm}$.

7 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia, onko vesikiertoisilla Kahi- ja Leca-rakenteilla jäähdytysvaikutusta. Kaikilla tässä opinnäytetyössä tutkituilla vesikiertoisilla rakenteilla on jäähdytysvaikutusta. Vesikiertoisen rakenteen lisäksi kannattaa käyttää lisäksi muita tässä opinnäytetyössä esitettyjä passiivisia keinoja jäähdytystä suunniteltaessa. Varsinkin yötuuletuksen hyödyntäminen on muiden tutkimusten mukaan varsin hyvä keino alentaa sisälämpötiloja taloudellisesti.

Tämä tutkimus toimii hyvin perustutkimuksena tuleville kehitysprojekteille ja lisätutkimuksille. Tulevissa tutkimuksissa tästä opinnäytetyöstä saatuja tuloksia voidaan hyödyntää ja aloittaa kokonaisvaltaisen järjestelmän kehittäminen. Rakennusala tarvitsee valmiin kokonaisvaltaisen järjestelmän, jossa hyödynnetään olemassa olevia teknisiä laitteita ja järjestelmiä. Varsinkin Kahi-järjestelmistä löytyy jo valmiina kaikki tarvittavat elementit mitä tarvitaan. Järjestelmä kannattaa tutkijan mielestä kehittää vaakaputkisto järjestelmänä, jolloin työtekniikka on helpompaa ja vesiputkistojen ympärille saadaan kiinteää ainetta varmemmin ja helpommin. Ilman kiinteää ainetta, esimerkiksi ilman betonia, jäähdytysvaikutus pienenee huomattavasti. Pystyroiloihin asennettava putkisto toimii samalla tavalla kuin vaakaputkistokin, mutta siellä on vaikeampaa saada kiinteä aine vesiputkiston ympärille, ja ilmaa täynnä olevat roilot toimivat eristeinä rakenteessa.

Tulevat tutkimukset kannattaa suorittaa laboratoriossa, jossa on mahdollista rakentaa suurempia seinäkokonaisuuksia ja suorittaa enemmän mittauksia. Tällöin esim. kaavan 5 avulla suoritettavat laskelmat voidaan paremmin todentaa. Mittaavia antureita tulisi sijoittaa rakenteeseen enemmän, ja niitä tulisi olla myös rakenteen pinnassa. Rakenteesta pitäisi suorittaa myös varmentavaan mittausta antureiden toiminnasta. Tulevat tutkimukset tulisi myös tehdä koko järjestelmälle. Tällöin on mahdollista tulkita varsinkin isoissa rakennuksissa järjestelmän toimivuutta ja kannattavuutta.

Opinnäytetyöni olen kokenut mielekkääksi. Toivon että tulevaisuudessa voin suunnitella rakennuksiin jäähdytysjärjestelmän, jota olen itse ollut kehittämässä.

LÄHTEET

BABIAK, Jan, OLESEN, Bjarne W. & PETRAS, Dusan. 2013. Low temperature heating and high temperature cooling, REHVA guidebook NO 7. 3. painos. Forssa: Forssa Print.

Betoni.com. Rakennuksen massan vaikutus energiatehokkuuteen. [Verkkoaineisto] [Viitattu 20.6.2013]. Saatavissa:

http://www.betoni.com/Download/22018/BET0604_s61-63.pdf

Betoni.com. Pohjoismainen tutkimus massiivisuuden vaikutuksesta energiankulutukseen ja sisäilmaan. TTY, Energia- ja prosessitekniiikan laitos, 2006. Report 184 Nordic Thermal Mass-effect on energy and indoor climate. [Verkkoaineisto] [Viitattu 24.5.2013] Saatavissa: <http://www.betoni.com/tietoa-betonista/kehitysprojektit/massiivisuus>

Energia.fi. Kaukolämpötilastot. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.8.2013]. Saatavissa:

<http://energia.fi/tilastot-ja-julkaisut/kaukolampotilastot/kaukojaahdytys>

Energia.fi. Kaukojäähdytys. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.8.2013]. Saatavissa:

<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/kaukolampo-ja-kaukojaahdytys/kaukojaahdytys>

Helda.fi. Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastonmuutoksen vaikutuksista. Raportti julkaisusarja No. 2011: 6. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.5.2013]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/33069>

HIETAMÄKI, Tuomas, KUOPPALA, Juha-Matti, KALEMA, Timo & TAIVALANTTI, Kirsi. 2003. Rakennusten massiivisuus, keskeiset tutkimukset ja tulokset. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Energia- ja prosessiteknikka, Raportti 174. Tampere.

Ilmatieteenlaitos. 2013-3-1 Helletilastot 2000 - 2011, Exel-tiedosto. [sähköpostiviesti]. Vastanottaja Timo Ronkainen. Saatavissa: Ilmatieteenlaitos.

IVT.fi. Lämmönlähteet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.8.2013]. Saatavissa:

<http://www.ivt.fi/pages/page.asp?lngID=53&lngLangID=1>

Kaukojäähdytysjärjestelmät. RT kortti 56-10967. Helsinki: Rakennustieto. [Viitattu 1.8.2013]. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/index/tuotteet/rt.html>

Kivitalo info. Kestävä rakentaminen. [Verkkoaineisto] Rakennusteollisuus RTT ry, 2012. [Viitattu 12.1.2014] Saatavissa: <http://kivitaloinfo.fi/kestava-rakentaminen/ymparistovaikutukset/energiatehokkuus/massiivisuuden-hyodyntaminen/>

lvn.se, Landstinget Västernorrland, Environment and energy. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.6.2013] Saatavissa: <http://www.lvn.se/v1/in-english1/in-english/environment-and-energy/energy-factor-2/snow-cooling-in-sundsvall/>

NIEMI, Kerkko 2012. Aurinkojäähdytysjärjestelmän toteutus. Mikkelin Ammattikorkeakoulu. Talotekniikka. Opinnäytetyö. [Viitattu 18.7.2013]. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42337/Niemi_Kerkko.pdf?sequence=1

Rakennusten energiatehokkuus. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3 2012. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. [Viitattu 17.9.2013] Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37188-D3-2012_Suomi.pdf

Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. Suomen Rakentamismääräyskokoelma D2 2012. Määräykset ja ohjeet 2012. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. [Viitattu 17.9.2013] Saatavissa: http://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf

Savumax.fi. Savumax esite. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.6.2013]. Saatavissa: <http://www.savumax.fi/Savumax-esite.pdf>

VIRTA Maija, (ed.), BUTLER David, GRÄSLUND Jonas, HOGELING Jaap, KRISTIANSEN Erik Lund, REINIKAINEN Mika & SVENSSON Gunnar. 2004. Chilled beam application guidebook. REHVA guidebook NO 5. 2. painos. Forssa: Forssa Print.

WOUTER Beck, DOLMANS Dick, DUTOO Gonzague, HALL Anders & SEPPÄNEN Olli. 2011. Aurinkosuojaus, REHVA ohjekirja NO 12. 1. painos. Forssa: Forssa Print.

Liite 1, 7 sivua. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Energia- ja prosessitekniikka, Raportti 174, ISBN 952-15-1024-2, Liite 1, Rakennusten massiivisuus, keskeiset tutkimukset ja tulokset, Tuomas Hietämäki, Juha-Matti Kuoppala, Timo Kalema ja Kirsi Taivalantti, Tampere 2003.

| Aihe | Lähde | Maa | Kohde | Menetelmä | Vaikutukset energiankulutukseen, tehoon ja sisälämpötilaan |
|---|--|-----|--------------------------------|-------------------------|---|
| Summer cooling with night ventilation for office buildings in moderate climates | M. Kolokotroni, Energy and buildings 27 (1998) 231-237 | UK | Toimistorakennus | Simulointi APACHE | Massiivisilla rakenteilla saadaan laskettua maksimi sisälämpötilaa 4 °C kevytrakenteiseen taloon verrattuna |
| Cooling energy reduction in air-conditioned offices by using night ventilation | M. Kolokotroni, Applied energy 63 (1999), 241-253 | UK | Ilmastoitunut toimistorakennus | Simulointi BRE:n 3TC | Tyypilliselle englantilaiselle toimistolle säästö jäähdytysenergiassa, kun siirryttiin yö jäähdytykseen on 0,7-1,55 kWh/m ² /a. Raskaalla rakenteella saatiin noin 15 % jäähdytysenergiesäästöä ja kevyellä noin 5 % säästö siirryttäessä yö jäähdytykseen. Jäähdytystehon tarve laski 6 % siirryttäessä yö jäähdytykseen. |
| Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures | G. Baruch, Energy and buildings 28 (1998), 25-32 | USA | Kaksio 23 m ² | Mittaus | Massiivisilla rakenteilla saadaan laskettua maksimi sisälämpötilaa 5 -7 °C kevytrakenteiseen taloon verrattuna |

| | | | | | |
|--|--|------------|--|---|--|
| Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy | E. Shaviv Renewable Energy 24 (2001), 445-452 | ISR | Asuinrakennus | Simulointi ENERGY | Massiivisilla rakenteilla saadaan laskettua maksimi sisälämpötilaa 3 -6 °C kevytrakenteiseen taloon verrattuna |
| Experimental evaluation of night ventilation phenomena | V. Geros & al. Energy and buildings 29 (1999), 141-154 | GR, FRA | 3 eri tyyppistä rakennusta | Mittaus, Simulointi TRNSYS | Jos ilmanvaihtuvuus on n=20 1/h ja sisälämpötilan asetusarvo $T_{aset}=25$ °C, kevyellä rakenteella saavutetaan 32 % säästö ja raskaalla rakenteella 54 % säästö jäähdytysenergiassa |
| Thermal Mass-Energy Savings potential in residential buildings | J. Kosny ym. ORNL | USA | Eriyyppisiä asuinrakennuksia | Simulointi DOE-2.1E | Massiivisella rakenteella saavutetaan 8 % säästö lämmitysenergiassa ja jopa 18 % säästö jäähdytysenergiassa |
| Sweden, 35 years experiences of dynamic energy design in buildings. Can it be replicated fast enough | H. Falk & E. Isfält | SE | Toimistorakennus jossa termistä massaa | Simulointi 3 eri säätö strategialla | <ol style="list-style-type: none"> 1. Päiväaikainen ilmanvaihto: Jäähdytysenergia 0,361 kWh/m² ja teho 47,2 W/m² 2. Ilmanvaihto jatkuvasti päällä: Jäähdytysenergia 0,275 kWh/m² ja teho 12,7 W/m² 3. Termodeck-järjestelmä: Jäähdytysenergia 0,109 kWh/m² ja teho 0 W/m² |
| Värmetröghetens inverkan på energibehovet-Studier på ett småhus | Noren, J Akander, E Isfält, Södersröm KTH (1999) | SE | Vertailu 3:a erityyppistä 6:n asunnon luhtitaloa | 1 Simulointi TSBI3 2 Simulointi BRIS | Kokonaisenergian (sähkö+lämpö) suhteellinen tarve eri rakenteilla: 1 TSBI3: Kevyt rakenne 100 %, Massiivinen puu 91 %, Raskas rakenne 86 %. |

| | | | | | |
|---|--|----|------------------------|--------------------------------|--|
| | | | | 3 Simulointi EN 832 | 2 BRIS: Kevyt rakenne 100 %, Massiivinen puu 88 %, Raskas rakenne 85 %. 3 EN 832: Kevyt rakenne 100 %, Massiivinen puu 88 %, Raskas rakenne 82 %. |
| Study of the Energy use characteristics of concrete multi family dwelling buildings and the relevance for economy and environment | M. Öberg, Department of building materials, Lund University (2002) | SE | 2-kerroksinen rivitalo | Mittaus, Simulointi VIP+ | Lämmitysenergian 8 % säästö. |
| Energy efficiency in building: The role of fabric energy storage in concrete | J Glass BCA (2001) | UK | | | Päivittäistä sisäilman keskilämpötilaa voidaan alentaa massiivisuuden avulla 3 -4 °C. Termodeck:llä mahdollista saavuttaa jäähdytysteho 40 W/m ² , kun kevytrakenteisessa talossa vastaava rakenteellinen jäähdytysteho on n. 6 -8 W/m ² |
| Cooling and heating of buildings by activating their thermal mass with embedded hydronic pipe systems | B.W Olesen | | | | Lattiasta saatava suurin lämmitysteho on 100 w/m ² ja katosta 40 -50 W/m ² . Suurin saatava jäähdytysteho katosta on 100 W/m ² ja lattiasta 40 W/m ² . |

| | | | | | |
|---|---|-----|--|--------------------|---|
| Numerical model of a building with transparent insulation | A.K Athienitis, H. Ramadan, Solar energy 67 (2000), 101-109 | CAN | Huone jossa Ti-seinä (20 cm betonia etelään) | Simulointi | Esim. aurinkoisena kylmänä (-20 °C) päivänä huoneessa ei tarvittu erillistä lämmitystä. Leutoina talvipäivinä yllämpiämisen vaara on suuri. |
| Ikkunan, seinämien ja lämmitysjärjestelmän vaikutus rakennuksen energiankulutukseen | A. Aittomäki, ym. LVI-tekniikan laboratorio, tiedonanto 29, (1977) | FI | Kerrostalomoduuli, pientalo | Simulointi TASE | Lämmitysenergian kulutus pienenee massiivisuuden vuoksi 1 ...10 %. Jäähdytysenergia kevyellä rakenteella noin kaksinkertainen raskaaseen verrattuna. Jäähdytystehontarve on kevytrakenteisella talolla noin 50 % suurempi. Lämmitysteho massiivisella ja kevyellä rakenteella lähes sama. |
| Asuinrakennuksen massiivisuuden energiataloudellinen merkitys | J. Jämiä ym. TTKK, Rakennustekniikan osasto, (1981/3) | FI | Omakoti-, rivi- ja asuin kerrostalo | Simulointi TASE | Massiivisen talon lämmitysenergian kulutus 1 ...10 % pienempi kuin kevyen talon. Sisälämpötilan maksimi arvoa voidaan laskea 2 °C massiivisissa rakennuksissa. Vaadittavaa lämmitystehoa massiivisuus pienentää noin. 10 %. |
| Massa vaikutus rakennusten eristystarpeeseen | A. Aittomäki ym. TTKK, Sähkötekniikan osasto, Raportti 1-81, (1981) | FI | Kerrostalo ja pientalo | Simulointi | Lämmitysenergian kulutus massiivisella pientalolla 1 ...5 % ja kerrostalolla 4 ...17 % pienempi kuin vastaavalla kevytrakenteisellä talolla. Sisälämpötilan maksimia voidaan n. 4 °C massan avulla. |

| | | | | | |
|---|---|----|--|--|---|
| Inverkan av termisk massa på en byggnads energibehov under dess livscykel-system- och komponentanalys | F. Ståhl, Chalmers tekniska högskola, publication P-00:4, (2000) | SE | Rivitalo, kouluhuone, konttori ja asuin kerrostalo | Simulointi Derob-LTH | Lämmitysenergian kulutus massiivisessa rivi- ja kerrostalossa n. 2 %. koulussa alle 1 % ja konttorissa n. 20 % pienempi kuin vastaavassa kevyessä rakennuksessa. Massiivisen konttorin jäähdytysenergian kulutus noin 10 % pienempi kuin vastaavan kevyen konttorin. |
| Simulation on energy consumption in typical Finnish detached house | J. Jokisalo, J. Kurnitski. HUT, Lab. of HVAC, Report B74, (2002). | FI | Suomalainen tavallinen talo | Simulointi IDA Indoor Climate and Energy 3.0 | Massiivisella rakenteella korkeintaan 2 % lämmitysenergian säästö. Tiiveydellä todettiin olevan merkittävä vaikutus lämmitysenergian kulutukseen. Muut muuttujat kuten ilmastointi-, lämmitysjärjestelmä, ikkunoiden koko ja väliovien paikka vaikuttavat lämmitysenergian kulutukseen enemmän kuin terminen lämpökapasiteetti. |
| Asuin kerrostalon lämmön- talteenoton seurantatutkimus- VVO/Jampankuusi | J. Heikkinen, P. Nurro. KTM, Energiaosasto, Sarja D:77, (1985). | FI | 6 kerroksinen vuokratulo | Kenttämitaukset | Lämmitysenergian tarpeessa ei merkittävää eroa muihin saman rakennuttajan saman ikäisiin taloihin verrattuna. Sisälämpötila lämmityskaudella oli keskimäärin 22,6 °C. Ulkolämpötilalla – 21 °C lämmitysteho oli 56 kW. |
| METOP-CFC-aineeton matalaenergia toimistotalo | J. Laine & M. Saari, VTT julkaisu 795, (1994). | FI | Matalaenergia toimistotalo | Kenttämitaukset | Lämmitysenergian kulutus n. 60 % pienempi kuin toimistotalojen keskimääräinen kulutus. |

| | | | | | |
|--|---|-----|--|--------------------------|---|
| Contribution to thermal comfort given by experimental ventilated cavity floors | G. Rossi & G. Solaini, Energy and buildings 14 (1990), 197-200 | | Betonilaatta lattia | Mittaukset testisoluissa | Lämmitysenergian säästö lattiarakenteesta riippuen 13 -27 kWh/m ² a. |
| Mixed Mode HVAC- an alternative Philosophy | D. Arnold, ASHRAE part 1 (1996), 687-692 | | | Mittaukset | Massiiviset rakenteet voivat pienentää jopa 50 % jäähdytystehon huippuja. |
| Room air conditioning by means of overnight cooling of the concrete ceiling | R.A. Meierhans, ASHRAE part 1 (1996), 693-697 | SUI | Toimistorakennus | Mittaukset | Betonikattoon upotetun jäähdytysputkiston avulla jäähdytysenergian kulutus voidaan pienentää puoleen. |
| Atrium buildings: Thermal performance and climatic factors | M.R. Atif, D.E. Claridge, L.L. Boyer & L.O. Degelman, ASHRAE part 1 (1995), 454-460 | | Atriumi | Simulointi TRNSYS 13.1 | Tarkasteltu massan vaikutusta atriumin lämpötiloihin. Kanadan kylmällä alueella 100 % katto lasituksella sisälämpötilan maksimi arvon lasku n. 9,5 °C ja 50 % lasituksella n. 5,5 °C. Kalifornian lämpimällä alueella 100 % lasituksella sisälämpötilan maksimi arvon lasku noin 10 °C ja 50 % lasituksella 4,5 °C. |
| Heat storage on building. Thermal mass- parametric study | I. Andersen, M. Brandemuehl, ASHRAE part 1 (1992), 910-918 | | Tyypillisen monikerroksisen rakennuksen toimisto | Simulointi TRNSYS | Koneellisella esijäähdytyksellä saatiin 50 % vähennys jäähdytystehon huipuissa massiivisten rakenteiden käytöllä. |

| | | | | | |
|--|---|--|------------|------------|---|
| Use of building thermal mass to offset cooling loads | M.D. Ruud, J.W. Mitchell, S.A. Klein, ASHRAE part 2 (1990), 820-829 | | Kerrostalo | Mittaukset | Jäähdytysenergian tarve väheni 18 % yö jäähdytyksellä verrattuna päivällä tapahtuvaan jäähdytykseen |
|--|---|--|------------|------------|---|

