A-INSINÖÖRIT

PUUTUOTETEOLLISUUS RY TUTKIMUSHANKE

ANALYYSI PUURAKENTEISTEN KATTOELEMENTTIEN ONTELOPALOJEN POLTTOKOKEISTA

19.8.2025

A-INSINÖÖRIT

REVISIOT

Revisio	Selitys	pvm.	suun./tark.

A-INSINÖÖRIT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO 4
2 MÄÄRÄYSPERUSTA 6
3 POLTTOKOKEET 10
3.1 Yleistä 10
3.2 Testi 1: Yhteen suuntaan tuulettuvat kattoelementit 11
3.2.1 Testi 1: Polttokokeen järjestelyt 11
3.2.2 Testi 1: Polttokokeen kulku 15
3.3 Testi 2: Ristiin tuulettuvat kattoelementit 18
3.3.1 Testi 2: Polttokokeen järjestelyt 18
3.3.2 Testi 2: Polttokokeen kulku 22
4 POLTTOKOKEIDEN ANALYSOINTI 26
4.1 Yleistä 26
4.2 Laskentamenetelmät ja hyväksymiskriteerit 28
4.3 Laskelmien tulokset 32
4.3.1 Testi 1: Yhteen suuntaan tuulettuvat kattoelementit 32
4.3.2 Testi 2: Ristiin tuulettuvat kattoelementit 33
5 JOHTOPÄÄTÖKSET 34
6 YHTEENVETO 37
KIRJALLISUUSLÄHTEET 39

LIITE A: Koekuormitusten laskenta
LIITE B: Polttokokeista mitattu lämpötiladata

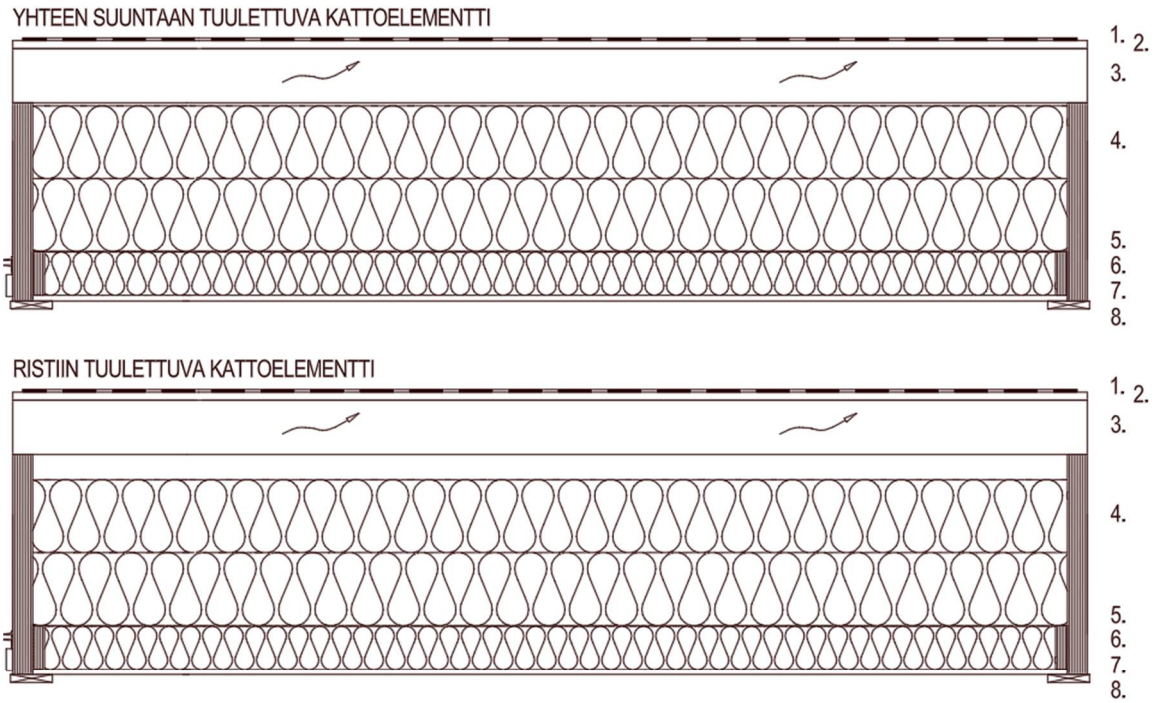
1 JOHDANTO

Tämä raportti käsittelee Puutuoteteollisuus ry:n tutkimushanketta puurakenteisten kattoelementtien ontelopaloista. Puurakenteisten kattoelementtien palokäyttäytyminen on melko hyvin tunnettua ja suhteellisen helposti testattavissa polttokokeilla silloin, kun tulipalo vaikuttaa elementteihin niiden alapuolelta (eli rakennuksen sisäpuolelta). Suomen palomääräyksissä kuitenkin esitetään tiettyjä vaatimuksia myös kattoelementin yläpuolelta / ontelotilasta alkavien palojen seuraamusten hallintaan (ks. kappale 2). Tällaisille ylhäältä alaspäin vaikuttaville tulipaloille ei kuitenkaan ole olemassa valmiita testistandardeja, eikä kyseisiä testejä edes ole fyysisesti mahdollista toteuttaa tällä hetkellä tutkimuslaboratorioissa käytössä olevissa polttokoeuuneissa eteenkään kuormitettuna. Myöskään puhtaasti laskennallisilla keinoilla tätä ongelmaa ei ole saatu täysin ratkaistua, koska kattoelementtirakenteen luonteesta johtuen laskennalliset analyysit ovat ontelopalojen tilanteessa johtaneet hyvin helposti ylimitoitettuihin ratkaisuihin. Näin ollen tässä Puutuoteteollisuus ry:n tutkimushankkeessa yläpuolisen palon ongelmaa lähdettiin tutkimaan suorittamalla suuren mittaluokan (n. 8 m x 8 m) polttokokeet ulkoilmatesteinä kuormitetuille kattoelementeille luonnollisissa, elementtien ontelotiloissa syttyvissä, tulipaloissa.

Kattoelementit tutkimushankkeeseen toimitti Lapwall Oy ja ne koepoltettiin yhteistyössä Kuopion Pelastusopiston kanssa Pelastusopiston harjoitusalueella. A-Insinöörien lisäksi Tampereen yliopiston palolaboratorio oli mukana suunnittelemassa polttokokeita ja valvomassa niiden suorittamista. Hanketta rahoitti Rakennustuotteiden Laatu Säätiö sr.

Tutkittaviksi rakenteiksi valittiin Lapwall Oy:n luokituksen REI30 (alhaalta ylöspäin) täyttävät kattoelementit, jotka koostuvat LVL-pääkannattajista, puukoolauksista, lasivillaeristeestä, alapuoleisesta tyypin A kipsilevytyksestä sekä yläpuoleisesta OSB-levytyksestä ja bitumikatteesta. Hankkeessa tutkittiin sekä yhteen suuntaan että ristiin tuulettuvia kattoelementtejä (Kuva 1).

Tässä raportissa tarkastellaan kattoelementeille suoritettuja ontelopalon polttokokeita ja tehdään jatkoanalyyseja polttokokeiden mittaustulosten perusteella. Pelastusopisto on myös kirjoittanut oman testiraporttinsa polttokokeiden suorittamisesta [1].



KATTOELEMENTTIVALMISTUS:

1. BITUMINEN ALUSKERMI TL2 TAI PVC 1-KERROSKATE
2. OSB TAI HAVUVANERI
3. VASAT / TUULETUSRAKO
4. LVL PÄÄPALKIT, LÄMMÖNERISTE A1 (LASIVILLA), ERISTEPAKSUUSTOLERANSSI T2 (EN 823)
5. HÖYRYNSULKUMUOVI
6. C24 KOOLAUS, k/k 600 mm, LÄMMÖNERISTE A1 (LASIVILLA), ERISTEPAKSUUSTOLERANSSI T2 (EN 823)
7. KIPSILEVY TYYPPI A, 12.5 mm
8. SAUMALAUTA ST, PITKILLÄ SIVUILLA

Kuva 1. Lapwall Oy: Yhteen suuntaan tuulettuva kattoelementti ja ristiin tuulettuva kattoelementti. REI30 luokitus alhaalta ylöspäin vaikuttavaa paloa vastaan.

2 MÄÄRÄYSPERUSTA

Suomen rakentamislain [2] § 32:n mukaan rakennusten on täytettävä seuraavat olennaiset palotekniset vaatimukset:

- Palon syttymisen vaaraa on rajoitettava.
- Rakennuksen kantavien rakenteiden tulee palon sattuessa kestää niille asetetun vähimmäisajan.
- Palon ja savun kehittymisen ja leviämisen rakennuksessa tulee olla rajoitettua
- Palon leviämistä lähistöllä oleviin rakennuksiin tulee rajoittaa.
- Rakennuksessa olevien henkilöiden on voitava palon sattuessa päästä poistumaan rakennuksesta tai heidät on voitava pelastaa muulla tavoin.
- Pelastushenkilöstön turvallisuus on rakentamisessa otettava huomioon.
- Rakennuksen rakentamisessa on käytettävä paloturvallisuuden kannalta soveltuvia rakennustuotteita ja teknisiä laitteistoja.

Ympäristöministeriön asetusten 848/2017 [3] ja 927/2020 [4] 3§ mukaan edellisten vaatimusten voidaan osoittaa täyttyvän, jos

- Rakennus suunnitellaan ja rakennetaan noudattaen ko. asetuksessa esitettyjä luokkia ja lukuarvoja (ns. taulukkomitoitus) **tai**
- Rakennus suunnitellaan ja rakennetaan perustuen oletettuun palonkehitykseen, joka kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. Vaatimuksen täyttyminen todennetaan tapauskohtaisesti ottaen huomioon rakennuksen ominaisuudet ja käyttö (ns. toiminnallinen palomitoitus).

Tässä raportissa käsitellään ainoastaan kattoelementtien luokkiin ja lukuarvoihin perustuvaa suunnittelua eli taulukkomitoitusta. Seuraavissa kappaleissa on esitetty otteita paloasetusten 848/2017 [3] ja 927/2020 [4] kohdista, jotka ovat tutkimushankkeen tarkastelujen kannalta oleellisia. Asetusten perustelumuistioissa [5, 6] annetaan lisäohjeita vaatimusten soveltamiselle, joten seuraavissa kappaleissa on esitetty näiden tarkastelujen kannalta oleelliset kohdat myös perustelumuistioista.

Ote paloasetusten pykälästä 12 (Luokitukseen perustuva mitoitus):

”P1- ja P2-paloluokan rakennusten rakenteiden kantavuutta koskeviin luokkavaatimuksiin sovelletaan taulukkoa 3.

Jos kantavalta rakennusosalta vaaditaan pidempää palonkestävyysaikaa tiiviyden E ja eristävyyden I suhteen kuin kantavuuden R suhteen, on käytettävä pidempää palonkestävyysaikaa myös kantavuuden osalta.

Luokkavaatimuksen täyttyminen on osoitettava kokeellisesti, laskennallisesti, yhdistämällä koe- ja laskennalliset tulokset tai käyttämällä hyväksyttävää taulukkomitoitusta. Luokkavaatimuksen mukaisuus määräytyy standardisoidun lämpötila-aikakäyrän perusteella.”

A-INSINÖÖRIT

Taulukko 1. Muokattu ote asetuksen 927/2020 taulukosta 3: Kantavien ja jäykistävien rakenteiden luokkavaatimukset P1- ja P2-paloluokan rakennuksissa.

Rakennus	**Rakennuksen paloluokka ja palokuormaryhmät MJ/m²**			
	P1			**P2**
	yli 1 200	**600–1 200**	**alle 600**	-
1–2-kerroksinen rakennus, yleensä	R 120 (R60 *)	R 90 (R60 *)	R 60	R 30
– hoitolaitokset, majoitustilat	R 120, A2 (R60 *, A2)	R 90, A2 (R60 *, A2)	R 60, A2	R 30
– yläpohja rakennuksessa, jossa ei ole ullakkoa ja rakenne on kantavan rungon olennainen osa [1)]	R 60	R 60	R 60	R 30
– yksikerroksinen tuotanto- ja varastorakennus	R 60 (R30 *) (R15, A2 *)	R 60 (R30 *) (R15, A2 *)	R 60 (R30 *) (R15, A2 *)	R 30 (R15 *) (R15, A2)
– yläpohja rakennuksessa, jossa ei ole ullakkoa ja rakenne ei ole kantavan rungon olennainen osa [1)]	R 15	R 15	R 15	R 15
Yli 2-kerroksinen rakennus, jonka korkeus on enintään 28 m, yleensä	R 180, A2 (R90 *, A2)	R 120, A2 (R60 *, A2)	R 60, A2	R 60 * # [3) 4)]

Kantavien rakenteiden on oltava vähintään D-s2, d2 -luokan tarviketta, ellei taulukossa toisin mainita.

Ullakon tai ontelon vesikattorakenteille, jotka eivät ole rakennuksen rungon olennaisia kantavia tai palossa runkoa jäykistäviä rakenteita, ei aseteta palonkestävyysvaatimusta.

[1)] Kantavan rungon tai jäykisteiden olennaisia osia ovat pääkannattajat, runkoa jäykistävät sekundäärikannattajat ja yläpohjan jäykisteet ja muut sellaiset yksittäiset rakenteet, jotka toimivat yläpohjan stabiliteetin säilyttämiseksi, sekä näiden väliset liitokset.

* Rakennus on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.

\# Lämmöneristeiden ja muiden täytteiden on oltava vähintään A2-s1, d0-luokkaa.

A2 Kantavien rakenteiden on oltava vähintään A2-s1, d0-luokkaa.

Ote paloasetusten perustelumuistioiden pykälästä 12:

”Luokitukseen perustuvassa mitoituksessa perustana on standardipalokäyrä, jonka kaava on T = 345 log10 (8t + 1) + 20 °C, jossa T = palotilan lämpötilan nousu °C ja t = lämpöaltistuksen kesto minuutteina.

Katteen alapuolella oleva yläpohjarakenne mitoitetaan myös yläpuolista paloa vastaan saman luokkavaatimuksen mukaan kuin alapuolista paloa vastaan.”

Ote paloasetusten pykälästä 16 (Osastoivat ja osiin jakavat rakennusosat):

”Osastoivan rakennusosan siihen liittyvine laitteineen ja varusteineen on estettävä palon leviäminen palo-osastosta toiseen määrätyn ajan.

Osastoivien rakennusosien luokkavaatimuksiin sovelletaan taulukkoa 6. Osastoivaksi rakennusosaksi voidaan hyväksyä myös rakennusosa, joka kokonaan tai joltain osin täyttää vaatimukset vain tiiviyden E osalta. Tällöin henkilöiden poistuminen ei saa vaarantua eikä palo levitä toiseen palo-osastoon vaaditun palonkestävyysajan kuluessa.

Osiin jakavan rakennusosan luokkavaatimus on EI 15.”

Taulukko 2. Muokattu ote asetuksen 927/2020 taulukosta 6: Osastoivien rakennusosien luokkavaatimukset.

	Rakennuksen paloluokka ja kerrosluku sekä palokuormaryhmä MJ/m²					
	P1			**P2 yli 2 kerrosta**	**P2 1–2 kerrosta**	**P3**
	yli 1 200	**600–1 200**	**alle 600**	–	–	–
– yläpohja, jos osastoivuusvaatimus	EI 60	EI 60	EI 60	EI 60 [2)]	EI 30	EI 30

[2)] Huom. 24 §:n 3 momentissa esitetyt vaatimukset.

Ote eo. taulukosta mainitusta 24§:n 3 momentin tämän hankkeen kannalta oleellisimmasta kohdasta:

”P2-paloluokan yli 2-kerroksisen rakennuksen sisäpuolisten pintojen, pois lukien uloskäytävän ja palosulun pinnat, on oltava varustettuja vähintään A2-s1, d0 -luokan tarvikkeista tehdyllä vähintään $K_2$30 -luokan suojaverhouksella.”

Ote paloasetusten pykälästä 20 (Ullakot ja ontelot):

”Palon ja savun leviämisen vaara rakennuksessa ei saa olennaisesti kasvaa ullakoiden ja onteloiden johdosta.

Laajat ontelot on jaettava osiin palon leviämisen rajoittamiseksi.”

Ote paloasetusten perustelumuistioiden pykälästä 20:

”Kun yläpohjan ontelo osastoidaan alapuolella olevasta tilasta, koskee alapuolista paloa vastaan alapuolisen tilan osastointivaatimus. Yläpuolista paloa vastaan osastointivaatimus on alapuolisen tilan vaatimus, kuitenkin jos palon leviäminen räystäältä yläpohjan onteloon on estetty EI 30-rakennusosaa vastaten ja yläpohjan ontelossa syttymisen vaara on tehokkaasti estetty, vaatimus on vähintään EI 30.

Jos yläpohjassa ei ole onteloita, ei yläpohjaa tarvitse osastoida yläpuolista paloa vastaan, ellei siihen muutoin kohdistu osastointivaatimusta (esim. rakennuksen viereisen korkeamman osan tapauksessa).”

Ote paloasetusten pykälästä 23 (Sisäpuoliset pinnat):

”Sisäpuolisten pintojen luokkavaatimuksiin sovelletaan taulukkoa 7. Luokkavaatimukset eivät koske pinta-alaltaan vähäisiä rakennusosia, kuten tavanomaisia ovia, ikkunoita kiinnityspintoja, käsijohteita, jalkalistoja, saumalautoja ja levyjen välisiä saumoja.”

Taulukko 3. Muokattu ote asetuksen 927/2020 taulukosta 7: Sisäpuolisten pintojen luokkavaatimukset.

Käyttötarkoitus	**Pinta**	**Rakennuksen paloluokka**		
		P1	**P2**	**P3**
Ullakot ja yläpohjan ontelot				
– ullakot sekä yläpohjan ontelot, jotka on osastoitu alapuolisesta tilasta	ullakon tai ontelon sisäpinnat	D-s2, d2 [1)]	D-s2, d2 [1)]	–
– yläpohjan ontelot, joita ei ole osastoitu alapuolisesta tilasta. Vaatimus ei koske lämmöneristeen tuuletusuria.	ontelon sisäpinnat	B-s1, d0 [1)]	B-s1, d0 [1)]	–

Ote paloasetusten perustelumuistioiden pykälästä 23:

”Jos yläpohja on osastoitu molemminpuolista paloa vastaan, voidaan ullakon ja ontelon sisäpintoina käyttää vähintään D-s2, d2 luokan tarvikkeita ja vähäisessä määrin (palokuormaltaan) E-luokan tarvikkeita (kuten aluskate).

Jos yläpohjan ontelo ei ole osastoitu alapuolisesta tilasta, tulee ontelon alapinnan eli yläpohjan yläpinnan lisäksi myös ontelon muiden pintojen olla vähintään B-s1, d0 luokan tarvikkeista P1 ja P2-paloluokan rakennuksissa. Vähäisessä määrin (korkeintaan 20 % pinnoista) voidaan kuitenkin käyttää myös D-s2, d2 -luokan tarvikkeita.

Esitetyt vaatimukset eivät koske loivien kattojen lämmöneristeen pinta-alaltaan vähäisten tuuletusurien pintoja.”

Tutkimushankkeen kannalta oleellisimmat vaatimukset kattoelementeille voidaan siis tiivistää seuraavasti:

- Luokitukseen perustuvassa suunnittelussa kattoelementit mitoitetaan aina standardipaloa vastaan ja tämä mitoitus voidaan tehdä kokeellisesti, laskennallisesti tai näiden yhdistelmänä.
- Kattoelementtien kantavuusvaatimuksissa noudatetaan paloasetusten taulukkoa 3 (eli tämän raportin Taulukko 1). Lukuun ottamatta paloluokkaa P3, jossa kantavuusvaatimusta ei ole, ellei yläpohjaan samalla kohdistu ulkoista osastoivuusvaatimusta (esim. tietyissä rakennuksen viereisen korkeamman osan tapauksissa).
- Kattoelementtien kantavuusvaatimus on luokaltaan sama sekä alhaalta ylöspäin vaikuttavissa tulipaloissa että ylhäältä alaspäin vaikuttavissa tulipaloissa. Lisäksi kantavuuden luokkavaatimus on vähintään sama kuin kyseiseltä yläpohjalta edellytetty osastointivaatimus.
- P1 ja P2 paloluokan rakennuksissa kattoelementeille tulee aina vaakatasoinen osastointivaatimus, sillä yläpohjan alapuoleiset tilat on aina osastoitava erilleen kattoelementin ontelotiloista, kun näissä onteloissa esiintyy runsaasti (yli 20 %) palosuojaamattomia puupintoja. Luokkavaatimus tälle osastoinnille on:
    - Alapuolista paloa vastaan luokkavaatimus on alapuolisen tilan osastointivaatimus (ks. paloasetuksen taulukon 6 kohta yläpohjalle, eli tämän raportin Taulukko 2).
    - Yläpuolista paloa vastaan luokkavaatimus on alapuolisen tilan osastointivaatimus, kuitenkin jos palon leviäminen räystäältä yläpohjan onteloon on estetty EI 30-rakennusosaa vastaten ja yläpohjan ontelossa syttymisen vaara on tehokkaasti estetty, vaatimus on vähintään EI 30. Ellei sitten ulkoisesti kattoelementin yläpuolelta rakenteeseen kohdistu tätä luokkaa korkeampaa vaatimusta (esim. tietyissä rakennuksen viereisen korkeamman osan tapauksissa).

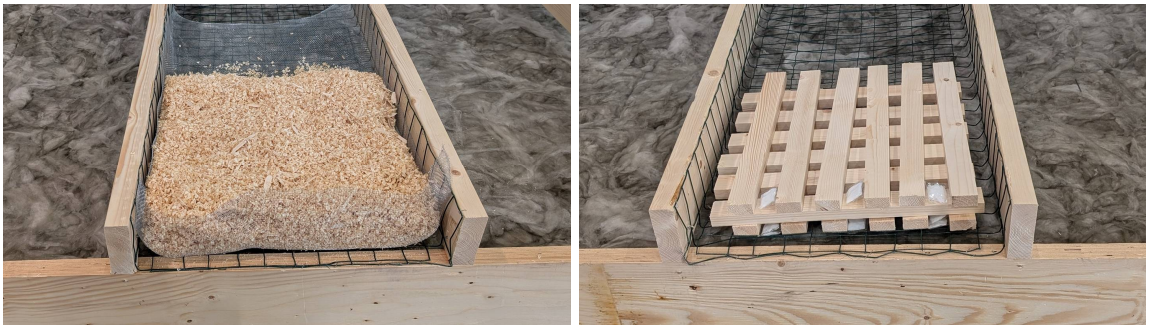
Näiden kohtien lisäksi paloasetuksissa ja perustelumuistiossa on myös muita puurakenteisia kattoelementtejä koskevia vaatimuksia (esim. vaatimukset katteelle ja lämmöneristeelle sekä vaatimukset onteloiden osiinjaon toteutukselle), mutta eo. otteissa ja tiivistyksessä on pyritty rajaamaan näiden tarkastelujen kannalta epäolennaiset asiat pois.

3 POLTTOKOKEET

3.1 Yleistä

Ennen varsinaisia suuren mittaluokan polttokokeita suoritettiin kuormittamattomat esitestit pienemmille koekappaleille (noin 5 m x 2,4 m). Esitestien tarkoituksena oli tutkia eri sytytystapojen kelpoisuutta kattoelementtien ontelopalojen sytyttämiseen. Esitestit suoritettiin 15.11.2024 Lapwall:in Pälkäneen tehtaan pihalla ja Tampereen yliopisto on tehnyt niistä lyhyen testiraportin [7].

Esitesteissä tutkittiin yhteen suuntaan tuulettuvaa kattoelementtiä sekä ristiin tuulettuvaa kattoelementtiä. Kummatkin elementit sytytettiin kahdesta kohtaa käyttäen alkupalokuormana kutterilastuja tai puukalikoita sekä sytytyspusseja. Yhteen suuntaan tuulettuvassa elementissä alkupalokuormana oli 4 kg kutterilastua tai 4 kg puukalikoita sekä 9+9 kpl sytytyspusseja (Kuva 2). Ristiin tuulettuvassa elementissä alkupalokuorma pienennettiin 2 kiloon kutterilastua tai 2 kiloon puukalikoita sekä 4+4 kappaleeseen sytytyspusseja. Varsinainen sytytys tapahtui butaanipolttimella.



Kuva 2. Alkupalokuorma yhteen suuntaan tuulettuvan elementin esitestissä: 4 kg kutterilastua tai 4 kg puukalikoita sekä 9+9 kpl sytytyspusseja.

Esitestien tuloksena havaittiin, että kaikki testatut sytytystavat toimivat tehokkaasti ja suuren mittakaavan testeihin valittiin näiden perusteella 2 kg kutterilastua ja 5 kpl sytytyspusseja. Esitesteistä havaittiin myös, että tuulella saattaa olla suuri vaikutus kattoelementin palon kehittymiseen, joten suuren mittakaavan testeihin päätettiin rakentaa tuulensuojaseinämät.

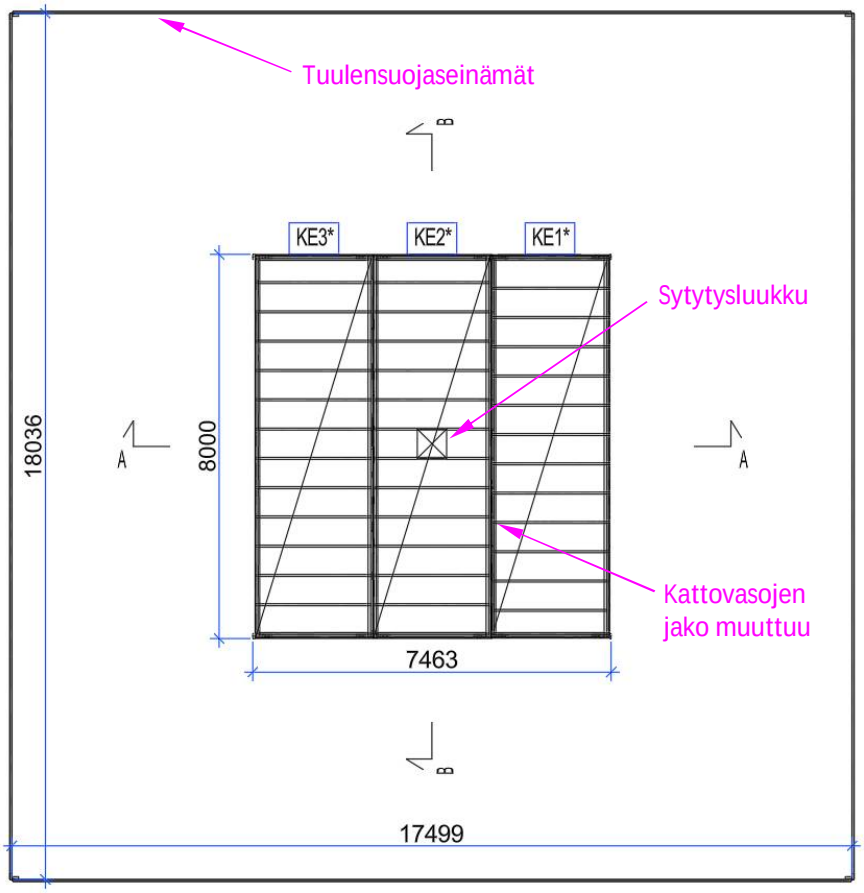
Kuva 3. Vas.: Yhteen suuntaan tuulettuvan kattoelementin esitesti. Oik.: Ristiin tuulettuvan kattoelementin esitesti.

Seuraavissa kappaleissa on kuvattu suuren mittaluokan polttokokeiden koejärjestelyt ja mittaustulokset yhteen suuntaan tuulettuvista kattoelementeistä (Testi 1, kappale 3.2) sekä ristiin tuulettuvista kattoelementeistä (Testi 2, kappale 3.3). Polttokokeet suoritettiin ulkotiloissa Kuopion Pelastusopiston harjoitusalueella ja ne on raportoitu seuraavien kappaleiden lisäksi myös Pelastusopiston omassa testiraportissa [1].

3.2 Testi 1: Yhteen suuntaan tuulettuvat kattoelementit

3.2.1 Testi 1: Polttokokeen järjestelyt

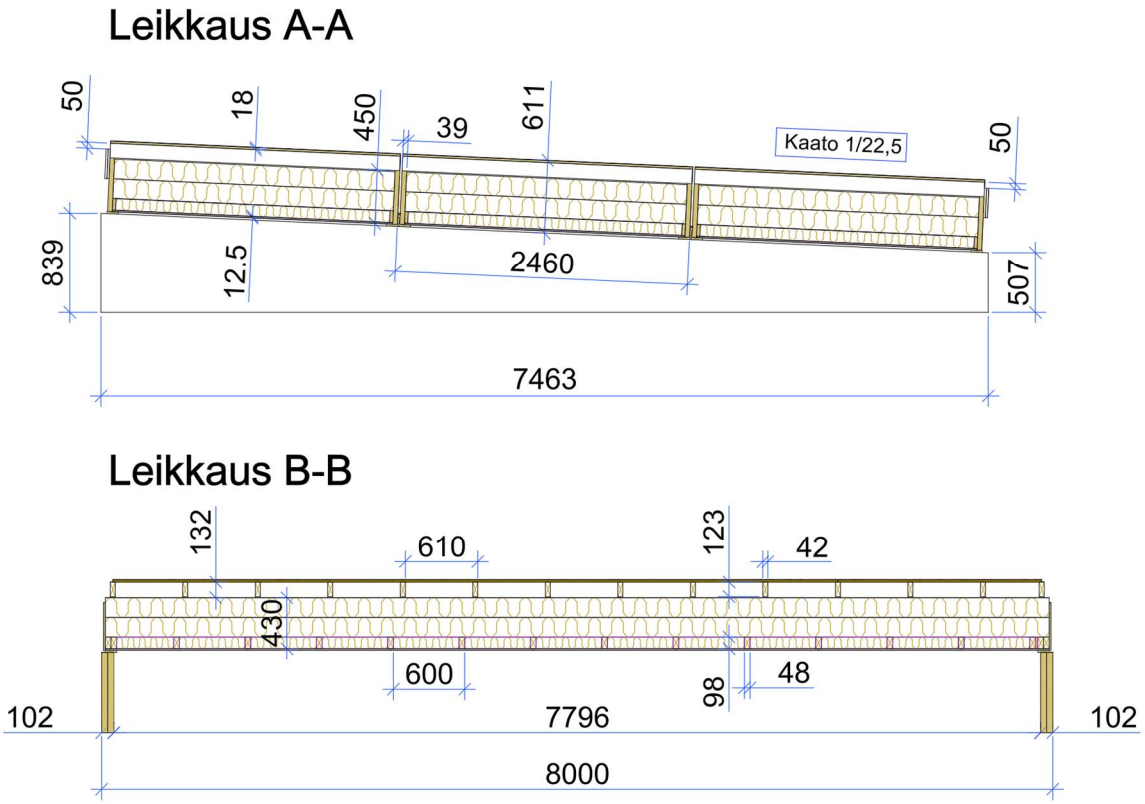
Testissä 1 koekappaleina oli kolme vierekkäistä noin 2,46 m leveää ja 8 m pitkää kattoelementtiä, joiden ympärille rakennettiin noin 5 metrin etäisyydelle noin 2,4 metriä korkeat tuulensuojaseinät (Kuva 4). Elementit kiinnitettiin päistään kertopuupalkkeihin, joissa oli 1:22,5 kaato, joka on tyypillinen kaltevuus puurakenteisilla kattoelementeillä.



Kuva 4. Koejärjestely testissä 1, yhteen suuntaan tuulettuvat elementit ja niitä ympäröivät tuulensuojaseinämät. Sytytysluukku rakenteen keskellä.

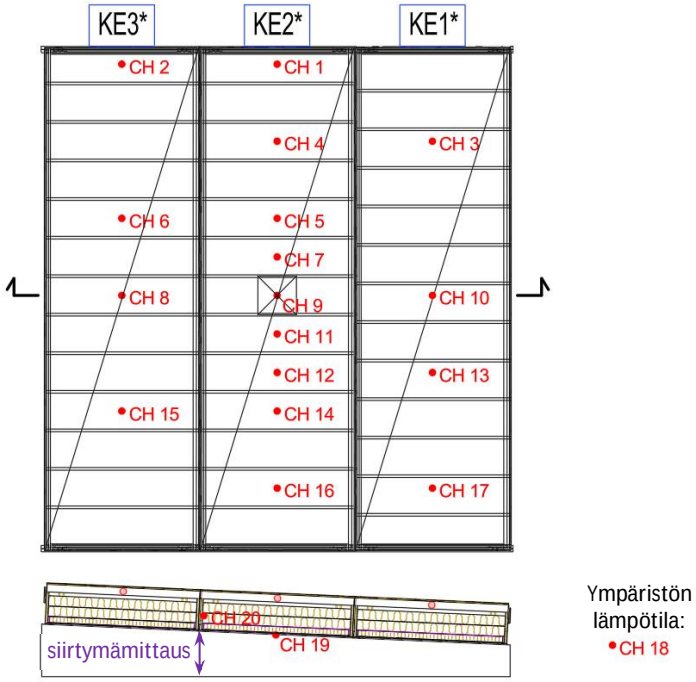
Testissä 1 tarkasteltiin yhteen suuntaan tuulettuvia elementtejä KE1 – KE3, joissa siis kattovasojen alapinnan ja lasivillan yläpinnan välistä ei tapahdu poikkisuuntaista ilmankiertoa (tai tämä rako on vain joitain millejä paksu, ks. Kuva 5). Kattoelementti KE1 asennettiin kuitenkin käänteisesti verrattuna elementtiin KE2, jolloin näiden väliin muodostuu kattovasojen epäjatkuvuuskohta (ks. Kuva 4), joka hieman lisää ilmankiertoa tuuletusvälistä toiseen (vastaavia epäjatkuvuuskohtia saattaa esiintyä myös oikeissa rakenteissa).

Seuraavassa kuvassa on esitetty leikkaukset testin 1 koerakenteesta (Kuva 5). Testin 1 kattoelementit koostuivat 39x450 LVL-pääkannattajista, joiden alareunassa oli 48x98 k600 koolaus ja yläpuolella 42x123 k610 kattovasat. Elementtien alapinnassa oli 12,5 mm tyypin A kipsilevy, jonka päällä oli noin 430 mm lasivillaa (alimman villakerroksen päällä höyrynsulkumuovi), ja elementtien yläpinnassa oli 18 mm OSB-levy sekä kaksinkertainen bitumikermi. Kattoelementtien reunoilla tuuletusväli on kuristettu 50 millimetriin OSB-levyillä, millä on pyritty simuloimaan kattoelementtirakenteen räystäitä, jotka eivät oikeissa yläpohjarakenteissakaan ole ulkoilmaan auki koko tuuletusvälin korkeudelta.



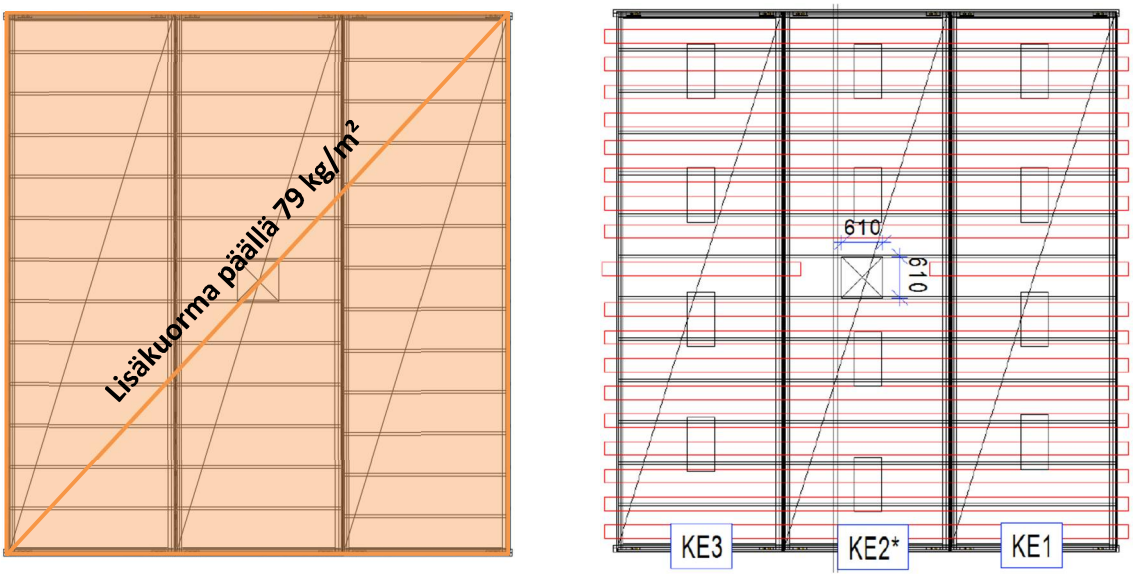
Kuva 5. Leikkaukset A-A ja B-B. Testi 1.

Testeissä lämpötilaa mitattiin termoparilangoilla yhteensä 20 mittapisteestä (Kuva 6), joka oli käytössä olleen dataloggerin kanavien maksimimäärä. Lämpötilaa mitattiin elementtien ontelotilasta 17 eri mittapisteestä sekä yksistä mittapisteissä keskimmäisen elementin alapinnassa ja LVL-pääkannattajan sivulta. Näiden lisäksi mitattiin ympäristön lämpötila testin aikana. Siirtymää mitattiin optisesti (videokamera + visuaalinen asteikko) kattoelementtien KE2 ja KE3 välisten pääkannattajien keskipisteestä.



Kuva 6. Lämpötilojen mittapisteet ja siirtymämittaus. Testi 1.

Polttokokeet suoritettiin kuormitettuina ja kokeeseen valittu kuormitus vastasi seuraavaa tilannetta: omat painot + ripustus 0,5 kN/m² + lumikuorma maassa 3,0 kN/m² (eo. arvot ominaisarvoja). Kuormitus valittiin siten, että sillä pyrittiin simuloimaan kattoelementeille tavanomaista 3-aukkoista rakennetta 1-aukkoisella koerakenteella Eurokoodin palotilanteen mukaisessa kuormitusyhdistelmässä. Koekuormituksen määritys ja siihen liittyvät laskelmat on kuvattu tarkemmin tämän raportin liitteessä A. Testissä 1 elementtien päälle tulevaksi lisäkuormaksi saatiin 79 kg/m², jonka vaikutusalue ulotettiin koko koerakenteen alueelle (Kuva 7). Koekuormitus toteutettiin betoniporsailla ja LVL-lankuilla (betoniporsaita 3960 kg + puupainoja 693 kg = yhteensä 4653 kg).

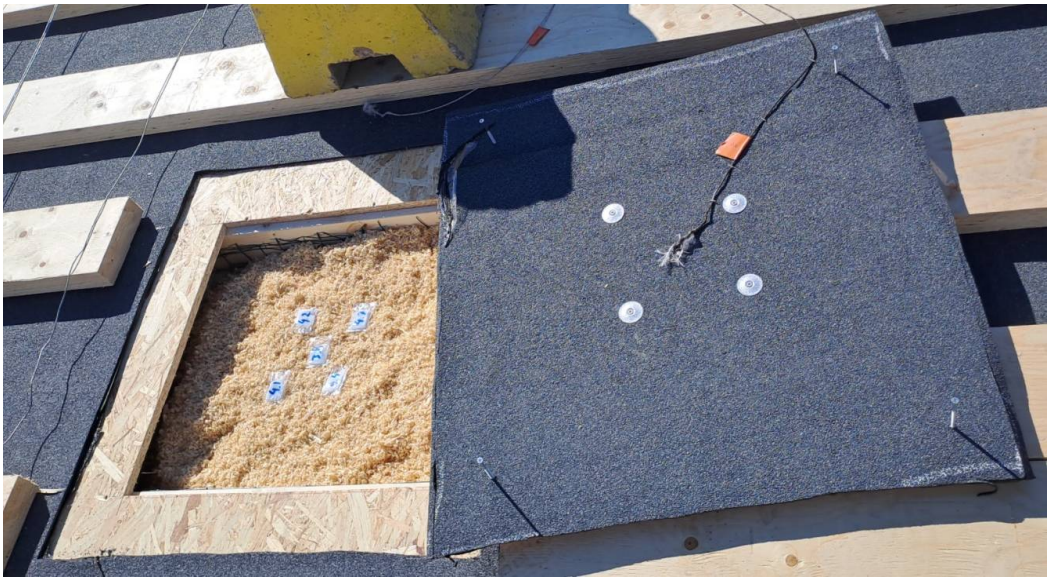


Kuva 7. Koekuormitus testissä 1. Vas.: Lisäkuorman laskennallinen jakautuminen testissä 1. Oik.: Koekuormituksen toteutus betoniporsailla ja kertopuulankuilla.

Polttokokeissa rakenteen keskionteloon pakotettiin vähintään n. 0,5 m/s ilmavirtaus käyttäen siirrettävää puhallinta (Kuva 8). Ilmavirtaus todennettiin elementin toisesta päästä suoritetuilla virtausmittauksilla. Puhaltimen suojelemiseksi se poistettiin koealueelta noin 30 minuutin ajanhetkellä testissä 1.

Kuva 8. Noin 0,5 m/s Ilmavirtauksen pakotus puhaltimella keskionteloon. Testi 1.

Koekappaleet sytytettiin rakenteen keskellä olevasta sytytysluukusta (Kuva 4), jonka testissä 1 koostui kahdesta limitetystä OSB-levystä, joka ruuvattiin kiinni luukun kulmista (Kuva 9). Alkupalokuormana käytettiin noin 2 kg kutterilastua + 5 kpl sytytyspusseja (n. 4 g/kpl, Mustang, >75 % parafiinia, <10 % urea formaldehydihartsia) ja varsinainen sytytys tehtiin nestekaasupolttimella.



Kuva 9. Sytytysluukku ja alkupalokuorma. Testi 1.

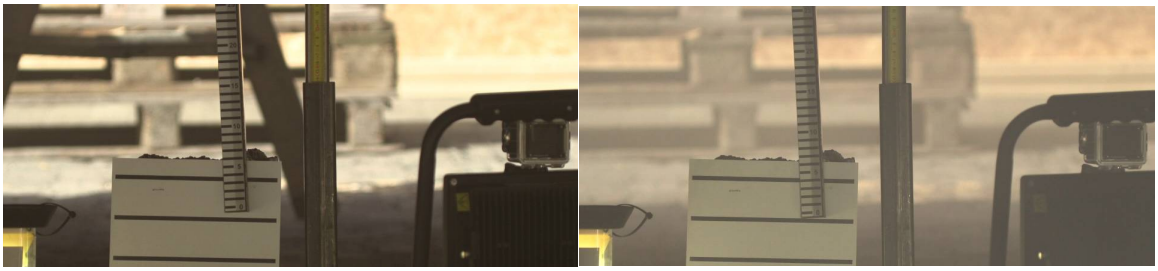
Kuva 10. Testin 1 koejärjestely ennen sytytystä.

3.2.2 Testi 1: Polttokokeen kulku

Seuraavissa kuvissa (Kuva 11) on kuvakaappauksia polttokoevideosta testin 1 eri ajanhetkillä. Testissä 1 rakenne siis sortui noin 41,5 minuuttia sytytyksen jälkeen.

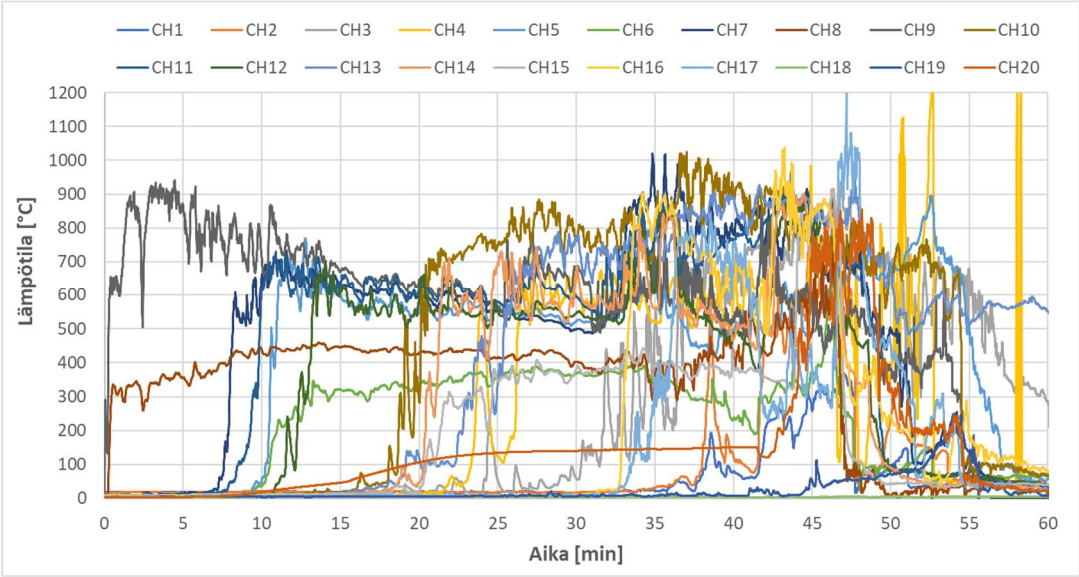
Kuva 11. Valokuvia polttokokeesta eri ajanhetkillä. Testi 1.

Seuraavassa kuvassa (Kuva 12) on esitetty siirtymämittari testin 1 alussa ja hieman ennen rakenteen romahtamista. Siirtymä ennen romahtamista siis oli n. 7 mm (mutta siirtymämittaus ei sijainnut romahtamisen kannalta kriittisimmässä paikassa).

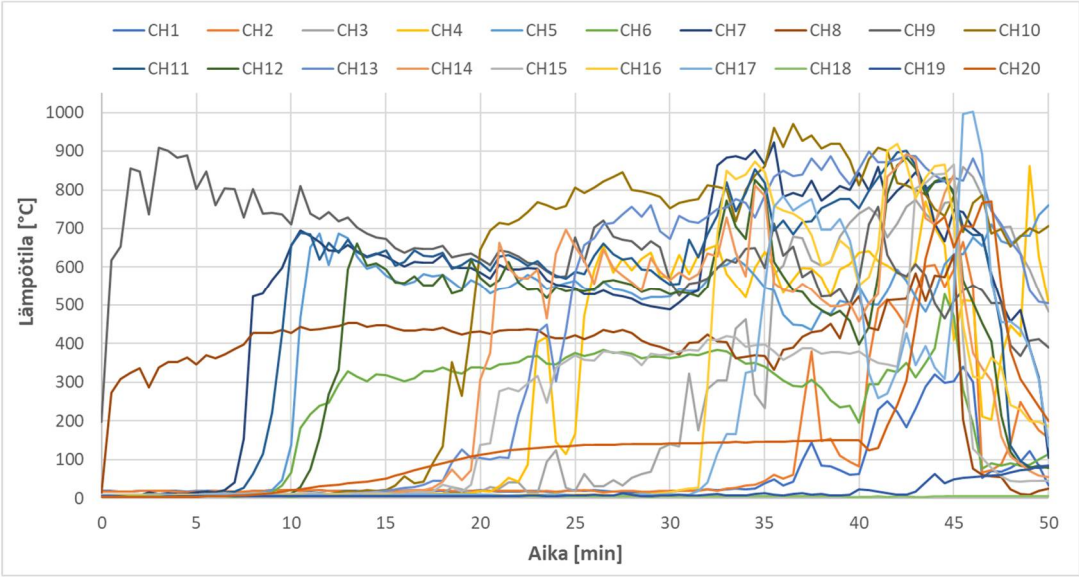


Kuva 12. Siirtymämittari testin 1 alussa ja hieman ennen rakenteen romahtamista.

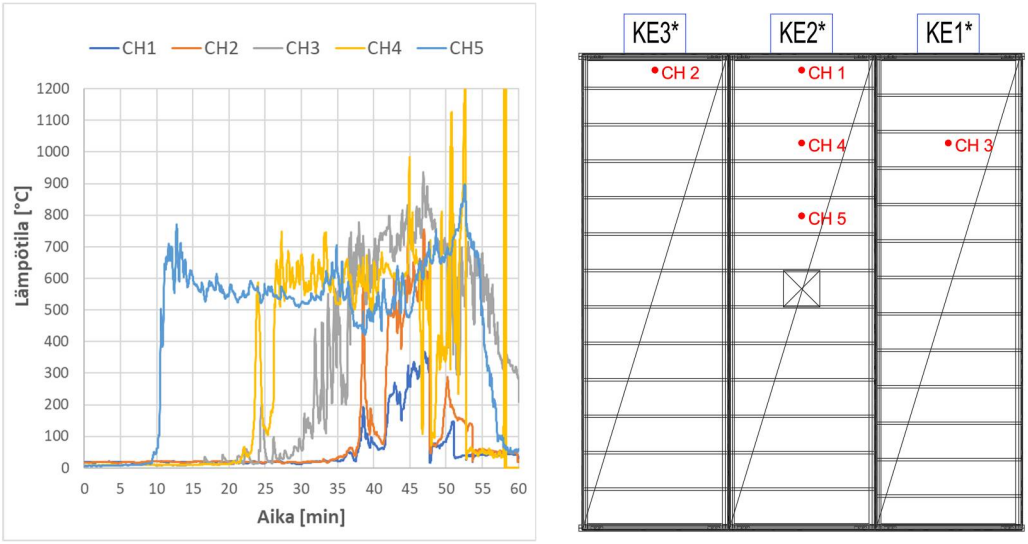
Seuraavissa kuvissa on esitetty lämpötilojen mittaustulokset testin 1 kaikista mittapisteistä (Kuva 13) sekä näistä lämpötiloista lasketut 30 sekunnin keskiarvokäyrät (Kuva 14), joista jälkimmäisestä on raportoitu myös lämpötiladata liitteessä B. Seuraavissa kuvissa (Kuva 15 – Kuva 18) on esitetty mittaustulokset myös jaoteltuna 5 mittarin ryhmiin tulosten tarkastelujen helpottamiseksi. Datan alku on synkronoitu sytytyshetken kanssa.



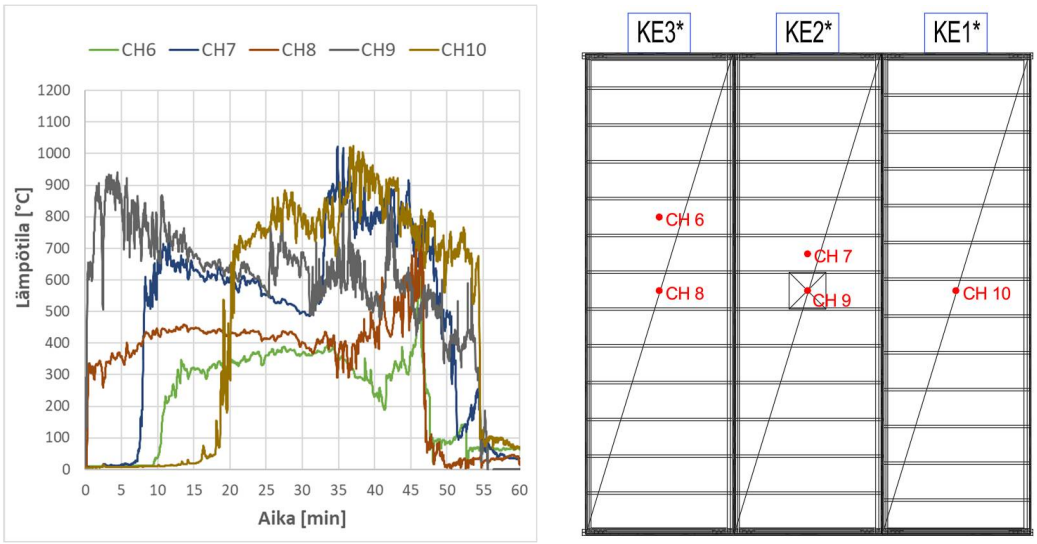
Kuva 13. Lämpötilojen mittaustulokset. Testi 1.



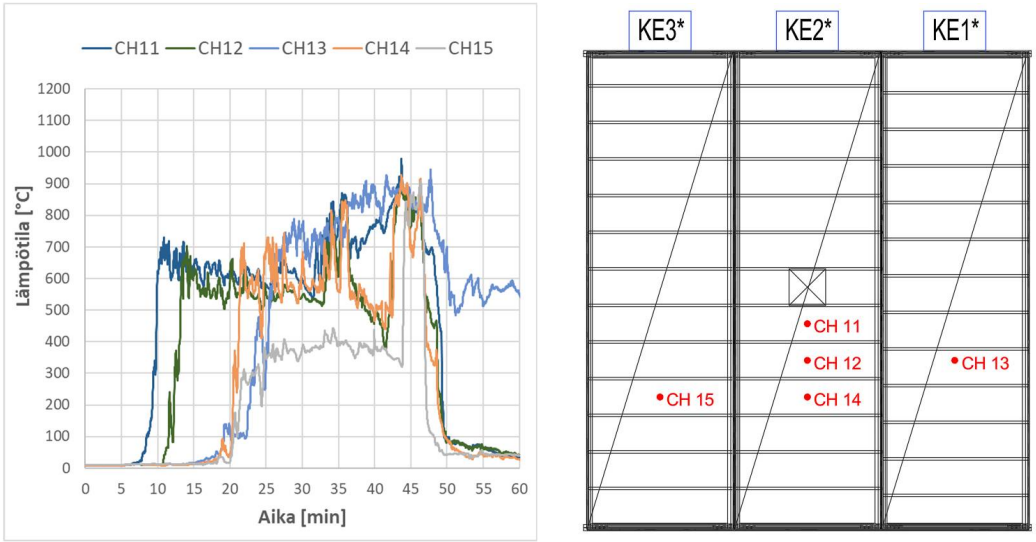
Kuva 14. Lämpötilojen mittaustuloksista lasketut 30 sekunnin keskiarvokäyrät. Testi 1.



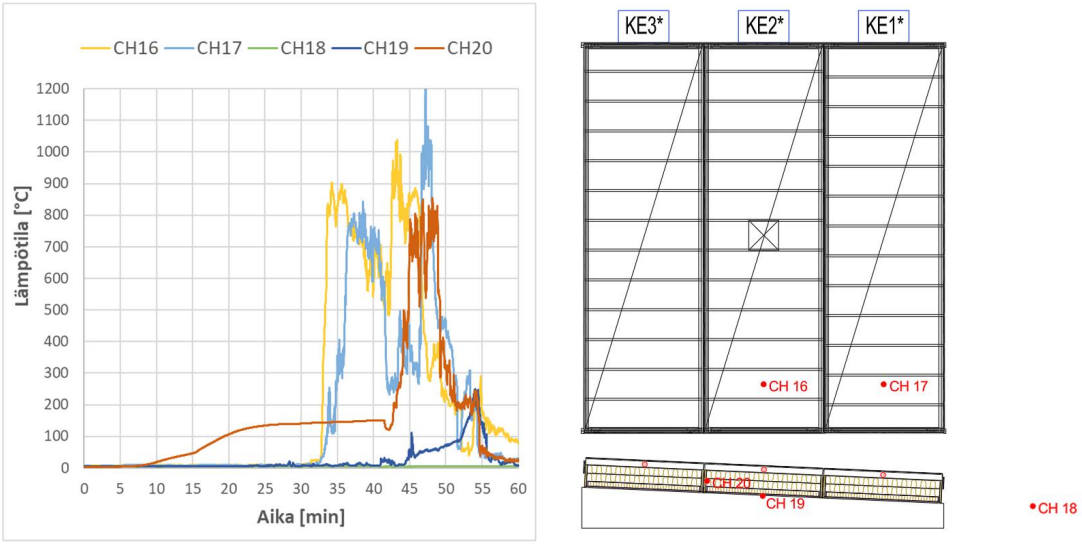
Kuva 15. Lämpötilamittareiden CH1 – CH5 mittaustulokset. Testi 1.



Kuva 16. Lämpötilamittareiden CH6 – CH10 mittaustulokset. Testi 1.



Kuva 17. Lämpötilamittareiden CH11 – CH15 mittaustulokset. Testi 1.

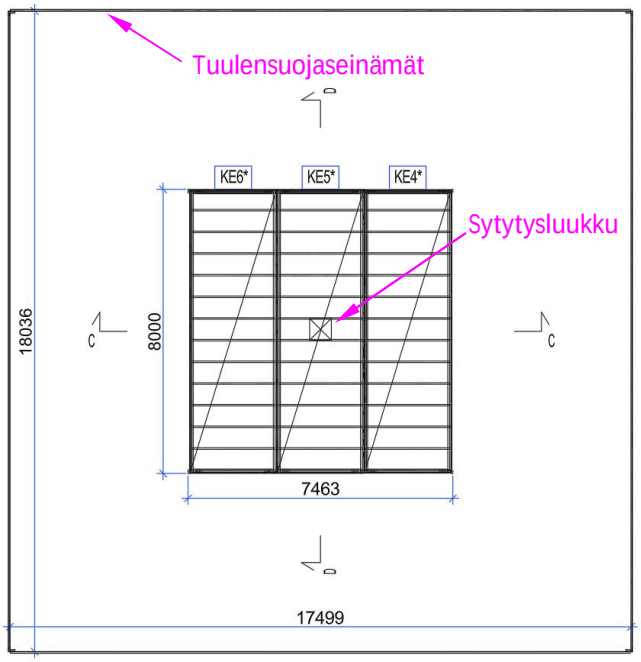


Kuva 18. Lämpötilamittareiden CH16 – CH20 mittaustulokset. Testi 1.

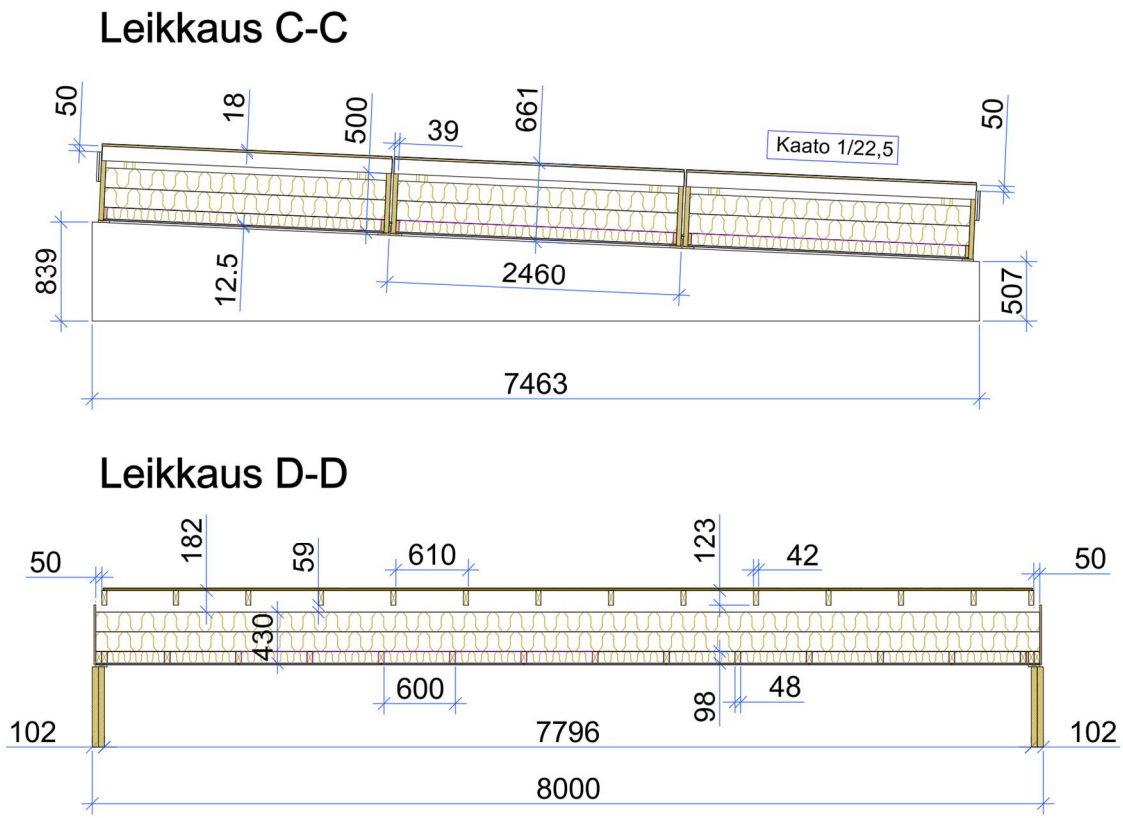
3.3 Testi 2: Ristiin tuulettuvat kattoelementit

3.3.1 Testi 2: Polttokokeen järjestelyt

Testissä 2 koejärjestelyt (Kuva 19) olivat hyvin samankaltaiset kuin testissä 1, mutta testissä 2 kattoelementit KE4 – KE6 olivat ristiin tuulettuvia, eli kattovasojen alapinnan ja lasivillan yläpinnan välissä oli noin 59 mm korkea rako, josta ilma pääsee liikkumaan myös rakenteen poikkisuuntaan (eli pääkannattajien suuntaisesti). Em. raon korkeus on villan nominaalisilla paksuuksilla laskettu arvo; koerakenteessa raon todellinen suuruus vaihteli riippuen lasivillojen turpoamisesta (rakenne kuitenkin vastasi tavanomaista ristiin tuulettuvaa kattoelementtiä). Ristiin tuulettuvuus oli testin 2 rakenteessa toteutettu testiin 1 verrattuna 50 mm korkeammilla 39x500 LVL-pääkannattajilla (Kuva 20).

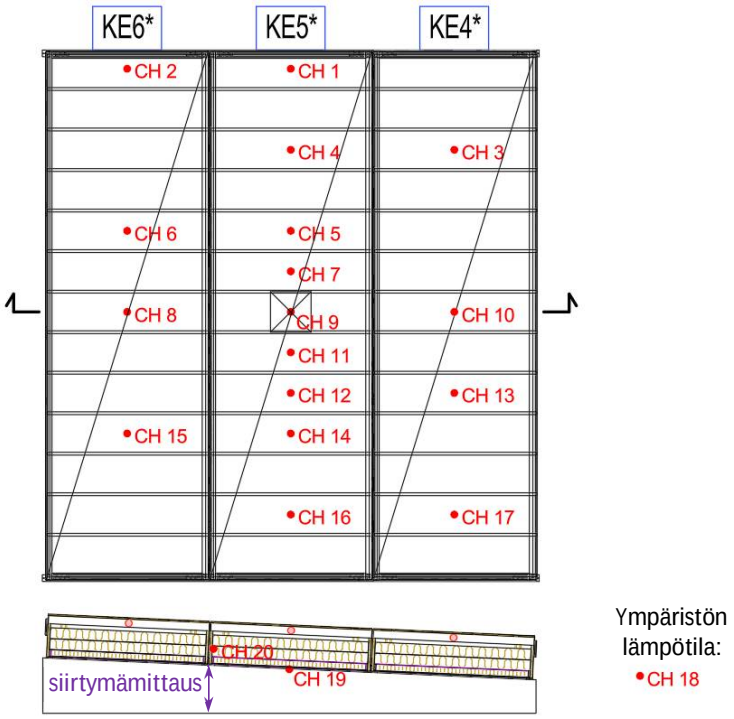


Kuva 19. Koejärjestely testissä 2, ristiin tuulettuvat elementit ja niitä ympäröivät tuulensuojaseinämät. Sytytysluukku rakenteen keskellä.



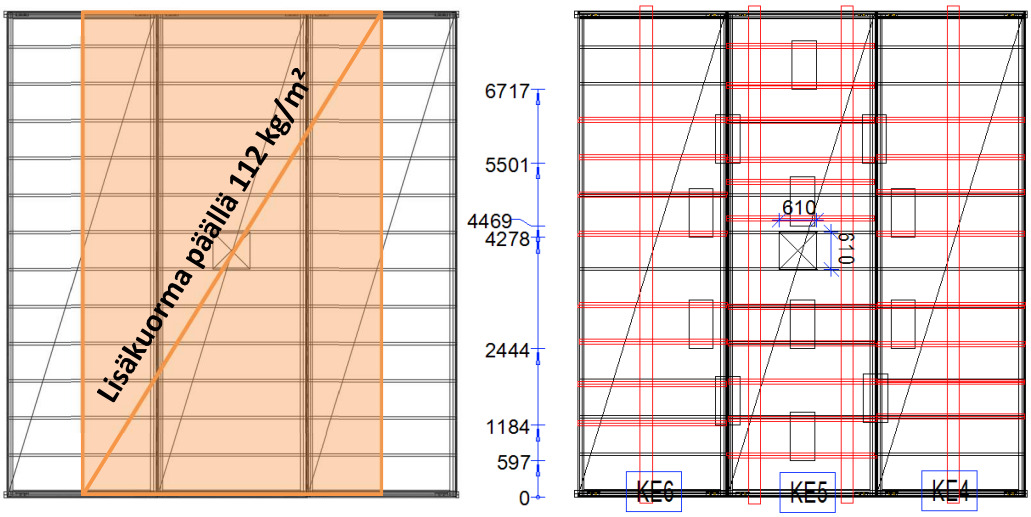
Kuva 20. Leikkaukset C-C ja D-D. Testi 2.

Testissä 2 lämpötilojen ja siirtymän mittaus (Kuva 21) suoritettiin täysin vastaavaan tapaan ja samalla numeroinnilla kuin testissä 1.



Kuva 21. Lämpötilojen mittapisteet ja siirtymämittaus. Testi 2.

Testiin 2 koekuormitusta muutettiin siten, että kattoelementtien päällä oleva lisäkuorma rajattiin pois reunimmaisten elementtien reunimmaisilta puolikkailta (ks. Kuva 22 ja selostukset tehdyn muutoksen syistä kappaleesta 4.1). Lisäksi kuorman suuruutta kasvatettiin arvoon 112 kg/m² johtuen 50 mm korkeammista LVL-pääkannattajista (ks. selostus liitteessä A). Koekuormitus toteutettiin edelleen betoniporsailla ja LVL-lankuilla (betoniporsaita 3960 kg + puupainoja 450 kg = yhteensä 4410 kg).



Kuva 22. Koekuormitus testissä 2. Vas.: Lisäkuorman laskennallinen jakautuminen testissä 2. Oik.: Koekuormituksen toteutus betoniporsailla ja kertopuulankuilla.

Testissä 2 rakenteen keskionteloon pakotettiin vähintään n. 0,5 m/s ilmavirtaus (Kuva 23) vastaavaan tapaan kuin testissä 1, mutta tuulisuus oli huomattavasti suurempaa toisena testipäivänä kuin ensimmäisenä (ks. kappale 4.1). Testissä 2 puhallin poistettiin koealueelta noin 15 minuutin ajanhetkellä.

Kuva 23. Noin 0,5 m/s Ilmavirtauksen pakotus puhaltimella keskionteloon. Testi 2.

Lisäksi testissä 2 koekappaleen sytytysluukun rakennetta vahvistettiin testiin 1 verrattuna lisäämällä luukkuun kolmas OSB-levykerros, rimakaulukset ja tiheämpi ruuvaus kanteen (ks. Kuva 24 ja selostukset tehdyn muutoksen syistä kappaleesta 4.1). Alkupalokuorma ja sytytystapa olivat testissä 2 samoja kuin testissä 1.

Kuva 24. Sytytysluukku ja alkupalokuorma. Testi 2.

Kuva 25. Testin 2 koejärjestely ennen sytytystä.

3.3.2 Testi 2: Polttokokeen kulku

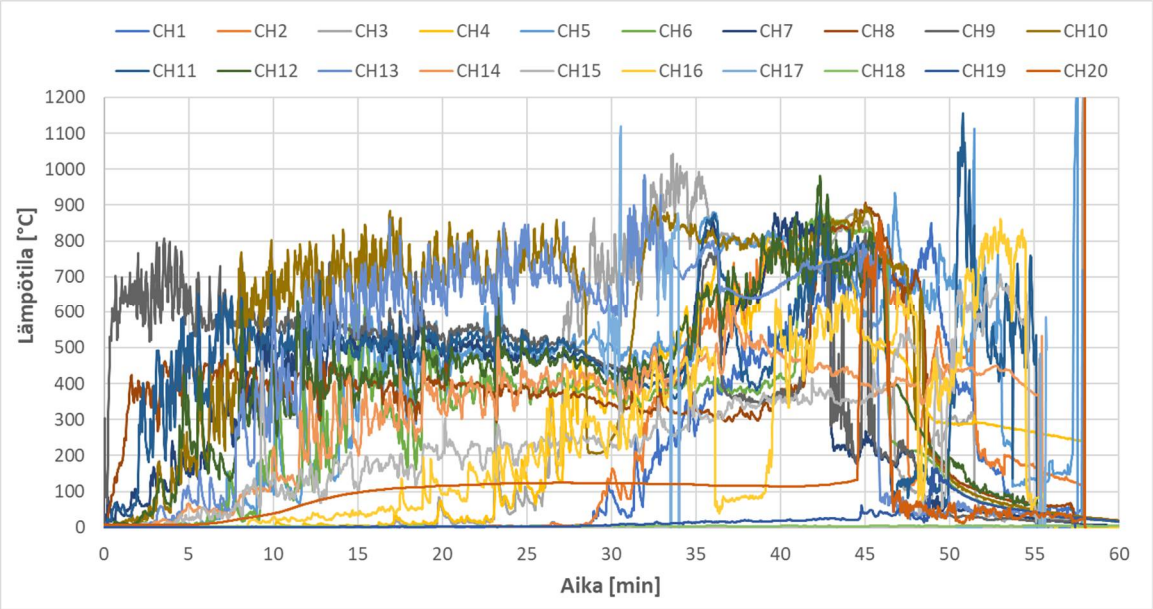
Seuraavissa kuvissa (Kuva 26) on kuvakaappauksia polttokoevideosta testin 2 eri ajanhetkillä. Testissä 2 rakenne siis sortui noin 44,5 minuuttia sytytyksen jälkeen.

Kuva 26. Valokuvia polttokokeesta eri ajanhetkillä. Testi 2.

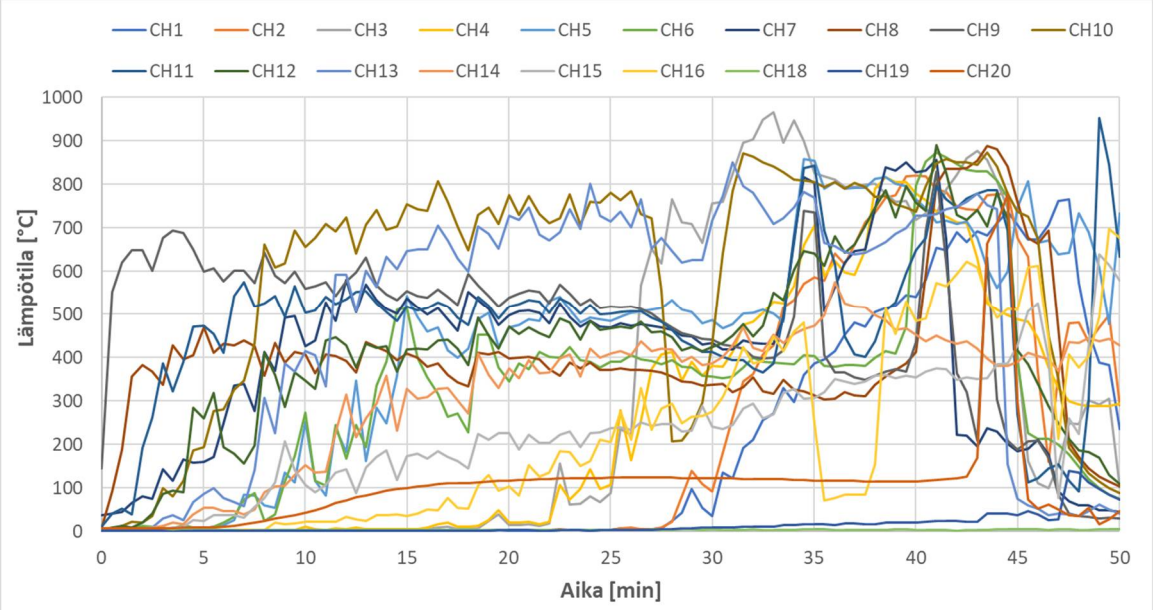
Seuraavassa kuvassa (Kuva 27) on esitetty siirtymämittari testin 2 alussa ja hieman ennen rakenteen romahtamista. Siirtymä ennen romahtamista siis oli n. 6 mm (mutta siirtymämittaus ei taaskaan sijainnut romahtamisen kannalta kriittisimmässä paikassa).

Kuva 27. Siirtymämittari testin 2 alussa ja hieman ennen rakenteen romahtamista.

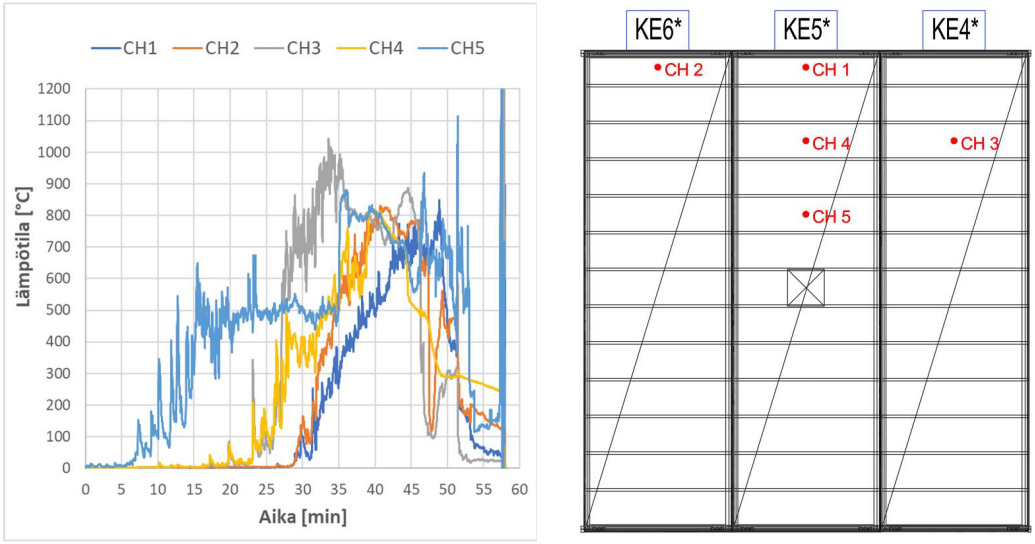
Seuraavissa kuvissa on esitetty lämpötilojen mittaustulokset testin 2 kaikista mittapisteistä (Kuva 28) sekä näistä lämpötiloista lasketut 30 sekunnin keskiarvokäyrät (Kuva 29), joista jälkimmäisestä on raportoitu myös lämpötiladata liitteessä B. Seuraavissa kuvissa (Kuva 30 – Kuva 33) on esitetty mittaustulokset myös jaoteltuna 5 mittarin ryhmiin tulosten tarkastelujen helpottamiseksi. Datan alku on synkronoitu sytytyshetken kanssa.



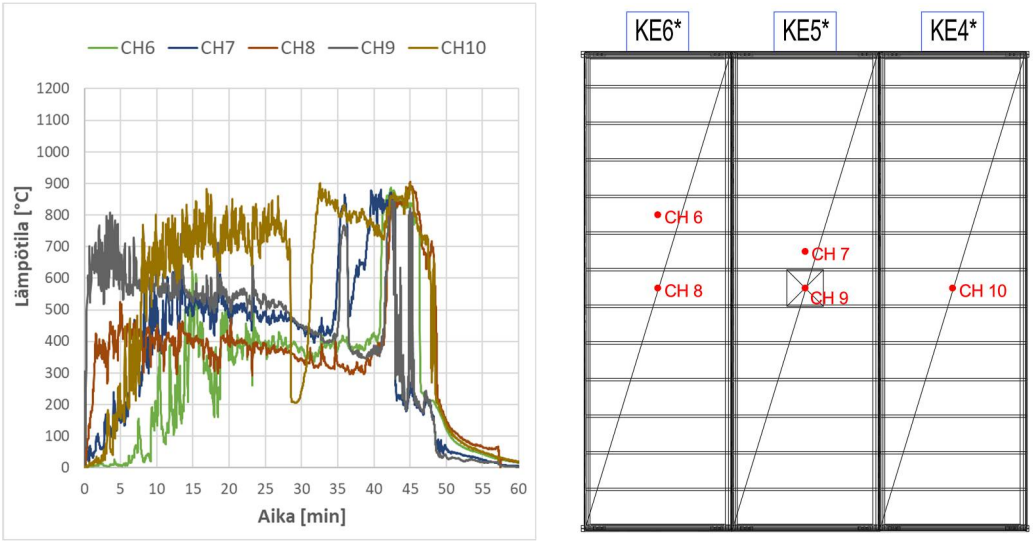
Kuva 28. Lämpötilojen mittaustulokset. Testi 2.



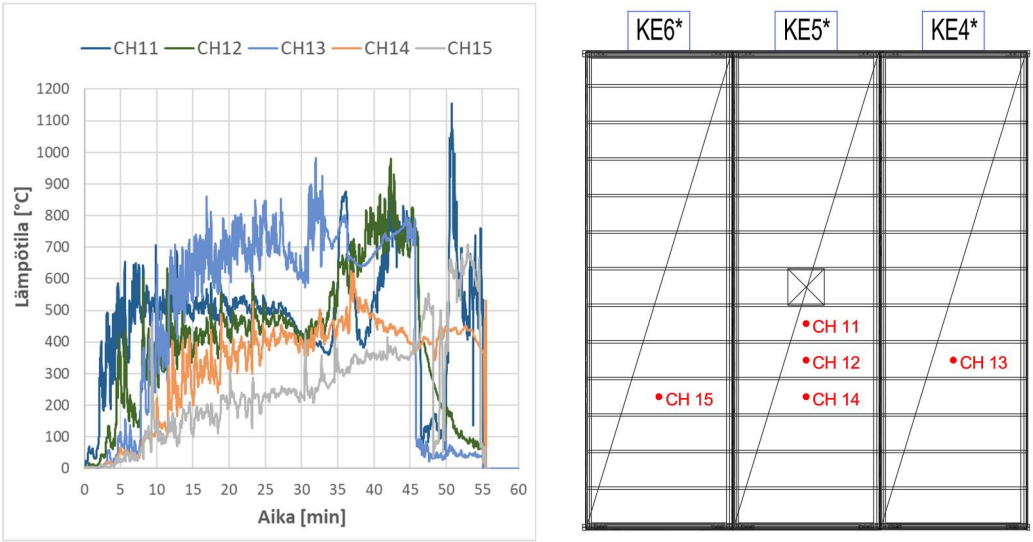
Kuva 29. Lämpötilojen mittaustuloksista lasketut 30 sekunnin keskiarvokäyrät. Testi 2.



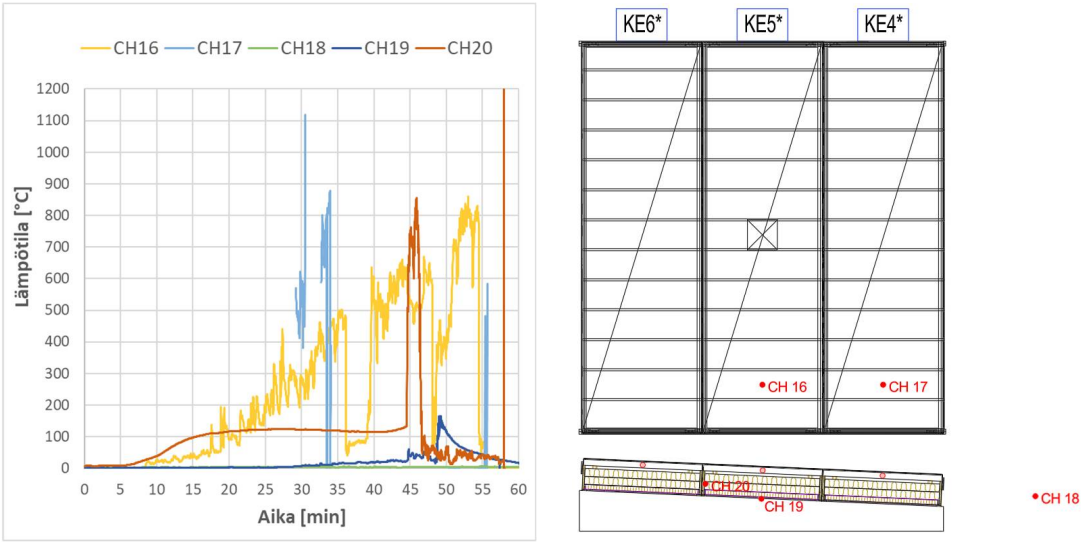
Kuva 30. Lämpötilamittareiden CH1 – CH5 mittaustulokset. Testi 2.



Kuva 31. Lämpötilamittareiden CH6 – CH10 mittaustulokset. Testi 2.



Kuva 32. Lämpötilamittareiden CH11 – CH15 mittaustulokset. Testi 2.



Kuva 33. Lämpötilamittareiden CH16 – CH20 mittaustulokset. Testi 2.

4 POLTTOKOKEIDEN ANALYSOINTI

4.1 Yleistä

Ulkoilman lämpötila testin 1 aikana oli n. 4,7 °C ja testin 2 aikana n. 3,5 °C. Lämpötilaolosuhteita voidaan pitää suhteellisen edustavina tavanomaisista lämpötilaolosuhteista Suomessa, kun koko Suomen keskilämpötila on noin 2,9 astetta [8].

Tuulisuojaseinämien ulkopuolella tuulennopeudet olivat testin 1 aikana noin 1 – 2 m/s ja testin 2 aikana noin 7 – 8 m/s [1]. Tuulisuojista huolimatta tuuli pääsi vaikuttamaan kohtalaisesti testialueelle ja sitä kautta myös elementtien tuuletusrakoihin. Lapwall Oy on omissa erillisissä tutkimushankkeissaan havainnut, että toteutuneiden rakennusten kattoelementtien tuuletusraoissa esiintyy keskimäärin noin 0,5 m/s ilmavirtaus. Näin ollen eteenkin testin 2 tulokset edustavat palon hapensaannin kannalta hieman ylikonservatiivista tilannetta. Hieman epäselväksi jäi myös se, kuinka suuri vaikutus keskionteloon suunnatulla puhaltimella oli ontelon todellisiin virtausolosuhteisiin, vai dominoiko tuuliolosuhteet ilmavirtauksia täysin. Jos vastaavia polttokokeita tehdään joskus uudelleen, kannattaa harkita tuulensuojaseinien korottamista testeissä olleesta noin 2,4 metristä hieman korkeammiksi tai suorittaa testit tyynenä päivänä.

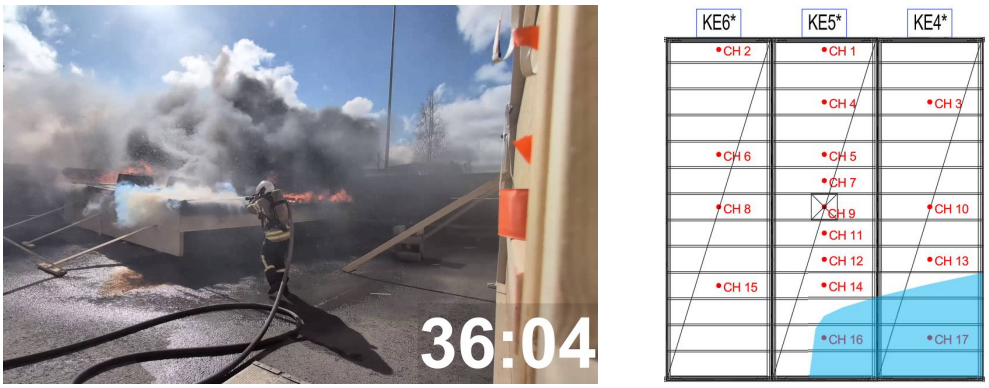
Testin 1 aikana tehtiin myös tiettyjä havaintoja, joiden perusteella suoritettiin pienehköjä muutoksia heti testin 2 koejärjestelyihin. Nämä muutokset koskivat sytytysluukkua ja koekuormituksen järjestämistä.

Testin 1 aikana havaittiin liekehtimistä sytytysluukun saumoista melko aikaisessa vaiheessa, jonka seurauksena liekehdintä luukun kohdalla kasvoi lopulta suhteellisen voimakkaaksi (ks. Kuva 11). Liekehtiminen luukun alueen kautta vie testituloksia todennäköisesti hieman konservatiiviseen suuntaan, koska ontelopalo sai tällöin hieman enemmän happea mitä todellisessa yläpohjarakenteessa. Tästä johtuen testiin 2 sytytysluukkua vahvistettiin lisäämällä luukun päälle ylimääräinen OSB-levy, rimakaulukset ja tiheämpi ruuvaus kanteen. Testissä 2 liekehtimistä luukun saumojen läpi ei enää vastaavalla tavalla tapahtunut, vaan koekappaleen pinta toimi enemmän yhtenäisenä levykenttänä. Jos vastaavia polttokokeita tehdään joskus uudelleen, kannattaa niissä soveltaa testin 2 sytytysluukun rakennetta.

Testin 1 lopussa huomattiin myös pienehkö ajatusvirhe koekuormituksen järjestämisessä. Testissä 1 lisäkuorma oli ulotettu koko koekappaleen alueelle (ks. Kuva 7), mutta tämä on periaatteellisesti hieman väärin johtuen siitä, että reunimmaisella LVL-pääkannattajalla on koerakenteessa vain toispuoleinen kiepahdustuenta ja toinen puoli on vapaa. Todellinen kattorakenne kuitenkin ulottuisi yhtenäisenä paljon pidemmälle, tai vastaavasti jos palo syttyisi lähellä katon reunaa olisi reunimmaista palkkia vahvistettu kiepahdusta vastaan esim. suurentamalla palkin poikkileikkausta. Testissä 1 rakenne sortui juurikin tällaisen reunimmaisen palkin pettäessä (eli elementin KE1 vapaa reuna, ks. Kuva 4). Testin 1 sammutuksen jälkeen tehtyjen havaintojen perusteella elementtien KE1 ja KE2 väliset pääkannattajat olivat kuitenkin hyvin voimakkaasti hiiltyneitä, joten korjatulla koekuormituksellakaan rakenne ei olisi kestänyt kuin korkeintaan yksittäisiä

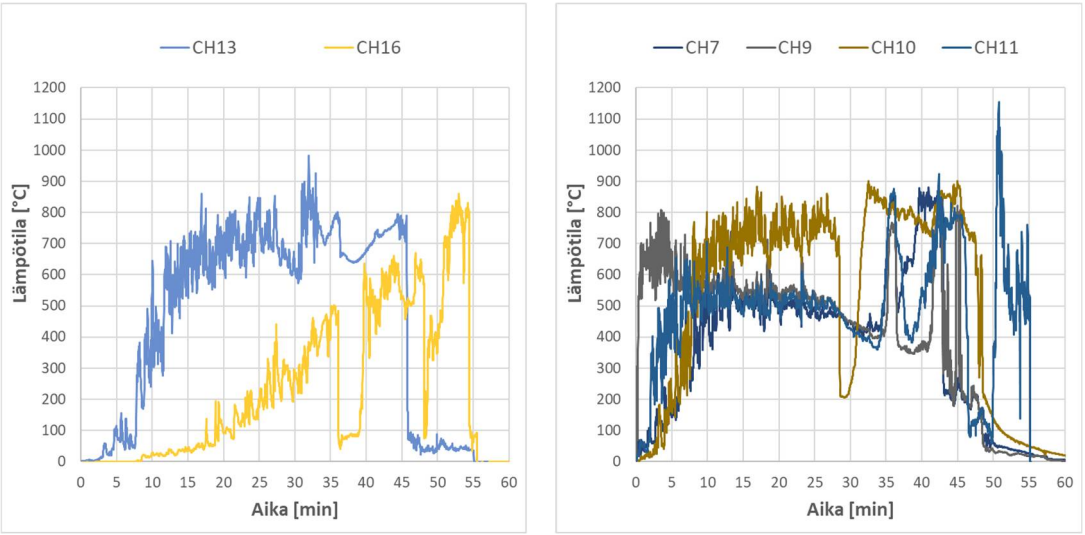
minuutteja pidempään. Virheen vaikutukset jäivät siis marginaalisiksi, eikä sillä ole vaikutusta tarkasteluista tehtäviin johtopäätöksiin. Koekuormitus kuitenkin korjattiin testiin 2 poistamalla lisäkuormitus reunimmaisten elementtien vapaan reunan puolelta (ks. Kuva 22), jolloin polttokokeessa varsinaisesti tutkittava alue rajautuu vain tälle kuormitetulle alueelle. Jos vastaavia polttokokeita tehdään joskus uudelleen, kannattaa niissä soveltaa testin 2 kuormitusperiaatetta tai vahvistaa reunimmaisia pääkannattajia.

Lisäksi testissä 2 tapahtui kommunikaatiovirheen takia lyhytkestoinen ennenaikainen sammutusyritys, joka kesti noin ajanhetkestä 36:00 ajanhetkeen 36:25 (Kuva 34). Sammutusyritys rajautui mittapisteen CH17 nurkan ympäristöön.



Kuva 34. Lyhytkestoinen ennenaikainen sammutusyritys testissä 2 ja arvio vedellä kastuneesta alueesta.

Sammutusyrityksen lähimmistä mittapisteistä CH13 ja CH16 (CH17 olisi oikeasti lähin mittapiste, mutta tämä mittari oli testissä 2 vikaantunut) on havaittavissa noin 5 minuuttia kestävä lämpötilan lasku sammutusyrityksen jälkeen (Kuva 35 vas.). Keskialueen mittareista, joka on rakenteen palonkestävyyden kannalta huomattavasti olennaisempi alue, on puolestaan vaikeampi tulkita, paljonko sammutusyritys vaikutti koekappaleen keskialueen lämpötilankehitykseen vai johtuuko lämpötilojen vaihtelu enemmän yleisestä lämpötilojen seilaamisesta polttokokeen aikana (Kuva 35 oik.).



Kuva 35. Vas.: Ennenaikaista sammutusyritystä lähinnä olleiden mittapisteiden lämpötilan kehitys. Oik.: Keskialueen mittapisteiden lämpötilankehitys.

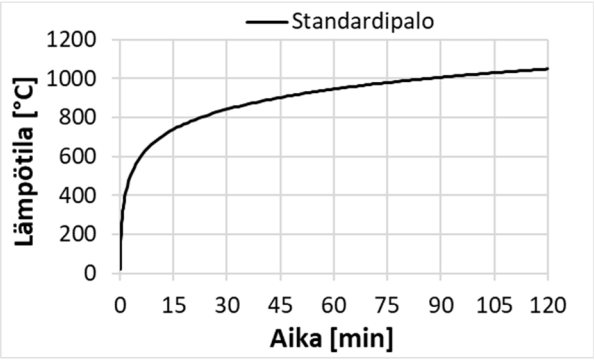
Koska ennenaikaisen sammutusyrityksen vaikutukset ainakin pääasiassa rajoittuvat nurkka-alueelle ja koska keskialueen mahdollisen lämpötilan laskun vaikutus tulee automaattisesti huomioitua näihin lämpötiloihin sovellettavassa laskentamenetelmässä (ks. kappale 4.2), voidaan arvioida, että ennenaikaisen sammutusyrityksen vaikutukset tarkasteluista tehtäviin johtopäätöksiin jäävät vain vähäisiksi.

Yleisenä kehityskohteena mahdollisiin tuleviin vastaaviin polttokokeisiin voidaan mainita lämpötilamittapisteiden lisääminen. Erityisesti jännevälin keskikohtaan suoraan pääkannattajien yläpuolelle olisi hyvä sijoittaa lämpötilan mittapisteet pääkannattajiin kohdistuvan palorasituksen tarkempaa tarkastelua varten. Myös kattoelementtien alapintaan olisi järkevää sijoittaa enemmän kuin nyt testeissä olleet yhdet mittapisteet. Lisäksi siirtymämittaus kannattaisi siirtää elementtien KE1-KE2 sekä KE4-KE5 välisiin pääkannattajiin, koska kriittinen kohta muodostui alkuarvioista poiketen tälle alueelle.

Tutkimushankkeessa suoritetut polttokokeet olivat testityypiltään uniikkeja, joten tutkimushankkeeseen kuului sekä polttokokeiden suorittaminen että itse sovellettavan koemenetelmän kehittäminen. Näin ollen on luonnollista, että tällaisessa koesarjassa esiintyy vielä pieniä virheitä testien järjestelyissä ja suorittamisessa. Kokonaisuuden kannalta suoritettuja testejä voidaan kuitenkin pitää hyvin onnistuneena ja saaduista tuloksista on mahdollista vetää johtopäätöksiä kattoelementtien palonkestävyydestä ontelopaloissa. Kokeista mitatulle lämpötiladatalle on tehty laskennallisia jatkotarkasteluja ja nämä analyysit on esitetty seuraavissa kappaleissa (kappaleet 4.2 ja 4.3). On myös syytä huomata, että koska suoritetut testit eivät ole standardoituja polttokokeita, eikä sopivaa testistandardia ei ole edes olemassa, ovat saadut tulokset joka tapauksessa indikatiivisia. Tällöin tärkeintä on saatujen tulosten suuruusluokan tarkastelu, eikä niinkään minuutilleen tarkat palonkestoajat.

4.2 Laskentamenetelmät ja hyväksymiskriteerit

Kattoelementit sortuivat testissä 1 noin 41,5 minuuttia ja testissä 2 noin 44,5 minuuttia palon syttymisen jälkeen. Paloasetuksissa 848/2017 ja 927/2020 [3, 4] on annettu ajallisia palonkestovaatimuksia eri rakenteille ja niiden ominaisuuksille (ks. kappale 2), jotka ilmoitetaan minuuteissa. Suomen palomääräyksissä nämä minuutit tarkoittavat kuitenkin aina palonkestoa standardipalokäyrän mukaisessa lämpötilarasituksessa (Kuva 36). Näin ollen standardipalosta poikkeavista palorasituksista mitattuja minuutteja (eli kuten em. sortuma-ajat) ei voida suoraan verrata palomääräyksissä oleviin minuutteihin.



Kuva 36. Standardipalon (ISO 834) lämpötila-aikakäyrä.

Mitattujen palorasitusten voimakkuuksia voidaan kuitenkin suhteuttaa standardipaloon esimerkiksi ekvivalentin standardipaloaltistuksen menetelmällä eli energiakertymien vertailuna. Menetelmässä vertaillaan tarkasteltavasta palorasituksesta mitattujen lämpötilojen perusteella laskettujen nettolämpövoiden [kW/m²] kuljettamaa energiaa [MJ/m²] standardipalon nettolämpövuon [kW/m²] kuljettamaan energiaan [MJ/m²].

Ekvivalentti standardipaloaltistus voidaan laskea seuraavasta kaavasta energioiden yhtälönä:

$$E = \int_0^{t_{fire}} \dot{h}_{net,fire}\, dt = \int_0^{t_{ISO}} \dot{h}_{net,iso}\, dt \qquad (1)$$

missä

$\dot{h}_{net,fire}$ on tarkasteltavasta palorasituksesta laskettu nettolämpövuo [kW/m²],
$\dot{h}_{net,iso}$ on standardipalon mukainen nettolämpövuo [kW/m²],
t_{fire} on tarkasteltavan palorasituksen ajallinen pituus [min] ja
t_{ISO} on standardipalon pituus [min] (eli ekvivalentti R-luokka), joka vastaa tarkasteltavasta palorasituksesta saatua mitoituspalon nettolämpövuon kuljettamaa energiaa [MJ/m²]. Tämä voidaan ratkaista eo. yhtälöstä numeerisesti.

Rakenneosan pintaan vaikuttavat nettolämpövuot [kW/m²] voidaan puolestaan laskea seuraavasta Eurokoodin kaavasta [9]:

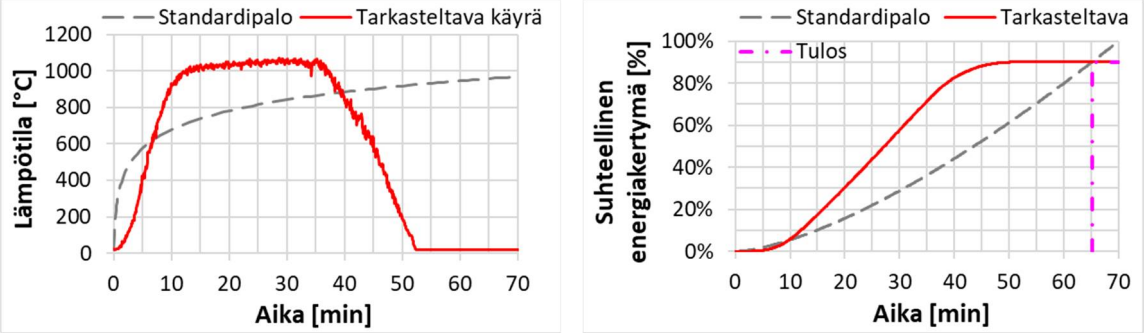
$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} = \alpha_c(\Theta_g - \Theta_m) + \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma[(\Theta_r + 273°C)^4 - (\Theta_m + 273°C)^4] \qquad (2)$$

missä

$\dot{h}_{net,c}$ on nettolämpövuon kuljettumalla siirtyvä osa [kW/m²],
$\dot{h}_{net,r}$ on nettolämpövuon säteilemällä siirtyvä osa [kW/m²],
α_c on kuljettumisen lämmönsiirtokerroin [W/m²K],
ε_m on rakenneosan pinnan säteilykerroin,
ε_f on palon säteilykerroin (yleensä 1,0),
σ on Stefan-Boltzmann-vakio (5,6704 · 10^{-8} W/m²K⁴),
Θ_m on pinnan lämpötila, joka esitetyssä ekvivalentin standardipaloaltistuksen menetelmässä pidetään vakioarvona koko tarkastelun ajan (esim. 20 °C),
Θ_g on kaasun lämpötila palolle altistetun rakenneosan lähellä (eli kullakin ajanhetkellä tarkasteltavasta palosta mitattu lämpötila tai standardipalokäyrän lämpötila) [°C] ja
Θ_r on paloympäristön tehollinen säteilylämpötila (eli kullakin ajanhetkellä tarkasteltavasta palosta mitattu lämpötila tai standardipalokäyrän lämpötila) [°C].

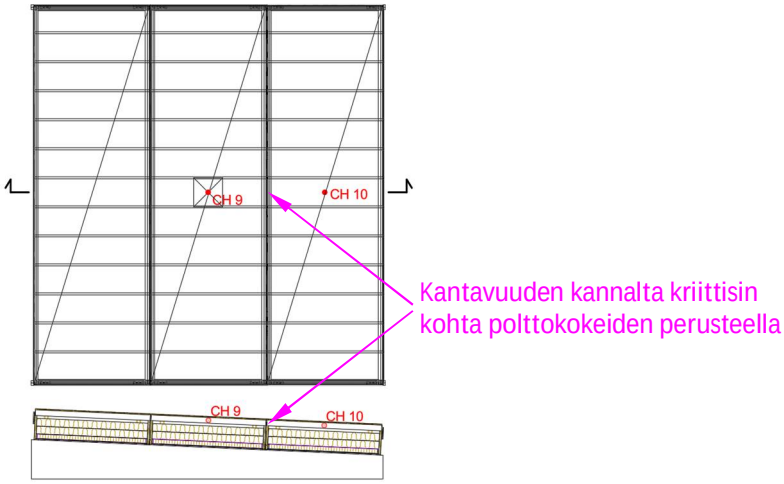
Ekvivalentti-standardipaloaltistus on kuitenkin melko karkea menetelmä, mutta koska suoritetut polttokokeet itsessään ovat vain indikatiivisia, voidaan menetelmää pitää riittävän tarkkana erityisesti tulosten suuruusluokkien tarkasteluun.

Seuraavassa kuvassa (Kuva 37) on esitetty esimerkki luonnollista paloa vastaavan ekvivalentin standardipaloaltistuksen määrittämisestä. Esimerkissä tarkasteltava noin 53 minuuttia kestävä palorasitus on siis tulipalon alussa ja lopussa kylmempi kuin standardipalo, mutta palon keskivaiheilla se puolestaan on kuumempi kuin standardipalo. Suorittamalla edellä esitetyt laskelmat, ekvivalentiksi standardipaloaltistukseksi siis saadaan tässä tapauksessa noin 65 minuuttia (eli esim. noin R65).



Kuva 37. Esimerkki ekvivalentin standardipaloaltistuksen laskemisesta. Tässä tapauksessa tarkasteltava lämpötilakäyrä vastaa siis noin 65 minuutin standardipaloa.

Polttokokeissa kantavuuden kannalta kriittisin kohta muodostui keskimmäisen kattoelementin ja katon kaltevuuden suhteen alemman elementin LVL-pääkannattajien kohdalle rakenteen jännevälin keskelle (Kuva 38).



Kuva 38. Rakenteen kantavuuden kannalta kriittisin kohta koepoltettujen kattoelementtien pääkannattajissa, sekä lämpötilan mittapisteet CH9 ja C10.

Polttokokeissa ei ollut kuitenkaan mittapistettä juuri tässä kohdassa, joten hyödynnetään lähimpien mittapisteiden CH9 ja CH10 lämpötilakäyriä. Näistä lämpötilakäyristä ei tulisi kuitenkaan laskea keskiarvoa, koska lämpövuot eivät kasva lineaarisesti (vaan esim. säteilyvuo kasvaa lämpötilan neljänteen potenssiin, ks. kaava (2)). Kaava (1) voidaan kuitenkin helposti muokata tukemaan useampaa samanaikaista lämpötila-altistusta seuraavalla tavalla:

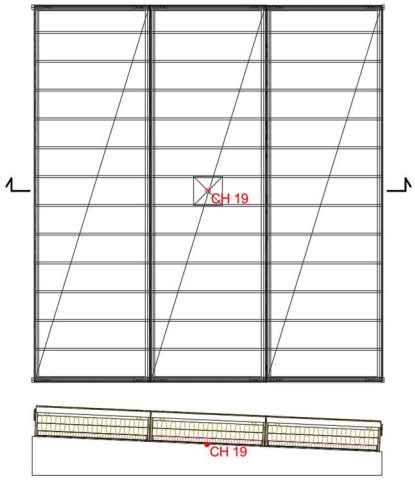
$$E = \sum_{k=1}^{n} \int_0^{t_{fire}} \dot{h}_{net,fire,k}\, dt = \sum_{k=1}^{n} \int_0^{t_{ISO}} \dot{h}_{net,ISO}\, dt \qquad (3)$$

missä

$\dot{h}_{net,fire,k}$ on kustakin tarkasteltavasta lämpötilakäyrästä laskettu nettolämpövuo ja

n on tarkasteltavien lämpötilakäyrien lukumäärä (eli nyt $n = 2$).

Eo. kaavoista saadaan siis arvio rakenteen paloteknisestä kantavuudesta, eli R-luokasta, nyt tutkittavissa ontelopaloissa. Kattoelementeille on kuitenkin asetettu myös osastoivuusvaatimuksia (EI-kriteeri, ks. kappale 2). Polttokokeissa kattoelementtien alapinnassa oli yksittäiset mittapisteet CH19 (Kuva 39), joiden perusteella voidaan tehdä arvioita osastoivuuden täyttymisestä ylhäältä alaspäin vaikuttavassa palossa.



Kuva 39. Lämpötilan mittapiste CH19 rakenteen alapuolella, jonka perusteella voidaan arvioida osastoivuuden täyttymistä.

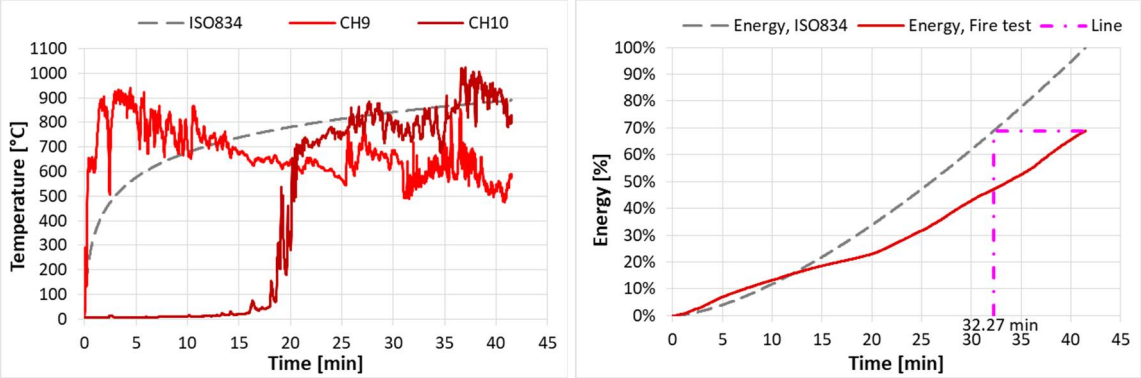
Rakenteen osastoivuuden täyttymisen arvioinnissa käytetään seuraavia hyväksymiskriteerejä:

- Rakenteen tiiviyden kriteeri (E-kriteeri):
  - Osastoivien rakenteiden testausstandardin SFS-EN 1363-1 [10] mukaisissa polttokokeissa rakenteen tiiviyden täyttyminen tarkastellaan pumpulitukkokokeella sekä rakotulkkikokeella. Näissä testeissä tiiviyden kriteerin voidaan kuitenkin arvioida täyttyvän riittävällä luotettavuudella, mikäli rakenteen alapuolelta ei näy liekehtimistä ja rakenteen eristävyyden hyväksymiskriteeri täyttyy.
    - Polttokokeista otettujen videoiden perusteella liekehtimistä rakenteen alapuolella ei näkynyt, joten tiiviyden kriteerin voidaan katsoa täyttyvän, mikäli eristävyyden lämpötilakriteeri täyttyy.
- Rakenteen eristävyyden kriteeri (I-kriteeri):
  - Eristävyyden hyväksymiskriteerinä voidaan soveltaa osastoivien rakenteiden testausstandardissa SFS-EN 1363-1 [10] esitettyjä raja-arvoja, eli lämpötila rakenteen kylmässä pinnassa (eli alapinnassa) ei saa nousta keskimäärin yli 140 astetta alkulämpötilasta (esim. 20 °C + 140 °C = 160 °C), eikä missään alapinnan pisteessä yli 180 astetta alkulämpötilasta (esim. 20 °C + 180 °C = 200 °C). Koska suoritetuissa polttokokeissa ei ollut kuin yksi alapinnan lämpötila mittapiste, valitaan eristävyyden kriteerin raja-arvoksi **140 °C lämpötilan nousu**.

4.3 Laskelmien tulokset

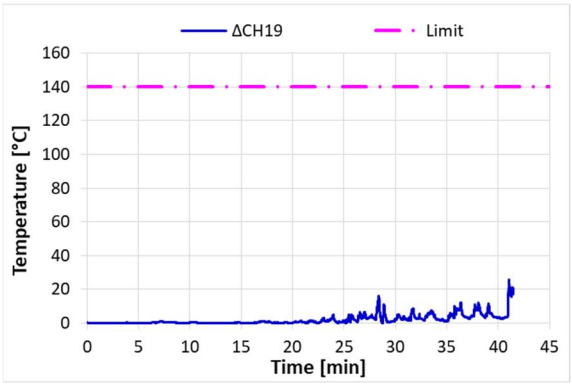
4.3.1 Testi 1: Yhteen suuntaan tuulettuvat kattoelementit

Seuraavissa kuvaajissa (Kuva 40) on esitetty ekvivalentin standardipalon määrittäminen testille 1. Tulosten perusteella testissä 1 LVL-pääkannattajiin kohdistui siis noin **32,3** minuutin standardipaloa vastaava palorasitus ennen sortumista (eli noin R32).



Kuva 40. Ekvivalentin standardipalon määritys testissä 1. Vas.: Lämpötilamittareiden CH9 ja CH10 mittaustulokset. Oik.: Lämpötilakäyriä CH9 ja CH10 vastaava standardipaloon suhteutetun energiakertymän kehittyminen.

Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 41) on esitetty tarkastelut osastoivuuden täyttymisestä testissä 1. Kuvaajasta nähdään, ettei lämpötila rakenteen alapinnassa ole lähelläkään osastoivuuden hyväksymiskriteerin raja-arvoa.

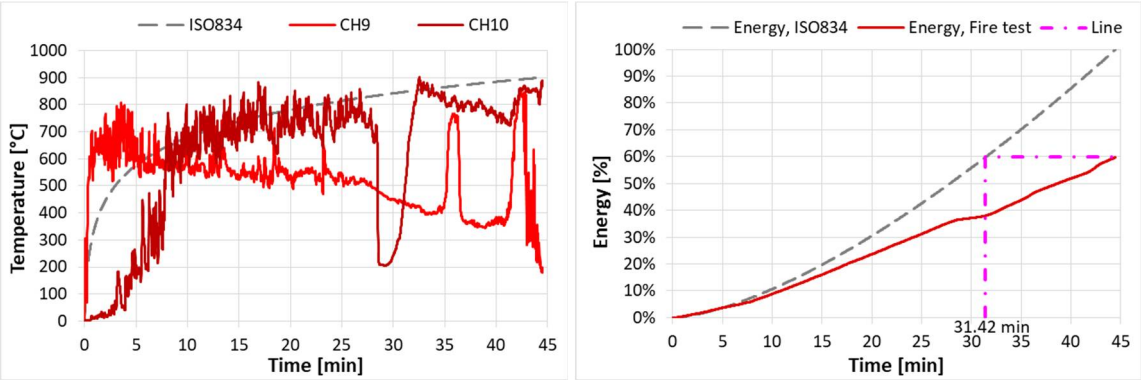


Kuva 41. Osastoivuuskriteerin täyttyminen testissä 1. Lämpötilamittarin CH19 vertailu hyväksymiskriteeriin.

Tulokset siis indikoivat, että yhteen suuntaan tuulettuvat kattoelementit täyttävät luokan REI30 yläpohjan ontelossa syttyvää tulipaloa vastaan.

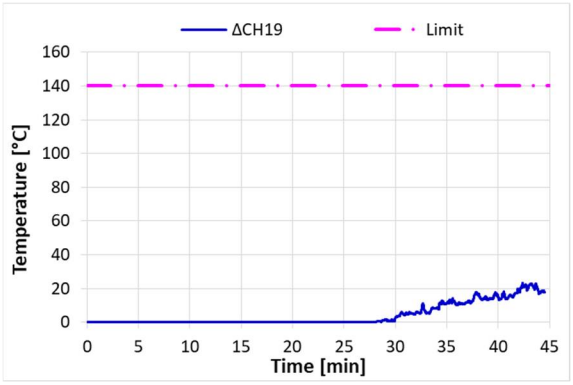
4.3.2 Testi 2: Ristiin tuulettuvat kattoelementit

Seuraavissa kuvaajissa (Kuva 42) on esitetty ekvivalentin standardipalon määrittäminen testille 2. Tulosten perusteella testissä 2 LVL-pääkannattajiin kohdistui siis noin **31,4** minuutin standardipaloa vastaava palorasitus ennen sortumista (eli noin R31).



Kuva 42. Ekvivalentin standardipalon määritys testissä 2. Vas.: Lämpötilamittareiden CH9 ja CH10 mittaustulokset. Oik.: Lämpötilakäyriä CH9 ja CH10 vastaava standardipaloon suhteutetun energiakertymän kehittyminen.

Seuraavassa kuvaajassa (Kuva 43) on esitetty tarkastelut osastoivuuden täyttymisestä testissä 2. Kuvaajasta nähdään, ettei lämpötila rakenteen alapinnassa taaskaan ole lähelläkään osastoivuuden hyväksymiskriteerin raja-arvoa.



Kuva 43. Osastoivuuskriteerin täyttyminen testissä 2. Lämpötilamittarin CH19 vertailu hyväksymiskriteeriin.

Tulokset siis indikoivat, että myös ristiin tuulettuvat kattoelementit täyttävät luokan REI30 yläpohjan ontelossa syttyvää tulipaloa vastaan.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokonaisuuden kannalta suoritettuja testejä voidaan pitää hyvin onnistuneena ja saaduista tuloksista on mahdollista vetää johtopäätöksiä kattoelementtien palonkestävyydestä ontelopaloissa. Lämpötiladatalle tehtyjen analyysien tulokset indikoivat, että sekä yhteen suuntaan tuulettuvat että ristiin tuulettuvat **kattoelementit täyttävät luokan REI30 yläpohjan ontelossa syttyvää tulipaloa vastaan.**

Jotta näistä polttokokeista tehtyjä johtopäätöksiä voitaisiin soveltaa myös polttokokeista hieman eroaville kattoelementtirakenteille, alla on listattu asioita, joiden muutoksella ei arvioida olevan merkittävää vaikutusta tämän raportin polttokokeiden tuloksiin tai joiden muutoksella vastaavasti voidaan arvioida olevan vaikutus polttokokeiden tuloksiin:

- Elementin alimpia kerroksia voidaan muuttaa (esim. muutoksen kipsilevyjen määrässä ja tyypissä sekä mahdolliset akustiikkavillat) ilman että se vaikuttaa ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin, kunhan kyseiset kattoelementit edelleen täyttävät vähintään REI30 luokituksen alhaalta ylöspäin vaikuttavassa palossa. Mikäli kyseiset elementit täyttävät vain luokan REI15/R15/R0 alhaalta ylöspäin, eivät ontelopolttokokeiden johtopäätökset ole enää voimassa. Tehtyjen polttokokeiden tulosten perusteella voidaan kuitenkin arvioida, että nämäkin elementit täyttäisivät vähintään luokituksen REI15 ontelopaloa vastaan.
- LVL-pääkannattajien dimensioita ja jänneväliä sekä yläpohjan kuormituksia voidaan muuttaa ilman että se vaikuttaa ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin, kunhan Eurokoodin sääntöjen mukaisesti laskettu palotilanteen taivutusjännitys $\sigma_{m,y,d,fi}$ pysyy alle arvon 10 MPa LVL-pääkannattajan alkuperäisellä poikkileikkauksella laskettuna (tämä raja-arvo koskee pääkannattajan jänteen keskialuetta; moniaukkoisten elementtien keskituilla sallitaan suurempi eri suuntainen taivutus. Ks. Liite A). LVL-pääkannattajan paksuuden tulee kuitenkin olla ≥ 39 mm, jotta ontelopolttokokeiden johtopäätökset pysyisivät voimassa.
- Lasivillaeriste voidaan vaihtaa kivivillaeristeeseen tai toiseen lasivillaeristeeseen ilman että se vaikuttaa ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin, mutta jos lämmöneristeeksi vaihdetaan lasivillaa palo-ominaisuuksiltaan huonompi eristemateriaali (esim. PIR eriste tai selluvilla) ei ontelopolttokokeiden johtopäätökset ole enää voimassa.
- Elementtien yläpinnan OSB-levyt voidaan vaihtaa vaneriksi ja bitumikermit voidaan vaihtaa PVC-katteeksi ilman että se vaikuttaa ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin.
- Kummassakin polttokokeessa katteen päällä oli huomattava määrä ylimääräistä puupainoista muodostuvaa palokuormaa. Tätä palokuormaa oli kummassakin testissä noin 200 MJ/m² (ks. Kuva 7 ja Kuva 22), joten katteen päällä saa olla korkeintaan tämän palokuorman verran palavasta materiaalista muodostuvia rakennelmia (esim. aurinkopaneeleita) ilman että ne vaikuttavat polttokokeiden johtopäätöksiin.
- Yläpinnan vasojen paksuus saa olla ≥ 42 mm ja jako ≤ 610 mm ilman että se vaikuttaa ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin.
- Tuuletusvälin korkeuden takia yläpinnan vasojen korkeus saa olla kuitenkin vain ≤ 123 mm ilman että se vaikuttaa ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin.

Vastaavasti ristiin tuulettuvissa elementeissä vasojen alapinnan ja villan yläpinnan välinen rako saa olla ≤ 60 mm (nominaalinen raon korkeuden arvo), ilman että se vaikuttaa ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin.
- Räystäillä tuuletusraot voivat olla ≤ 50 mm ilman että ne vaikuttavat ontelopolttokokeiden johtopäätöksiin.

Tutkimushankkeen kannalta oleellisimmat taulukkomitoituksen vaatimukset kattoelementeille voitiin tiivistää seuraavasti (ks. tarkemmat otteet paloasetuksista kappaleesta 2):

- Luokitukseen perustuvassa suunnittelussa kattoelementit mitoitetaan aina standardipaloa vastaan ja tämä mitoitus voidaan tehdä kokeellisesti, laskennallisesti tai näiden yhdistelmänä.
- Kattoelementtien kantavuusvaatimuksissa noudatetaan paloasetusten taulukkoa 3 (eli tämän raportin Taulukko 1). Lukuun ottamatta paloluokkaa P3, jossa kantavuusvaatimusta ei ole, ellei yläpohjaan samalla kohdistu ulkoista osastoivuusvaatimusta (esim. tietyissä rakennuksen viereisen korkeamman osan tapauksissa).
- Kattoelementtien kantavuusvaatimus on luokaltaan sama sekä alhaalta ylöspäin vaikuttavissa tulipaloissa että ylhäältä alaspäin vaikuttavissa tulipaloissa. Lisäksi kantavuuden luokkavaatimus on vähintään sama kuin kyseiseltä yläpohjalta edellytetty osastointivaatimus.
- P1 ja P2 paloluokan rakennuksissa kattoelementeille tulee aina vaakatasoinen osastointivaatimus, sillä yläpohjan alapuoleiset tilat on aina osastoitava erilleen kattoelementin ontelotiloista, kun näissä onteloissa esiintyy runsaasti (yli 20 %) palosuojaamattomia puupintoja. Luokkavaatimus tälle osastoinnille on:
    - Alapuolista paloa vastaan luokkavaatimus on alapuolisen tilan osastointivaatimus (ks. paloasetuksen taulukon 6 kohta yläpohjalle, eli tämän raportin Taulukko 2).
    - Yläpuolista paloa vastaan luokkavaatimus on alapuolisen tilan osastointivaatimus, kuitenkin jos palon leviäminen räystäältä yläpohjan onteloon on estetty EI 30-rakennusosaa vastaten ja yläpohjan ontelossa syttymisen vaara on tehokkaasti estetty, vaatimus on vähintään EI 30. Ellei sitten ulkoisesti kattoelementin yläpuolelta rakenteeseen kohdistu tätä luokkaa korkeampaa vaatimusta (esim. tietyissä rakennuksen viereisen korkeamman osan tapauksissa).

Näiden kohtien lisäksi paloasetuksissa ja perustelumuistiossa on myös muita puurakenteisia kattoelementtejä koskevia vaatimuksia (esim. vaatimukset katteelle ja lämmöneristeelle sekä vaatimukset onteloiden osiinjaon toteutukselle), mutta eo. tiivistyksessä on pyritty rajaamaan näiden tarkastelujen kannalta epäolennaiset asiat pois.

Tarkastelujen perusteella siis nykyisillä rakenneratkaisuilla pystytään valtaosassa tapauksista vastaamaan em. vaatimuksiin. Merkittävin haaste syntyy kuitenkin perustelumuistion 12 pykälän viimeisen kappaleen kohdalla, jossa ohjeistetaan yläpohjan R-luokan mitoituksesta ylhäältä alaspäin vaikuttavissa tulipaloissa [5]:

”Katteen alapuolella oleva yläpohjarakenne mitoitetaan myös yläpuolista paloa vastaan saman luokkavaatimuksen mukaan kuin alapuolista paloa vastaan.”

Tarkastelujen perusteella siis kyseinen kohta kyllä täyttyy R30 kattoelementtien yhteydessä, mutta ei enää R60 kattoelementeillä. On syytä kuitenkin huomata, että ko. perustelumuistion kohta selvästi sallisi myös kattoelementin yläpinnan OSB-levyn hyödyntämisen palonkestoajassa, jota tämän tutkimushankkeen ontelopalokokeissa ei tehty (koska tulipalojen syttymäkohta oli kattoelementtien onteloissa, eikä elementtien päällä). Yläpinnan OSB-levytyksestä saataisiin siis rakenteelle jonkin verran lisää palonkestoaikaa ylhäältä alaspäin vaikuttavassa palossa, mutta ei kuitenkaan välttämättä mainittuun R60 luokkaan saakka.

Toisaalta kun Suomen palomääräyksiä seuraavan kerran päivitetään, voisi olla syytä miettiä onko kyseinen vaatimus lähtökohtaisestikin hieman ylimitoitettu. Mikäli kyseinen perustelumuistion kohta muutettaisiin esimerkiksi alla olevaan muotoon, olisi yläpohjan kantavuusvaatimukset yläpuoleista paloa vastaan linjassa yläpohjan onteloiden osastointivaatimusten kanssa (vrt. perustelumuistion 20 pykälä [5], ks. kappale 2):

”Katteen alapuolella oleva yläpohjarakenne mitoitetaan myös yläpuolista paloa vastaan saman luokkavaatimuksen mukaan kuin alapuolista paloa vastaan. Kuitenkin jos yläpohjassa ei ole onteloita, tai jos palon leviäminen räystäältä yläpohjan onteloon on estetty EI 30-rakennusosaa vastaten ja yläpohjan ontelossa syttymisen vaara on tehokkaasti estetty, vaatimus on ylhäältä alaspäin vähintään R30 (paitsi jos vaatimus alhaalta ylöspäin on tätä pienempi). Tämä lievennys ei kuitenkaan ole voimassa, mikäli yläpohjan yläpuolelta rakenteeseen kohdistuu EI30 luokkaa korkeampi osastointivaatimus (esim. rakennuksen viereisen korkeamman osan tapauksessa).”

6 YHTEENVETO

Tämä raportti käsitteli Puutuoteteollisuus ry:n tutkimushanketta puurakenteisten kattoelementtien ontelopaloista. Puurakenteisten kattoelementtien palokäyttäytyminen on melko hyvin tunnettua ja suhteellisen helposti testattavissa polttokokeilla silloin, kun tulipalo vaikuttaa elementteihin niiden alapuolelta (eli rakennuksen sisäpuolelta). Suomen palomääräyksissä kuitenkin esitetään tiettyjä vaatimuksia myös kattoelementin yläpuolelta / ontelotilasta alkavien palojen seuraamusten hallintaan (ks. kappale 2). Tällaisille ylhäältä alaspäin vaikuttaville tulipaloille ei kuitenkaan ole mahdollista suorittaa tavanomaisia standardoitua testejä polttokoeuuneissa, eikä myöskään puhtaasti laskennalliset tarkastelut ole tuottaneet ongelmaan tyydyttäviä ratkaisuja. Näin ollen tässä Puutuoteteollisuus ry:n tutkimushankkeessa asiaa lähdettiin tutkimaan suorittamalla suuren mittaluokan (n. 8 m x 8 m) polttokokeet ulkoilmatesteinä kuormitetuille kattoelementeille luonnollisissa, elementtien ontelotiloissa syttyvissä, tulipaloissa. Hankkeessa tutkittiin sekä yhteen suuntaan että ristiin tuulettuvia kattoelementtejä.

Kattoelementit tutkimushankkeeseen toimitti Lapwall Oy ja ne koepoltettiin Kuopion Pelastusopistolla. A-Insinöörien lisäksi Tampereen yliopiston palolaboratorio oli mukana suunnittelemassa polttokokeita ja valvomassa niiden suorittamista. Hanketta rahoitti Rakennustuotteiden Laatu Säätiö sr.

Tutkimushankkeessa suoritetut polttokokeet olivat testityypiltään uniikkeja, joten tutkimushankkeeseen kuului sekä polttokokeiden suorittaminen että itse sovellettavan koemenetelmän kehittäminen. Näin ollen on luonnollista, että tällaisessa koesarjassa esiintyi vielä pieniä virheitä testien järjestelyissä ja suorittamisessa. Näiden virheiden vaikutus tuloksiin arvioitiin kuitenkin jääneen pieneksi. Samalla kuitenkin myös arvioitiin mitä mahdollisissa seuraavissa vastaavissa polttokokeissa kannattaisi tehdä toisin (ks. kappale 4.1). Kokonaisuuden kannalta suoritettuja testejä voidaan pitää hyvin onnistuneena ja saaduista tuloksista on mahdollista vetää johtopäätöksiä kattoelementtien palonkestävyydestä ontelopaloissa.

Tarkastelujen tulokset indikoivat, että sekä yhteen suuntaan tuulettuvat että ristiin tuulettuvat **kattoelementit täyttävät luokan REI30 yläpohjan ontelossa syttyvää tulipaloa vastaan.**

Tarkastelujen perusteella määritettiin myös arviot siitä, millä periaatteilla saatuja tuloksia ja johtopäätöksiä on mahdollista laajentaa myös muihin kattoelementtirakenteisiin. Nämä laajennusperiaatteet on esitetty kappaleessa 5.

Tarkastelujen perusteella siis nykyisillä rakenneratkaisuilla pystytään pääosin vastaamaan kappaleessa 2 esitettyihin Suomen palomääräysten palonkestovaatimuksiin, mutta REI60 (alhaalta ylöspäin) luokiteltujen kattoelementtien yhteyteen jää vielä tiettyjä avoimia kysymyksiä (ks. kappale 5).

A-INSINÖÖRIT

Tampereella 19.8.2025

A-INSINÖÖRIT / PALOTEKNISEN SUUNNITTELUN YKSIKKÖ

Laatinut:

Timo Jokinen
DI, Rakennetekniikka
Johtava asiantuntija /
FISE V-Paloturvallisuussuunnittelija

Tarkastanut:

Päivi Myllylä
TkL, Rakennustekniikka
Suunnittelujohtaja /
FISE PV-Paloturvallisuussuunnittelija

Tarkastanut:

Risto Ranua
DI, Rakennetekniikka
Projektipäällikkö /
FISE V-Paloturvallisuussuunnittelija

KIRJALLISUUSLÄHTEET

[1] Pelastusopisto. 2025. Puutuoteteollisuus ry, Yhteen suuntaan- ja ristiin tuulettuvien puukattoelementtien polttokokeet. Diaarinumero 2025-28. Kuopio.

[2] Ympäristöministeriö. Rakentamislaki, 751/2023. finlex.fi

[3] Ympäristöministeriö. 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 848/2017

[4] Ympäristöministeriö. 2020. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta, 927/2020

[5] Ympäristöministeriö. 2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta, 848/2017, perustelumuistio

[6] Ympäristöministeriö. 2020. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta annetun ympäristöministeriön asetuksen muuttamisesta, 927/2020, perustelumuistio

[7] Tampereen yliopisto. 2024. Kenttäkoetulokset 15.11.2024

[8] https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi

[9] SFS-EN 1991-1-2. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset. + Suomen kansallinen liite.

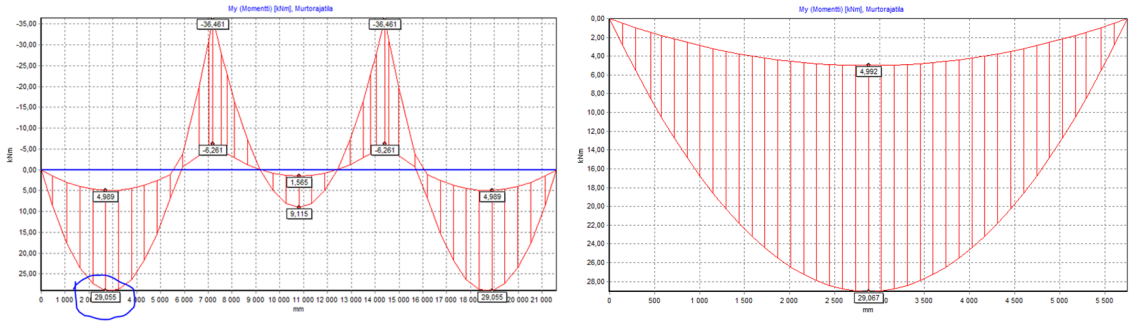
[10] SFS-EN 1363-1. 2012. Fire Resistance Tests. Part 1: General Requirements. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.

LIITE A: Koekuormitusten laskenta

Kattoelementit koepoltettiin kuormitettuina, joten niille tuli määrittää palotilanteen kuormitukset (eli koetilanteen lisäkuorma elementtien omien painojen lisäksi). Koekuormitusten määrittämisestä vastasi Lapwall Oy:n suunnittelupäällikkö Riku Bomberg.

Puurakenteiset kattoelementit ovat tyypillisesti 3-aukkoisia rakenteita, mutta testattavat koekappaleet ovat vain 1-aukkoisia. Jos koekuormat määritettäisiin suoraan Eurokoodin sääntöjen mukaan 1-aukkoiselle rakenteelle, jouduttaisiin pääkannattajien kokoa kasvattamaan verrattuna tyypillisiin kattoelementtiratkaisuihin, eikä koetilanne enää vastaisi tyypillistä rakennetta. Järkevämpi vaihtoehto on pyrkiä ”simuloimaan” tavanomaista 3-aukkoista rakennetta 1-aukkoisella rakenteella. Tämä tehdään valitsemalla ekvivalentti 1-aukkoinen rakenne, jonka maksimimomentti ja maksimijännitykset pääkannattajissa vastaavat suurinta kenttämomenttia ja vastaavia pääkannattajien jännityksiä tarkasteltavassa 3-aukkoisessa rakenteessa. Eurofins on ohjeistanut noudattamaan vastaavaa lähestymistapaa, kun kattoelementtejä koepoltetaan tavanomaisissa standardoiduissa alhaalta ylöspäin vaikuttavissa polttokoeuunikokeissa.

Seuraavassa kuvassa (Kuva 1) on esitetty laskelmat siitä, kuinka 7,2 m jännevälin 3-aukkoinen elementti voidaan muuttaa ekvivalentiksi 5,75 m jännevälin 1-aukkoiseksi elementiksi (Kuormituksen karakteristiset arvot molemmissa tapauksissa: omat painot + ripustus 0,5 kN/m² + lumikuorma maassa 3,0 kN/m²).



Kuva 1. 3-aukkoisen elementin muuttaminen kenttämomentin suhteen ekvivalentiksi 1-aukkoiseksi elementiksi momenttikuvaajien perusteella. Laskelmat Lapwall Oy.

Yllä olevasta kuvasta nähdään, ettei 3-aukkoisen elementin maksimimomentti muodostu reunakenttään vaan keskituille. Ontelopalon kannalta keskitukien negatiivinen momentti ei kuitenkaan muodostu määrääväksi alueeksi, koska keskituilla pääkannattajien kiepahdustuenta (eli alapuoleinen koolaus) on villojen alla paremmin suojassa, jolloin jänteen keskialue muodostuu kriittiseksi kohdaksi hieman pienemmästä maksimimomentista huolimatta (keskialueella efektiivinen kiepahdustuenta on suoraan ontelotilassa). Toisin sanoen muunnos ekvivalentiksi 1-aukkoiseksi rakenteeksi tulee tehdä nimenomaan kenttämomenttien suhteen, kuten nyt on tehty.

Ekvivalentiksi 1-aukkoiseksi rakenteeksi siis saatiin 5,75 m jännevälin rakenne, mutta polttokokeessa jänneväli on 7,9 m. Asia saadaan ratkaistua määrittämällä vielä ekvivalentti koekuormitus siten, että 7,9 m jännevälin rakenteen pääkannattajissa vaikuttava maksimimomentti ja maksimijännitys pysyvät samoina kuin 5,75 m jännevälin rakenteessa. Seuraavassa kuvassa (Kuva 2) on esitetty esimerkkinä nämä laskelmat testin 1 yhteen suuntaan tuulettuville kattoelementeille, ja tuloksena on saatu 79 kg/m² polttokokeen aikainen lisäkuormitus testille 1.

LapWall LEKO -kattoelementin pääpalkki, 1-aukkoinen, L=5750 mm, palotilanteen taivutusjännitys

L	5,75	m	palkin pituus
k_{jako}	1,22	m	palkkijako
b	39	mm	palkin paksuus
h	450	mm	palkin korkeus
$k_{mod,fi}$	1,0		palotilanteen muunnoskerroin
$\gamma_{M,fi}$	1,0		palotilanteen osavarmuuskerroin
k_{fi}	1,1		fraktiilikerroin
$\psi_{fi,1}$	0,5		muuttuvien kuormien yhdistelykerroin
$f_{m,k}$	44	N/mm²	taivutusjännityksen ominaisarvo
g_{op}	0,60	kN/m²	kattoelementin omapaino
$g_{ripustus}$	0,5	kN/m²	ripustuskuorma
q_{lumi}	3,0	kN/m²	lumikuorma katolla
k	1,0		tuulensuojaisuuskerroin
k_h	0,95		korotuskerroin
$f_{m,k,tod}$	41,9	N/mm²	taivutusjännityksen ominaisarvo
$f_{m,k,20}$	46,10	N/mm²	taivutusjännityksen ominaisarvo, 20% fraktiili
$f_{m,d,fi}$	46,10	N/mm²	taivutusjännityksen laskenta-arvo
G_k	1,342	kN/m	pysyvän kuorman ominaisarvo
Q_k	3,66	kN/m	muuttuvan kuorman ominaisarvo
E_d	3,172	kN/m	palotilanteen laskentakuorma
M_d	13,109	kNm	palotilanteen max. Laskentamomentti
$\sigma_{m,y,d}$	9,960	N/mm²	palotilanteen max. Taivutusjännityksen laskenta-arvo

LapWall LEKO -kattoelementin pääpalkki, 1-aukkoinen, L=8000 mm, palotilanteen taivutusjännitys

L	7,9	m	palkin pituus
k_{jako}	1,22	m	palkkijako
b	39	mm	palkin paksuus
h	450	mm	palkin korkeus
$k_{mod,fi}$	1,0		palotilanteen muunnoskerroin
$\gamma_{M,fi}$	1,0		palotilanteen osavarmuuskerroin
k_{fi}	1,1		fraktiilikerroin
$\psi_{fi,1}$	1,0		muuttuvien kuormien yhdistelykerroin
$f_{m,k}$	44	N/mm²	taivutusjännityksen ominaisarvo
g_{op}	0,60	kN/m²	kattoelementin omapaino
$g_{ripustus}$	0,0	kN/m²	ripustuskuorma
q_{palo}	0,790	kN/m²	palokuorma
k	1,0		tuulensuojaisuuskerroin
k_h	0,95		korotuskerroin
$f_{m,k,tod}$	41,9	N/mm²	taivutusjännityksen ominaisarvo
$f_{m,k,20}$	46,10	N/mm²	taivutusjännityksen ominaisarvo, 20% fraktiili
$f_{m,d,fi}$	46,10	N/mm²	taivutusjännityksen laskenta-arvo
G_k	0,732	kN/m	pysyvän kuorman ominaisarvo
Q_k	0,96	kN/m	palokuorman ominaisarvo
E_d	1,696	kN/m	palotilanteen laskentakuorma
M_d	13,122	kNm	palotilanteen max. Laskentamomentti
$\sigma_{m,y,d}$	9,970	N/mm²	palotilanteen max. Taivutusjännityksen laskenta-arvo
	79	kg/m²	**vaadittu palokoekuorma**

Kuva 2. Koekuormituksen laskenta testin 1 yhteen suuntaan tuulettuville kattoelementeille. Laskelmat Lapwall Oy.

Testin 2 ristiin tuulettuville kattoelementeille voidaan määrittää vaadittu koekuormitus vastaavalla tavalla. Testiin 2 koekuormitukseksi tulee kuitenkin hieman testiä 1 suurempi arvo, koska testissä 2 pääkannattajat ovat hieman suurempia kuin testissä 1 (39x500 vs. 39x450). Testiin 2 saadaan siis polttokokeenaikaiseksi lisäkuormaksi 112 kg/m².

LIITE B: Polttokokeista mitattu lämpötiladata

Taulukko 1. Polttokokeista mitatusta lämpötiladatasta lasketut 30 sekunnin keskiarvot. ***Testi 1, yhteen suuntaan tuulettuvat elementit.***

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
0	0.0	19	17	7	8	6	9	7	13	198	6	8	7	9	8	10	8	6	4	4	4
30	0.5	19	17	7	8	6	10	7	273	617	6	8	8	9	8	10	8	6	4	4	4
60	1.0	18	18	8	9	6	10	7	308	653	6	8	7	9	8	9	7	6	4	4	4
90	1.5	17	18	8	9	6	9	8	324	856	6	7	7	8	7	9	7	6	4	4	4
120	2.0	19	18	7	9	6	9	8	336	847	7	8	7	8	7	9	7	6	4	4	4
150	2.5	19	19	8	9	7	11	15	287	737	12	10	8	8	8	10	8	7	4	4	4
180	3.0	20	19	8	9	7	11	12	339	909	7	9	8	9	8	10	8	7	4	4	4
210	3.5	20	18	8	9	7	11	13	352	902	7	9	8	9	8	10	8	7	4	4	4
240	4.0	19	17	7	9	7	10	12	352	883	7	10	8	9	8	10	8	6	4	5	4
270	4.5	18	16	7	8	7	9	12	365	888	7	10	8	7	7	9	7	6	4	4	4
300	5.0	19	17	9	9	7	11	15	347	802	8	9	8	8	8	10	8	7	5	4	4
330	5.5	19	18	10	10	9	11	17	370	848	8	10	10	9	10	12	9	8	5	5	4
360	6.0	19	19	10	10	9	11	15	362	759	8	12	11	10	11	12	10	9	5	5	5
390	6.5	16	19	11	10	10	12	21	372	805	8	16	12	12	11	12	10	9	4	5	6
420	7.0	14	17	10	10	10	12	40	386	801	8	18	12	12	11	12	10	9	4	5	6
450	7.5	15	18	11	10	10	12	154	397	728	9	28	11	12	11	12	10	9	4	5	8
480	8.0	18	19	11	10	12	13	523	427	803	9	62	10	12	10	13	10	9	4	5	9
510	8.5	20	20	11	10	14	13	530	427	739	9	114	10	11	10	13	10	9	5	5	11
540	9.0	21	21	11	10	20	14	567	427	740	10	221	11	11	11	13	10	9	5	5	14
570	9.5	21	20	9	9	48	34	598	435	738	10	426	11	10	10	13	9	8	5	5	17
600	10.0	21	20	9	9	138	68	655	426	710	12	657	11	9	9	12	9	7	4	4	21
630	10.5	20	20	9	10	466	182	694	444	809	11	688	28	10	8	13	9	7	4	4	24

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
660	11.0	19	21	11	10	651	218	681	436	738	12	685	75	11	10	13	9	8	5	5	27
690	11.5	20	20	11	10	686	240	664	437	725	14	620	156	13	11	12	9	9	5	5	30
720	12.0	20	19	9	10	605	248	644	442	742	12	662	269	11	10	12	9	8	5	5	33
750	12.5	19	19	8	10	687	295	642	446	718	15	637	333	11	10	12	9	8	5	4	36
780	13.0	19	17	7	10	674	328	657	453	728	19	672	594	11	11	13	9	8	5	5	38
810	13.5	18	17	8	10	627	314	642	453	703	18	639	662	12	10	13	8	7	5	5	41
840	14.0	17	19	13	10	595	303	628	443	686	21	625	603	15	12	14	8	7	5	5	43
870	14.5	19	19	10	10	604	320	636	446	678	19	634	610	17	12	14	9	7	5	5	46
900	15.0	21	20	10	10	577	318	628	447	674	21	644	593	19	13	13	9	8	5	5	50
930	15.5	20	21	12	11	565	311	614	440	649	33	604	560	23	15	12	9	9	5	5	58
960	16.0	17	20	21	12	553	302	601	433	638	56	614	557	27	17	12	9	9	5	5	65
990	16.5	16	18	22	12	562	311	614	434	650	40	644	576	30	21	16	10	9	4	5	72
1020	17.0	19	20	16	11	581	328	613	437	648	44	630	551	35	21	15	10	9	5	5	78
1050	17.5	20	21	13	11	576	328	611	436	647	91	627	551	44	27	17	10	9	5	5	85
1080	18.0	20	21	11	11	580	338	631	442	655	134	638	580	46	43	34	10	9	5	5	91
1110	18.5	18	20	30	12	562	328	600	432	626	352	596	531	93	75	28	9	9	5	5	97
1140	19.0	18	20	24	12	542	322	597	424	632	266	607	538	125	46	17	9	9	5	5	103
1170	19.5	20	19	14	13	565	338	599	430	636	441	622	620	103	73	36	9	9	5	5	108
1200	20.0	20	19	16	18	555	339	586	431	622	645	612	573	105	306	139	9	8	5	6	112
1230	20.5	18	19	30	17	531	334	570	426	606	696	591	550	100	376	142	9	9	5	5	117
1260	21.0	17	19	26	31	543	346	605	434	644	715	628	566	106	663	277	9	7	5	6	120
1290	21.5	18	19	41	54	547	348	593	435	639	711	633	613	104	598	285	8	7	5	6	123
1320	22.0	16	19	42	42	562	351	594	435	628	722	619	559	215	572	277	9	8	5	6	126
1350	22.5	20	19	16	87	580	367	597	437	612	742	603	541	289	571	297	9	7	5	7	128
1380	23.0	20	18	14	404	567	369	596	436	607	767	616	541	430	595	316	9	7	5	8	130
1410	23.5	18	18	94	418	542	348	567	420	590	760	591	519	448	464	246	9	9	5	6	132
1440	24.0	15	17	123	146	550	347	554	414	575	750	578	547	302	635	338	10	8	5	6	134

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
1470	24.5	19	19	28	115	559	364	551	414	576	758	571	537	433	698	354	10	9	5	7	135
1500	25.0	20	19	19	165	565	375	543	421	677	805	589	541	584	653	369	9	7	5	8	136
1530	25.5	19	20	63	473	545	368	529	412	614	793	582	536	657	617	358	9	7	5	7	137
1560	26.0	21	19	32	591	538	374	528	422	703	805	630	543	675	556	357	9	7	5	10	138
1590	26.5	19	15	31	655	562	385	538	435	721	822	660	561	712	645	380	9	7	5	8	138
1620	27.0	17	17	46	586	542	376	527	430	678	834	633	566	716	598	377	8	7	4	7	139
1650	27.5	18	19	34	623	539	379	523	434	671	845	619	560	737	577	374	9	7	5	13	139
1680	28.0	16	19	53	593	531	373	517	427	668	800	624	554	756	560	368	9	7	5	9	139
1710	28.5	13	17	63	622	514	363	502	407	646	795	595	535	731	539	344	11	11	4	5	140
1740	29.0	13	17	69	638	520	366	498	399	667	791	592	543	760	625	374	11	9	4	6	140
1770	29.5	17	19	127	577	521	366	493	391	651	783	571	540	692	587	371	12	10	4	8	141
1800	30.0	17	20	140	572	524	362	489	382	564	752	555	529	674	566	371	14	12	4	7	142
1830	30.5	19	20	134	631	543	366	507	373	525	766	556	534	733	585	380	21	8	5	9	142
1860	31.0	20	19	323	581	537	372	530	402	557	773	672	530	719	568	384	25	10	4	8	143
1890	31.5	20	20	175	632	539	371	539	404	560	776	625	522	714	582	382	27	19	5	7	143
1920	32.0	23	23	284	648	566	377	718	424	569	812	685	548	731	636	409	288	41	5	9	143
1950	32.5	21	18	304	657	600	383	863	405	597	808	734	665	751	627	410	687	116	5	11	144
1980	33.0	24	25	305	582	607	381	883	404	619	802	821	773	754	729	419	849	167	5	7	144
2010	33.5	24	27	439	553	623	365	886	362	612	718	745	704	775	638	415	827	167	5	6	145
2040	34.0	22	33	463	520	604	347	879	367	647	800	792	673	766	576	392	840	324	6	8	145
2070	34.5	24	36	269	598	578	351	904	370	650	837	854	826	729	812	397	873	331	5	10	145
2100	35.0	40	44	233	639	545	340	866	368	599	862	818	798	787	785	397	847	547	5	13	146
2130	35.5	49	61	583	598	538	322	922	332	713	962	695	614	834	558	380	759	756	5	9	146
2160	36.0	33	51	603	533	475	305	783	384	630	911	721	576	849	541	359	747	783	5	8	147
2190	36.5	42	61	679	568	450	291	793	391	652	971	686	539	836	535	372	739	748	5	11	148
2220	37.0	99	224	676	598	448	289	784	418	575	928	717	533	839	556	388	723	762	5	13	148
2250	37.5	145	380	618	595	436	306	823	430	591	940	719	506	882	540	388	684	776	5	9	149

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
2280	38.0	85	147	603	573	482	284	773	432	522	906	752	487	851	514	374	604	696	5	11	149
2310	38.5	83	154	614	523	478	253	790	451	524	919	764	473	888	497	378	616	697	5	8	150
2340	39.0	72	110	678	593	511	235	809	415	542	919	776	485	846	498	378	669	724	4	7	150
2370	39.5	60	94	714	609	505	239	800	492	499	877	776	460	814	505	375	648	669	4	10	150
2400	40.0	63	82	739	637	549	197	844	522	569	812	752	398	853	457	379	553	565	4	24	149
2430	40.5	143	358	754	641	502	295	799	442	710	880	799	443	899	504	362	574	324	4	22	125
2460	41.0	228	490	733	616	500	295	860	435	756	908	833	578	872	528	350	647	259	4	18	129
2490	41.5	251	514	677	604	536	333	769	514	631	900	863	791	872	835	345	901	270	4	14	188
2520	42.0	223	480	714	585	594	326	798	514	587	817	897	863	880	859	340	919	332	5	9	242
2550	42.5	184	444	756	570	565	350	817	516	576	812	900	883	888	893	473	867	427	5	10	304
2580	43.0	231	531	774	615	522	313	847	584	608	800	864	856	886	879	804	779	344	4	18	444
2610	43.5	288	602	739	771	483	350	810	510	577	787	799	788	858	727	818	833	393	4	42	622
2640	44.0	320	605	715	703	533	387	712	578	505	750	821	821	838	712	840	862	339	4	62	710
2670	44.5	299	548	766	658	607	529	668	574	465	732	823	831	822	792	842	866	309	4	39	730
2700	45.0	302	593	771	409	634	470	748	632	510	784	795	788	832	839	866	722	525	4	50	651
2730	45.5	340	666	860	513	634	280	742	203	538	690	703	565	823	537	409	447	996	5	54	707
2760	46.0	301	549	834	510	678	191	702	77	553	766	683	506	882	377	128	315	1003	5	55	705
2790	46.5	53	68	785	211	654	77	680	61	538	787	682	454	827	337	105	311	891	5	56	767
2820	47.0	71	73	750	203	711	91	582	56	505	687	574	405	746	304	78	364	562	4	59	770
2850	47.5	70	88	704	367	667	85	507	55	505	698	436	214	710	159	58	341	455	4	60	550
2880	48.0	78	140	706	447	660	90	457	23	396	653	136	120	667	107	45	241	456	5	67	383
2910	48.5	94	250	635	419	681	85	488	12	369	679	96	84	633	88	43	229	438	5	72	308
2940	49.0	123	209	594	862	681	86	390	10	407	702	80	79	539	71	44	200	390	5	75	273
2970	49.5	84	176	537	628	734	100	313	18	412	688	78	84	509	59	45	197	307	5	82	237
3000	50.0	34	157	483	505	760	115	104	26	390	706	81	80	504	54	45	186	133	4	85	199

Taulukko 2. Polttokokeista mitatusta lämpötiladatasta lasketut 30 sekunnin keskiarvot. ***Testi 2, ristiin tuulettuvat elementit.***

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
0	0.0	-1	0	0	2	6	3	37	7	144	3	11	4	1	2	3	-2	#####	1	1	7
30	0.5	-1	0	1	2	6	7	41	92	553	6	41	8	2	3	3	-2	#####	1	1	8
60	1.0	-1	0	1	2	9	5	44	188	620	12	52	12	4	4	3	-2	#####	2	1	7
90	1.5	-1	0	1	2	6	7	66	356	649	22	39	9	3	3	3	-2	#####	2	0	7
120	2.0	-1	0	1	2	10	12	80	382	649	20	191	20	3	5	6	-2	#####	2	1	7
150	2.5	-1	1	1	2	5	10	74	368	602	36	262	40	9	9	9	-1	#####	2	1	8
180	3.0	-1	1	1	2	8	5	143	337	677	99	386	86	29	13	6	-1	#####	3	1	8
210	3.5	0	1	1	2	5	8	116	428	695	80	322	94	37	20	8	-1	#####	3	0	7
240	4.0	0	1	1	2	9	14	166	396	688	117	390	91	26	16	11	-1	#####	3	1	8
270	4.5	0	1	2	2	8	9	158	406	651	187	472	284	68	39	25	-1	#####	3	1	8
300	5.0	0	1	1	2	7	7	160	469	599	194	473	260	86	55	25	-1	#####	3	1	8
330	5.5	0	1	1	2	11	10	172	411	608	278	454	318	99	54	38	0	#####	3	1	9
360	6.0	0	1	2	2	15	20	248	431	577	280	411	193	77	47	37	0	#####	3	1	11
390	6.5	0	1	2	3	25	32	335	428	601	325	544	179	67	47	38	0	#####	3	1	13
420	7.0	0	1	2	3	84	73	338	440	601	346	575	155	58	38	32	0	#####	2	1	17
450	7.5	1	1	2	4	82	89	276	426	573	434	518	197	141	51	55	1	#####	2	1	21
480	8.0	1	2	2	3	59	25	414	357	643	661	527	410	308	90	76	3	#####	3	1	25
510	8.5	1	2	2	3	55	40	368	433	590	609	543	360	226	103	113	19	#####	3	2	29
540	9.0	1	2	2	3	136	115	493	388	572	619	494	286	385	106	206	15	#####	3	1	32
570	9.5	1	2	2	3	114	173	496	413	600	693	565	365	368	129	140	19	#####	3	1	37
600	10.0	1	2	3	11	252	273	427	407	560	656	504	347	415	152	106	23	#####	2	1	42
630	10.5	1	2	2	5	116	117	439	365	566	677	509	327	405	134	90	23	#####	3	1	49
660	11.0	1	2	2	3	83	105	528	407	575	710	540	439	334	137	107	22	#####	3	1	57
690	11.5	1	2	3	7	237	245	484	403	543	692	524	447	593	228	134	22	#####	2	1	65
720	12.0	1	2	2	5	182	167	580	392	577	724	536	428	592	314	142	33	#####	3	1	71
750	12.5	1	2	6	9	347	245	505	365	598	641	552	376	508	216	88	28	#####	3	1	78

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
780	13.0	1	2	4	5	161	195	569	435	632	707	554	431	601	260	147	25	#####	3	1	83
810	13.5	1	3	3	4	284	335	534	425	568	741	527	423	564	293	170	36	#####	2	2	89
840	14.0	2	3	3	6	249	390	512	414	547	696	505	426	633	358	187	37	#####	2	2	93
870	14.5	1	3	3	4	359	511	502	394	534	703	484	367	606	231	118	39	#####	3	2	97
900	15.0	1	3	3	4	544	514	538	408	553	754	519	419	647	327	173	34	#####	3	2	100
930	15.5	1	3	3	4	494	400	516	400	544	743	508	421	651	305	178	42	#####	3	2	103
960	16.0	1	2	5	9	460	355	500	379	540	739	515	418	650	310	168	50	#####	4	1	106
990	16.5	2	3	9	17	469	316	515	386	557	808	529	439	706	328	185	48	#####	3	2	108
1020	17.0	2	3	11	20	416	264	488	361	541	760	519	440	672	330	171	77	#####	3	2	110
1050	17.5	1	3	5	10	400	272	462	342	522	704	493	420	630	302	162	54	#####	4	1	111
1080	18.0	1	2	7	10	420	227	553	333	595	648	475	383	600	271	144	52	#####	4	1	112
1110	18.5	1	2	6	13	489	452	534	411	567	731	540	492	704	408	225	106	#####	4	2	113
1140	19.0	2	3	25	25	504	453	513	408	543	747	520	450	686	359	210	130	#####	3	2	115
1170	19.5	2	3	39	49	423	377	475	412	519	708	489	421	652	330	225	94	#####	3	3	116
1200	20.0	2	3	14	21	469	345	498	398	540	775	519	470	728	375	225	102	#####	4	3	117
1230	20.5	2	3	14	20	476	387	508	399	549	729	524	454	719	353	188	83	#####	3	2	118
1260	21.0	2	4	16	22	488	372	509	401	556	773	533	470	746	395	222	152	#####	3	2	119
1290	21.5	2	3	12	15	484	412	503	396	553	731	530	456	684	364	204	126	#####	4	2	120
1320	22.0	2	4	17	22	531	401	479	373	526	711	503	448	672	366	204	135	#####	4	2	121
1350	22.5	2	4	157	107	541	399	525	359	569	723	537	490	690	397	223	183	#####	3	2	121
1380	23.0	3	4	62	72	511	424	493	389	548	776	526	482	743	407	230	183	#####	4	3	122
1410	23.5	2	4	64	98	481	393	471	374	523	707	501	442	697	356	194	150	#####	4	3	122
1440	24.0	2	3	80	142	492	391	485	388	536	760	523	485	801	419	226	161	#####	4	2	122
1470	24.5	2	4	67	97	488	376	471	372	515	759	500	464	727	399	227	211	#####	4	2	123
1500	25.0	3	4	88	108	484	390	469	371	519	781	501	467	714	409	238	204	#####	4	2	123
1530	25.5	6	7	236	279	494	390	478	376	517	765	505	471	737	415	239	275	#####	3	3	124
1560	26.0	6	9	222	164	504	405	473	371	518	784	507	468	701	405	234	211	#####	3	3	124

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
1590	26.5	3	5	568	254	508	397	477	372	512	732	507	482	765	438	250	329	#####	4	3	124
1620	27.0	5	6	652	373	511	391	474	369	501	722	492	459	652	415	242	234	#####	4	4	124
1650	27.5	8	9	618	407	514	385	469	366	484	557	483	460	677	421	246	282	#####	4	4	123
1680	28.0	24	23	765	412	534	394	464	357	470	207	464	447	648	418	246	294	#####	4	5	123
1710	28.5	43	80	713	347	511	378	450	344	457	209	439	417	621	389	229	248	#####	5	6	122
1740	29.0	98	140	709	389	506	378	449	344	450	238	428	424	627	401	231	264	538	5	6	122
1770	29.5	54	110	666	359	479	358	430	336	443	295	413	414	626	382	289	265	#####	4	9	123
1800	30.0	35	92	756	381	486	355	434	337	441	432	413	425	717	385	241	274	#####	4	9	123
1830	30.5	136	181	761	378	468	352	418	339	429	640	401	433	773	401	236	309	#####	3	9	122
1860	31.0	123	262	825	413	478	356	418	321	427	785	394	451	850	428	245	358	#####	4	9	122
1890	31.5	193	344	896	476	502	376	439	331	421	871	395	477	795	468	282	425	#####	4	12	121
1920	32.0	212	361	904	482	503	399	433	354	402	863	375	449	780	423	294	386	715	4	10	120
1950	32.5	255	407	948	503	510	390	432	323	398	850	365	473	747	416	260	392	798	3	11	120
1980	33.0	271	427	966	529	502	387	432	316	400	842	386	550	709	452	270	449	#####	3	12	120
2010	33.5	329	517	896	527	483	386	490	348	416	827	496	534	722	433	318	416	#####	3	14	120
2040	34.0	298	533	946	567	684	385	674	327	494	812	666	603	747	454	327	460	#####	3	15	119
2070	34.5	361	572	901	659	859	406	818	322	740	808	837	647	782	465	305	481	#####	4	16	118
2100	35.0	386	587	826	705	855	404	804	313	736	806	843	642	770	473	306	249	#####	5	15	117
2130	35.5	396	580	818	588	790	381	508	303	405	793	695	614	666	497	319	70	#####	5	16	116
2160	36.0	415	642	811	623	805	379	563	305	365	805	616	682	658	575	351	76	#####	3	15	116
2190	36.5	453	617	794	598	790	383	620	320	365	790	449	642	645	527	344	84	#####	3	18	116
2220	37.0	480	662	795	592	792	383	647	313	354	803	407	662	640	518	340	83	#####	3	18	116
2250	37.5	472	713	799	649	791	381	650	311	348	795	401	706	643	516	346	85	#####	3	17	115
2280	38.0	505	736	802	791	813	400	745	337	358	772	437	748	654	497	358	155	#####	3	17	115
2310	38.5	515	770	779	817	816	415	840	356	367	774	508	787	668	486	359	514	#####	3	19	115
2340	39.0	521	775	761	805	802	410	832	372	373	754	528	725	686	464	353	454	#####	5	19	114
2370	39.5	545	819	761	804	797	471	851	387	368	746	596	797	700	467	358	529	#####	5	20	114

[s] Time	[min] Time	[°C] CH1	[°C] CH2	[°C] CH3	[°C] CH4	[°C] CH5	[°C] CH6	[°C] CH7	[°C] CH8	[°C] CH9	[°C] CH10	[°C] CH11	[°C] CH12	[°C] CH13	[°C] CH14	[°C] CH15	[°C] CH16	[°C] CH17	[°C] CH18	[°C] CH19	[°C] CH20
2400	40.0	541	821	718	780	766	798	828	412	435	737	649	758	727	453	354	484	#####	4	19	115
2430	40.5	581	818	734	763	746	852	832	595	694	796	677	739	727	438	367	489	#####	4	22	116
2460	41.0	654	789	731	738	714	873	856	800	830	849	795	890	731	450	375	574	#####	3	24	117
2490	41.5	648	782	788	727	716	863	674	835	619	859	765	827	743	440	372	566	#####	4	25	120
2520	42.0	691	749	821	714	710	846	222	835	363	851	747	731	749	432	348	594	#####	2	23	123
2550	42.5	667	742	860	710	714	834	220	838	320	851	767	719	761	438	354	622	#####	3	22	126
2580	43.0	691	742	877	629	676	829	195	854	209	846	778	742	779	420	351	609	#####	3	22	170
2610	43.5	684	775	856	526	607	830	236	888	632	873	786	703	752	398	352	537	#####	3	41	664
2640	44.0	712	777	807	511	563	810	229	880	304	842	786	781	744	381	384	493	#####	4	41	710
2670	44.5	737	781	745	498	601	770	200	841	209	779	693	721	154	381	386	513	#####	5	40	778
2700	45.0	707	677	409	487	748	390	184	760	189	737	270	416	75	390	428	510	#####	4	36	300
2730	45.5	672	633	161	482	808	225	191	678	207	726	112	385	59	411	506	608	#####	4	47	73
2760	46.0	674	366	110	445	666	213	210	664	209	676	122	338	52	402	526	612	#####	5	40	53
2790	46.5	707	160	100	378	670	212	177	693	169	450	144	289	36	395	397	443	#####	4	27	62
2820	47.0	761	362	153	330	639	199	92	465	84	350	155	249	41	369	78	212	#####	4	28	51
2850	47.5	767	478	248	299	644	177	70	206	40	192	117	213	39	435	259	408	#####	5	138	36
2880	48.0	573	481	247	291	733	149	60	172	36	163	91	186	35	433	225	377	#####	3	135	35
2910	48.5	459	436	302	289	691	120	59	145	34	134	301	183	47	446	426	403	#####	4	113	53
2940	49.0	388	469	292	287	608	99	49	125	30	114	953	170	62	437	640	494	#####	5	97	17
2970	49.5	383	498	304	289	476	84	48	114	31	100	845	129	51	442	615	698	#####	4	83	27
3000	50.0	235	291	101	293	733	75	46	104	29	89	634	109	41	428	579	677	#####	4	73	46