



TALLINNA
TEHNIKAÜLIKOOL



Kahekorruselise ristkihtpuidust hoone ruumtulekatse

1.11.2017 Väike-Maarja, Eesti

Katrin Nele Mäger

Alar Just

Rait Pukk

Daniel Brandon

Fredrik Kahl

Johan Sjöström

Sisukord

1.	Sissejuhatus.....	3
2.	Eesmärgid	3
3.	Sponsorid.....	4
4.	Partnerid.....	5
5.	Taust	7
6.	Katsemaja	9
	Ristkihtpuit	9
	Aknad ja ukсед	11
	Fassaadid	11
	Liited ja läbiviigud.....	13
	Eripõlemiskoormus.....	14
	Joonised.....	15
	Katsehoone ehitus.....	31
7.	Prognoos.....	35
	Temperatuurid ja soojuse eraldumise määrad	35
	Temperatuurid kipsplaatide taga laes.....	36
	Temperatuurid liimvuugis	37
8.	Tulekatse	39
	Stsenaarium.....	39
	Katsetingimused	39
	Katse ajajoonel	40
	Mõõtmised	40
	Kustutamine	41
9.	Mõõtetulemused.....	44
	Temperatuurid	44
	Kaalud.....	60
10.	Kokkuvõte.....	63
11.	Lisamaterjal	64
12.	Allikad	64

1. Sissejuhatus

Käesolev raport sisaldab kahekordse ristkihtpuidust (CLT) hoone tulekatse teoreetilist tausta, hoone ehituslikku kirjeldust ja katsetulemusi. Tulekatse toimus 1. novembril 2017.a Väike-Maarja lähedal asuval Sisekaitseakadeemia Päästekolledži harjutusväljakul. Järgiti parameetrilist (reaalset) tulekahjukõverat.

Hoonet kandvad ristkihtpuidust paneelid projekteeriti vastavalt eeldusele, et massiivpuidu iseeneslik kustumine on võimalik pärast sisustuse vm eripõlemiskoormuse ära põlemist. Tulekahju süüdati alumise korruse ruumis.

Lisaks ruumis sees toimuvatele protsessidele on tähelepanu pööratud ka fassaadidele, mis olid samuti kujundatud kasutades meetmeid, et vähendada tulelevikut fassaadi välispinna ja tuulutuspilu kaudu põlevast ruumist üles. Fassaadides kasutati võrdlusena kaht eri tüüpi isolatsioonimaterjali.

Hoones oli eri tüüpi liiteid. CLT paneelide liitekohad tihendati spetsiaalse paisuva vuugilindiga, et vältida tulelevikut läbi liidete nii korruste vahel kui ka läbi vertikaalsete ühenduskohtade (nii seinapaneeli jätkukohtades kui ka nurkades).

Käesolevas katses korraldati küllaltki raske tulekahju, hindamaks leekide ja suitsu levikut. Põleva kütuse kogus määrati vastavalt Eestis kehtivatele nõuetele. Lisaks eripõlemiskoormusele 600 MJ/m^2 oli avatud puitpindu suhteliselt palju ning osa fassaadi oli kaetud värvitud puitlaudisega, mis ei olnud eriliselt töödeldud tulekindlust tõstvate vahenditega.

- 43% ruumi pindadest olid avatud puitpinnad (2 seinat ja üks)
- Puidust fassaadilaudis ilma tulevastase immutuse või värvita
- Tulekindel kivivill ühes ja mittepõlev PIR isolatsioon teises fassaadis

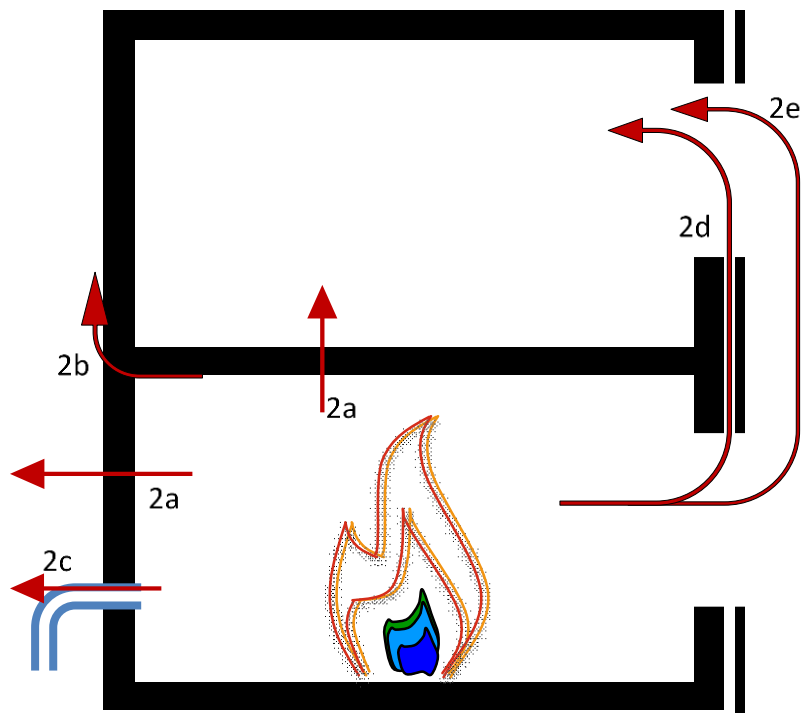
Koostöös RISE ja Tallinna Tehnikaülikooli vahel uuritakse hetketeadmisi tule ja suitsu leviku tõkestamise meetmete osas, leidmaks toimivaid lahendusi hääbuvate tulekahjude saavutamiseks ilma tuletõrje sekkumiseta.

2. Eesmärgid

Katse peamiseks eesmärgiks oli teadmiste laiendamine tuleohutute puithoonete projekteerimises.

Katsehoone puhul võeti kasutusele mitmeid tehnilisi lahendusi järgnevate eesmärkide saavutamiseks:

1. tulekahju jätkumise vältimine
2. tule ja suitsu leviku piiramine:
 - a. läbi seinat või vahelaet,
 - b. läbi CLT paneelide vaheliste liidete,
 - c. läbiviikude kaudu seintes ja vahelaes,
 - d. fassaadi tuulutuspilu kaudu,
 - e. fassaadi pinna kaudu.



Joonis 1. Võimalikud tule ja suitsu levimisteed

3. Sponsorid

Käesolevat tööd toetasid

RKAS – Riigi Kinnisvara AS

RISE Research institutes of Sweden (*Formas projekt: Kõrged puithooned*)

Peetri Puit OÜ

Swedish Wood

4. Partnerid

Partner	Roll	Kontaktisik(ud)
Riigi Kinnisvara AS (RKAS)	Rahastaja	Margus Sarmet Mihkel Mäger Evelin Arak
Swedish Wood (Rootsi puidutööstuste liit)	Rahastaja	Susanne Rudenstam Björn Källander
Tallinna Tehnikaülikool	Projekteerimine Ettevalmistus Ehitus Mõõteseadmed	Alar Just Katrín Nele Mäger Johanna Liblik Mattia Tiso Hannes Härma Liisa Luhar Mihkel Karuse
RISE Fire Research	Projekteerimine Prognoos Mõõteseadmed Rahastus	Daniel Brandon Alar Just David Lange Johan Sjöström Fredrik Kahl
Sisekaitseakadeemia (SKA)	Katsekoht Ohutus Kustutamine Vundamendid Konteinerid Kommunikatsioon	Rait Pukk Vadim Ivanov (test site) Kristjan Mägi Eger Karuse
Tignum OÜ	Koordinatsioon Ettevalmistus Ehitus	Katrín Nele Mäger
Peetri Puit OÜ	CLT tootmine Ehitus Rahastus	Peeter Peedomaa Tarmo Tamm Indrek Mäe
Müncheni Tehnikaülikool	Ettevalmistus Ehitus	Norman Werther
Braunschweigi Tehnikaülikool	Ettevalmistus Ehitus	Sven Brunkhorst Judith Küppers
Vestenmix OÜ	Ehitus	Raido Peedomaa
Aru Grupp AS	Aknad ja ukсед	Juhan Viise
Paroc Group Oy Paroc Eesti	Kivivill	Niklas Karlsson Lars-Erik Olsson Tõnu Pilvik
Saint-Gobain Gyproc Scandinavia	Kipsplaadid	Philippe Samsone
Tenmat Ltd	Paisuv vuugilint	Christopher Tomson
Enerest OÜ	PIR isolatsioon	Siim Rannik
AS RAIT (RAITWOOD)	Puitmaterjal (ehituspuit ja fassaadilaudis)	Tiit Kams
Ehitusplaat OÜ	Tsementplaadid (fassaad)	Ahti Velling
Tefire OÜ/ Genoke OÜ	Läbiviigid ja VKKV paigaldised	Elari Jürgen Tauno Kais

Pro2 lahendused OÜ	Terasest staitiivid mõõteseadmetele	Tarmo Käosaar
--------------------	--	---------------

 **Riigi Kinnisvara**

 **TTÜ**

 **Gyproc**
SAINT-GOBAIN

SWEDISH WOOD™

KIVEX
FASSAADI- JA SOKLIPLAAT

RISE



SISEKAITSEAKADEEMIA
ESTONIAN ACADEMY OF SECURITY SCIENCES

ARCWOOD

RAIT WOOD

by Peetri Puit

 **ARU GRUPP**

 **VESTENMIX**

 **PAROC®**



EnerEST

 **TENMAT**
ADVANCED MATERIALS

 **TEFIRE**
Protecting life

TUM
Technische Universität München



5. Taust

Muutuvate normide ja arhitektuursete trendide valguses on suurenenud avalikkuse huvi ja surve ökoloogilise jalajälje vähendamise suunas. Sellised arengud soosivad puidu kasutamist ehitusmaterjalina, kuid paratamatult kerkivad esile küsimused tuleohutuse kohta kõrgetes puithoonetes. Üha kõrgemate (ja kallimate) puithoonete ehituse puhul muutub üha olulisemaks ka rahaliste kahjude minimeerimine tulekahju järgselt.

Puidust (kande)konstruktsiooniga hoonetes soovitakse puitu eksponeerida, mis on senini olnud keeruline. Avatud puitpinnad osalevad tulekahjus kütusena, suurendades eralduvat soojushulka ja seeläbi võib tulekahju kestus pikeneda ning temperatuurid tõusta kõrgemaks kui standardtulekahju puhul. Lisaks sellele on vaja puit- ja muude põlevast materjalist fassaadide kasutamisel tähelepanu pöörata tule leviku tõkestamisele üle fassaadi pinna.

Hoones viibivate inimeste ja vara kaitse seisukohalt on oluline, et (1) tulekahju ei leviks süttinud ruumist välja ja (2) tulekahju sumbuks ka ilma tuletõrje sekkumiseta juhul, kui päästemeeskond ei pääse koheselt ruumi kustutama.

Ristkihtpuit on puidupõhine materjal, mille puhul puitprussid on omavahel kokku liimitud risti paiknevate kihtidena. Selle populaarsus on kasvavas trendis kogu maailmas. CLT-l on suurepärane massi ja kandevõime suhe ning seda kasutatakse näiteks ka puitkarkasshoonete jäikusdiafragmadena. Põleva materjalina võib ristkihtpuit siiski olla ohustatud tulekahjust.

Ristkihtpuidu käitumist standardtulekahjus on üpris laialdaselt uuritud. Üheks suurimaks väljakutseks on avatud puitpindadest tekkiva lisakütuse ja seega ka lisaenergia arvestamine arvutustes. Senini on regulatsioonides võetud suund kandvate puitkonstruktsioonide söestumise vältimisele läbi efektiivse kapseldamise. Tänapäevastes arvutusmudelites on võimalik katmata kandvate konstruktsioonide arvessevõtmine lisakütusena.

Ristkihtpuidu käitumine tulekahjus võib olla erinev massiivpuidust, kuna selle tootmises kasutatakse väiksemaid puitelemente, mis omavahel kokku liimitakse. Tavapäraselt kasutatavad liimid aga ei ole vastupidavad kõrgetel temperatuuridel ning võivad pehmeneda ja kaotada nakke. Seetõttu tuleks ristkihtpuitkonstruktsioonide söestumist arvutada kihtide kaupa, eeldades et lamell kukub eest ära teatud temperatuuri saavutamisel liimvuugis ning järgnev puidupind hakkab söestuma kiiremini. Sellist arvutusmudelit nimetatakse astmeliseks söestumismudeliks.

Kui söestunud kihtide ärakukkumine on välditud, võib ristkihtpuidu söestumist arvutada sarnaselt massiivpuidule, mille puhul loetakse söestumise kiirus ühtlaseks kogu tulekahju kestuse vältel.

Tõuke käesolevas raportis käsitletud katse teostamiseks andis Riigi Kinnisvara AS (RKAS) seoses Viimsi Riigigümnaasiumi projektiga. See kolmekordne koolihoone planeeriti ehitada puidust. Projekteerimise hetkel kehtinud regulatsioonid aga ei lubanud eksponeerida põlevast materjalist kandekonstruktsioone.

Eesti on Euroopa suurim puithoonete eksportija (element- ja moodulehitus). Seega on kodumaiste tootjate huvi oma toodangut tuua laiemalt ka koduturule. Senini on puidu laialdasemat kasutust suuremahulisemates hoonetes piiranud kehtinud regulatsioonid. Tulekatse üks üldine eesmärk oligi näidata korrektselt projekteeritud puithoone vastupidavust pikas ja raskes tulekahjus.

Eestis ja kogu Euroopas on võetud suund ökoloogilise jalajälje vähendamisele ning energia- ja loodussäästlikuma eluviisi poole. Üks meetmetest selle eesmärgi suunas on nõue uusehitistele, mille kohaselt peavad kõik hooned, mis valmivad pärast 1. jaanuarit 2021, vastama liginullenergia

nõuetele. Puithooned on selle eesmärgi täitmiseks hea lahendus. Seega on oluline muuta ka üldsuse arvamust puitmajade tuleohutusest.

Reaalse tulekahju temperatuuri-aja graafikul on erinevalt laialt levinud standardtulekahju kõverast kolm selgelt eristuvat faasi. Tulekahju algab süttimisfaasiga, mille puhul on temperatuurid madalad ja temperatuuri tõus aeglane. Väljaarenenud tulekahju algab lahvatusena, mis tähendab ajahetke, mil süttivad kõik ruumis olevad põlevad pinnad ning temperatuur ja leegid kasvavad järsult. Temperatuurid võivad tõusta kiiremini ja kõrgemale kui standardtulekahjus. Pärast ruumis oleva kütuse ärapõlemist algab jahtumisfaas, mille jooksul temperatuur langeb. Reaalse tulekahju mõju puitkonstruktsioonidele on vähem uuritud kui standardtulekahju.

Reaalsed tulekahjud võivad olla juhitud ventilatsiooni- või kütusetingimustest. Vajalike parameetrite määramisel saab prognoosida temperatuuri arengut ruumis.

Reaalse tulekahju kõvera saamiseks tuleb kindlaks määrata ventilatsioonitingimused, põlemiskoormus ning ruumi pindade termilised omadused ja suurus. Ventilatsiooni juhitud tulekahju tähendab, et hapniku juurdepääs on piiratud. Käesolevas katses oli tulekahju ventilatsiooni juhitud esimese kahekümne minuti vältel, mil aknad olid suletud. Pärast akende purustamist muutus tulekahju põlemiskoormuse juhituks.

Eelpool mainitud kolmes faasis on olulised materjalide erinevad omadused. Süttimisfaasis mängib rolli materjali pinna tuletundlikkus, mis avatud ja töötlemata puidul on D (klassifikatsioon vastavalt standardile EN 13501). Väljaarenenud tulekahju puhul algab ja toimub puidu söestumine. Väljaarenenud tulekahju üldistus on standardtulekahju vastavalt ISO 834 standardile. Jahtumisfaasis temperatuurid langevad ning puidu söestumine jätkub kuni ruumitemperatuur langeb alla 300°C, mis on kokkuleppeline puidu söestumistemperatuur (EN 1995-1-2:2004).

Puitkonstruktsioonide projekteerimiseks reaalse tulekahju olukorras ei ole veel piisavalt täpseid teadmisi. Käesoleva katse tulemused on sisendiks temperatuuride ja söestumissügavuste prognoosi meetodi täpsustamiseks. Kõrgemates hoonetes võib reaalse tulekahju arvutus anda optimaalsema konstruktsiooni väiksemate ristlõigetega, seejuures tagades hoones viibivate inimeste ohutuse.

6. Katsemaja

Katsemaja projekteeriti selliselt, et oleks võimalik uurida erinevaid puithoonete tuleohutust mõjutavaid faktoreid. Järgnevalt kirjeldatakse mitmesuguseid tehnilisi lahendusi ja strateegiaid, mis olid katsemaja puhul kasutusel, et piirata tule ja suitsu levikut ning vältida jätkuvat põlengut.

Ristkihtpuit

Katsemaja oli kahekorruseline viiekihilisest ristkihtpuidust hoone. Korruse sisemõõt oli 3,5x4,5m.

Kaks pikemat seina olid kahe korruse kõrgused, lühematele seintele toetus vahelaeplaat. Tulepoolne lamell oli tavapärasest paksem – 40 mm. CLT kihtide paksused olid ruumist väljapoole vähenevad: 40+30+20+20+20 mm. Ristkihtpuidust elemendid tootis Peetri Puit OÜ.

Vältimaks jätkuvat põlengut kasutati prognoosimudelit, mille töötas välja Brandon (2016). Vastavalt sellele mudelile mõjutavad tulekahju kestust ja ulatust järgmised parameetrid:

- avade tegur: ventilatsiooni võimaldavate avade (antud juhul purustatud akende) suhe ruumi kõigi piirete pindalasse;
- avatud ristkihtpuidu pindala;
- ristkihtpuidu tootmises kasutatav liim;
- ristkihtpuidu tulepoolse ja sellest järgmise lamelli paksus;
- põlev sisustus ruumis;
- kipsplaatide tüüp, paksus ja kihtide arv kaitstud puitpindadel ning plaatide kinnitus.

Ruumi paigutati sisustus eripõlemiskoormusega 600 MJ/m², mis vastab Eestis kehtivate normide kohaselt elu- ja bürooruumis ette nähtud maksimaalsele arvutuslikule eripõlemiskoormusele.

Ristkihtpuidu tootmises kasutati laialtlevinud polüuretaanliimi, mis pehmeneb kõrgetel temperatuuridel. Liimvuugi tugevuse vähenemine tulekahjuolukorras võib põhjustada tulepoolse lamelli või sellest tekkinud söekihi ärakukkumist seinast. Seejärel avaneb tulele söestumata, kuid eelkuumenenud uus puitpind, mis söestub suurema kiirusega. See võib põhjustada uue lahvatuse ning väljaarenenud tulekahju jätkumise.

Paksema tulepoolse lamelli kasutamine on üks võimalus vältida või edasi lükata kihi ärakukkumist. Kasutatud meetodiga tehtud prognoosi kohaselt on 40 mm paksuse lamelli kasutamisega võimalik esimese kihi ärakukkumist vältida 120 minuti jooksul. Selle tingimuse täitmiseks piirati vastavalt ka avatud puitpindade mahtu.

Pikemad seinad olid kaitsmata puitpinnad. Teised seinad kaitsti tule eest kahe kihi 15 mm paksuse tulekaitse kipsplaadiga. Lakke, kus võib esineda varasem kipsplaadi ärakukkumine, paigaldati sama kipsplaati kolm kihti.

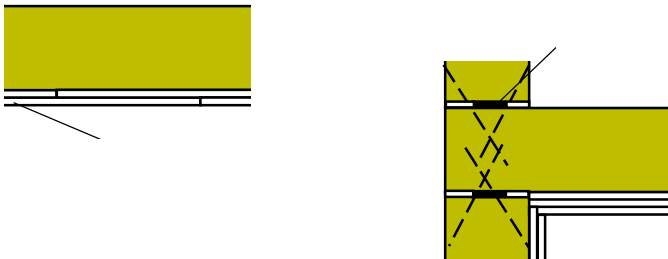


Joonis 2. Esimese korruse sisustus enne tulekatset (Foto: T. Kõrtsini)

Väljaarenenud tulekahju vältimiseks on oluline puitpindade kaitse tulekahju eest. Selleks kasutati antud katses 15 mm paksusi F-tüüpi kipsplaate. Kaitse ärakukkumise järgselt avaneb järsult palju eelsoojenenud puitpindu kõrgetele temperatuuridele ning võib toimuda järsk lahvatus ning tulekahju kontrollimatu ja kiire areng. Samuti oli katses oluline vältida puidu söestumist katte taga. Selliselt söestuv puit oleks samuti olnud lisakütus ruumi tulekahjule.

Kaks kipsplaati seintes ja kolm kihti laes peaksid arvutuslikult vältima kaitstud puitpindade söestumise algust või lubama söestumist vaid väga vähesel määral. Katse vältel mõõdeti temperatuure kipsplaatide kihtide vahel ja taga, puidu pinnal. Seeläbi saab teha järeldusi, kas kasutatud kaitse oli piisav või oleks saanud kasutada ka vähemaid kihte.

Liitekohad kipsplaatide servades paigutati selliselt, et need ei kattuks omavahel erinevate kihtide lõikes. Kruvide vahekaugus iga kihi puhul oli maksimaalselt 300 mm mõlemas suunas. Kruvipikkus valiti selliselt, et need ulatuks läbi kipsplaatide ristkihtpuitu vähemalt 20 mm.



Joonis 3. Kipsplaatide paigalduse detailid (vasakul kipsplaatide paigutus seinas, paremal sein ja lae ühenduskoht)

Esimese korruse põrand oli eraldatud ülejäänud hoonest, et oleks võimalik jälgida mööbli ja muu sisustuse ärapõlemist. Selleks kaaluti põrandat eraldi koormusanduritega. Et põrand ei saaks osaleda tulekahjus lisakütusena, kaeti see jäiga kivivilla ja tsementplaatidega.

Aknad ja ukсед

Avade suurus ja paigutus valiti katse jaoks vastavalt prognoosimudelile. Avategur on oluline parameeter reaalsete tulekahjude puhul. Katsemajal oli mõlemal korrusel kaks aknaava, mõõtudega 1,4x1,5m ja üks ukseava mõõtmetega 0,95x2,1m.

Kõik avatäited olid puitraamidega. Alumise korruse aknad olid kahekordse paketiga, ülemisel korrusel olid 3k klaaspaketiga EI30 tuletõkkeaknad. Esimese korruse uks oli samuti EI30 klassifikatsiooniga. Teise korruse uks oli tavaline sisetingimustesse mõeldud uks.

Fassaadid

Kaks külgnevat välisseina olid kaetud kahe erineva fassaadisüsteemiga.

Lühem sein oli soojustatud PIR isolatsiooniga (Enertherm ALU, paksus 160 mm, liitekohad kaeti IKOpro ALU teibiga). Jäigad isolatsioonipaneelid kinnitati otse ristkihtpuidule kruvidega.

Alumise korruse akna ümbruses kaeti PIR isolatsiooni lõigatud servad Air Gap Stopper värviga, mis paisub ja sulgeb tuulutuspilu 200°C saavutamisel.

Pikemas fassaadis kasutati Paroc WAS 35 (klimatskiva Zero) kivivilla paksusega 150 mm. Kivivilla käitumine tulekahjus on hästi teada, mistõttu valiti see referentsiks. Soojaisolatsiooni peale, tuulutuspilu hoone poolsele pinnale paigaldati kivivillast tuuletõkkeplaat (30 mm paksune Paroc Cortex).

Fassaadikatteks oli puitlaudise ja tsementplaatide kombinatsioon. Puitlaudis kinnitati tulekaitsevärvi kaetud distantssliistudele, tekitades seeläbi tuulutatava fassaadi. Fassaadilaudis ei olnud eraldi tulekindlust tõstvate vahenditega töödeldud, vaid värvitud tavalise välistingimustesse sobiva värviga.

Tule levik tuulutuspilus võib toimuda oluliselt kiiremini kui fassaadi välispinnal. Lisaks võib tuulutuspilus kasutatavate materjalide mittetäielikul põlemisel (ingl k smouldering) tuli levida aeglaselt kuid pika aja vältel edasi nii tuulutuspilus kui ka läbi isolatsiooni või muude mingis fassaadisüsteemis kasutatud süttivate materjalide. Tule leviku vältimiseks paigaldatakse tuulutuspilusse tuletõkestid (fire stops).

Antud katses oli tuulutuspilu katkestatud horisontaalsete puitlaudade ja kivivillast tuletõketega, mis olid paigaldatud avade üla- ja alapinda järgides juhiseid (Just ja Brandon, 2017). Selline lahendus oli käesoleva katse valguses mõistlik, kuid tuulutuspilu katkestamine/sulgemine võib mõjutada fassaadi ehitusfüüsikalist toimimist.

Spetsiaalsed tuulutuspilusse mõeldud tuletõkestid koosnevad tavaliselt võrgust, mis fikseerib fassaadi kindlasse kohta kõrgel temperatuuril paisuvast materjalist riba. Seejuures võimaldab selline tuletõkesti tavaolukorras õhu vaba liikumist tuulutuspilus. Selles katses kasutati kivivilla ribasid, mis liimiti tuulutuspilusse distantssliistude vahele, kui odavat alternatiivi paisuvatele tuletõkestitele. Lisaks kasutati ühes tuulutuspilus akna kohal kivivilla riba asemel paisuvat värvi.



Joonis 4. Kivivillast tuletõkestid ehituse ajal

Puit on põlev materjal ning see seab tema kasutusele fassaadides lähtudes tuleohutusest teatavaid piiranguid. Tulekaitsevärvid ja –immutusvahendid ei pruugi välistingimustes olla piisavalt vastupidavad ning nende tulekaitseomadused vähenevad ajas. Selles katses uuriti ka tulekaitsevahenditega töötlemata puitlaudise kasutamise võimalusi ning ohutuse tagamiseks ja tule leviku tõkestamiseks vajalikke meetmeid. Selleks piirati tuleleviku võimalusi tuulutuspilus, sest õhukesele fassaadilaudisele on eriti ebasoodne kuumuse mõjumine mõlemalt poolt. Lisaks jagati suured puitlaudisega kaetud pinnad seksioonideks mittepõlevate tsementplaatidega, mis paigaldati aknaavade vahelisse pinda horisontaalsete ribadena. Et tuli leviks alumisest aknast ülemisele korrusele, peab leek ületama umbes meetri laiuse mittepõlevast materjalist fassaadipinna.

Teisel korrusel kasutati tuletõkkeaknaid, millel on EI30 vastupidavus. Märkimist väärib asjaolu, et EI30 on katsetatud ja kehtib standardtulekahju tingimustes, mida aga käesolevas katses ei olnud. Seega võivad ülemise korruse aknad puruneda kiiremini kui 30 minuti möödudes või püsida tervena ka pikemalt.



Joonis 5. Katsehoone kombineeritud fassaad puitlaudise ja tsementplaatidega

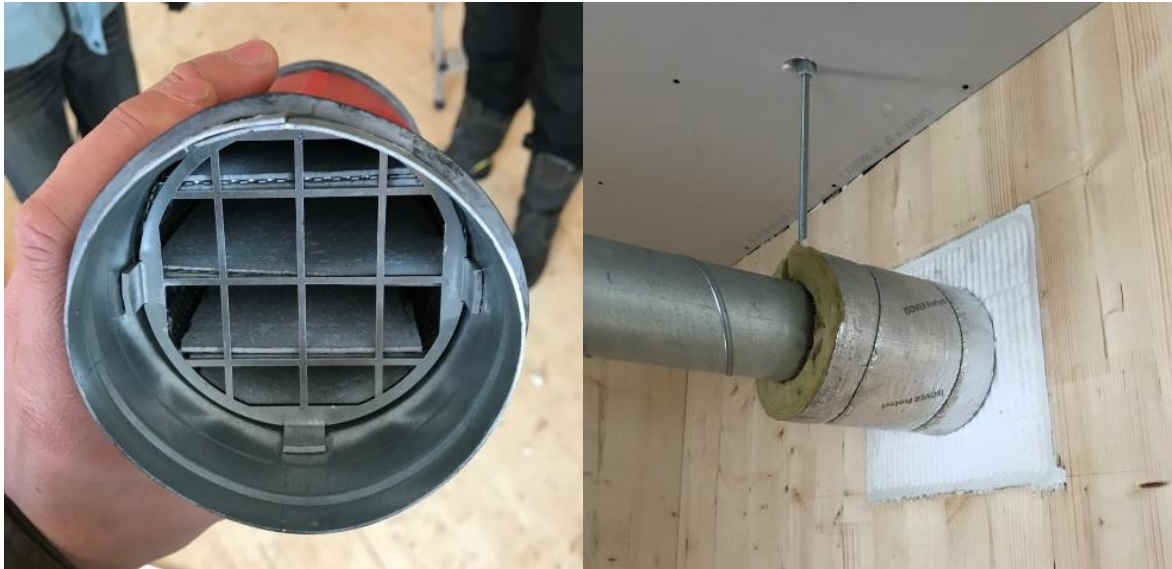
Liited ja läbiviigud

Katsehoones olid esindatud erinevad sõlmed. Kogu hoone kõrgustes seinapaneelides oli transpordi piirangute tõttu vertikaalne jätkuvuuk. Vertikaalsed vuugid ja nurgad olid tihendatud kõrgenenud temperatuuril paisuva vuugilindiga. Vahelagi toetas seinapaneelidele kahest otsast. Teised servad olid seina kõrval kinnitamata. Vahelae kõigis sõlmedes kasutati samuti paisuvat vuugilinti. Seinaga mitte kinnitatud liitekohta paigaldati topelt lint. Vuukides kasutatud lint oli Tenmat FireFly 104E.

Varasemates ruumtulekahjukatsetes (Medina Hevia, 2015; McGregor 2014) on täheldatud, et ristkihtpuitplaatide puhul võib probleemiks olla tule ja suitsu levik. Seetõttu tihendati vuugid paisuva vuugilindiga, et vältida terviklikkuse ja isolatsiooni kriteeriumide saavutamist. Vt liidete skeemid joonis 4. Detailid.

Tule levik läbi ventilatsioonivade ja muude läbiviikude on olnud laastavate tulekahjude üheks põhjuseks (näiteks aastal 2013 Klintbackenis, Luleås). Katsehoones tehti üks suurem ventilatsioonitoru läbiviik seinast ning mitmeid väiksemaid auke seinaga lakke.

Seinast läbiviidud torus oli paisuva materjaliga kaetud võrk, mis kõrgel temperatuuril sulgeb ventilatsioonitoru. Ventilatsioonitoru välispinda kaitses kivivilla kiht. Väiksemad läbiviigud tehti juhtmete ja väikeste torude jaoks, mis olid vajalikud mõõtmiste teostamiseks. Läbiviigud tihendati erinevate tulekindlate mastiksiga.



Joonis 6. Ventilatsioonitoru. Vasakul näha paisuva materjaliga kaetud võrk, paremal vaade ruumi poolt valmis ventilatsioonipaigaldisele

Eripõlemiskoormus

Katsehoone ruum sisustati mööbliga, millega tagati eripõlemiskoormus 600 MJ/m^2 . Kõigepealt sorteeriti mööbel materjalide kaupa ning komponendid kaaluti. Seejärel arutati vajalik mööbli kogus vastavalt Eesti standardi EVS 812-7:2008 lisa B toodud keskmistele kütteväärtustele.

Joonised

1. Plaanid, M1:50
2. Lõiked M1:50
3. Vaated, M1:50
4. Detailid, M1:20
5. CLT termopaarid, plaanid, M1:50
6. CLT termopaarid, lõiked, M1:50
7. Kipsi termopaarid, plaanid, M1:50
8. Kipsi termopaarid, lõiked, M1:50
9. Fassaadide termopaarid, plaanid, M1:50
10. Fassaadide termopaarid, vaated, M1:50
11. Liidete termopaarid, plaanid, M1:50
12. Liidete termopaarid, lõiked, M1:50
13. Ruumi termopaarid, plaanid, M1:50
14. Ruumi termopaarid, lõiked, M1:50
15. Avade termopaarid, plaanid, M1:50
16. Avade termopaarid, lõiked, M1:50

Katsehoone ehitus

Katsehoone püstitati Sisekaitseakadeemia Päästekolledži harjutusväljakule Väike-Maarja lähedale.



Joonis 7. Liimpuidust alusraam ja lühem sein



Joonis 8. Esimese korruse põrandaplaadi paigaldus



Joonis 9. CLT läbilõige erinevate kihipaksustega



Joonis 10. Kandekonstruktsioonid



Joonis 11. Kivivilla paigaldus pikemale fassaadile



Joonis 12. Kivivill ja tuuletõke fassaadil



Joonis 13. PIR fassaad



Joonis 14. PIR fassaad koos distantslüstude ja kivivillast tuletõkestitega



Joonis 15. Kivivillaga fassaad koos fassaadikattega (puitlaudis ja valged tsementplaadid)



Joonis 16. Esimese korruse sisustus (vasakul seinal plaattermomeeter)



Joonis 17. Mõõteseadmete juhtmed katsehoone ümber



Joonis 18. Mõõteseadmed ja juhtmestik katsehoone ümber

7. Prognoos

Käesolevas peatükis esitatud graafikud, kirjeldused, sündmused ja nende toimumise võimalikud ajad on leitud vastavalt Brandoni (2016) mudelile, kus ei ole tähistatud teisiti.

Lähteandmed

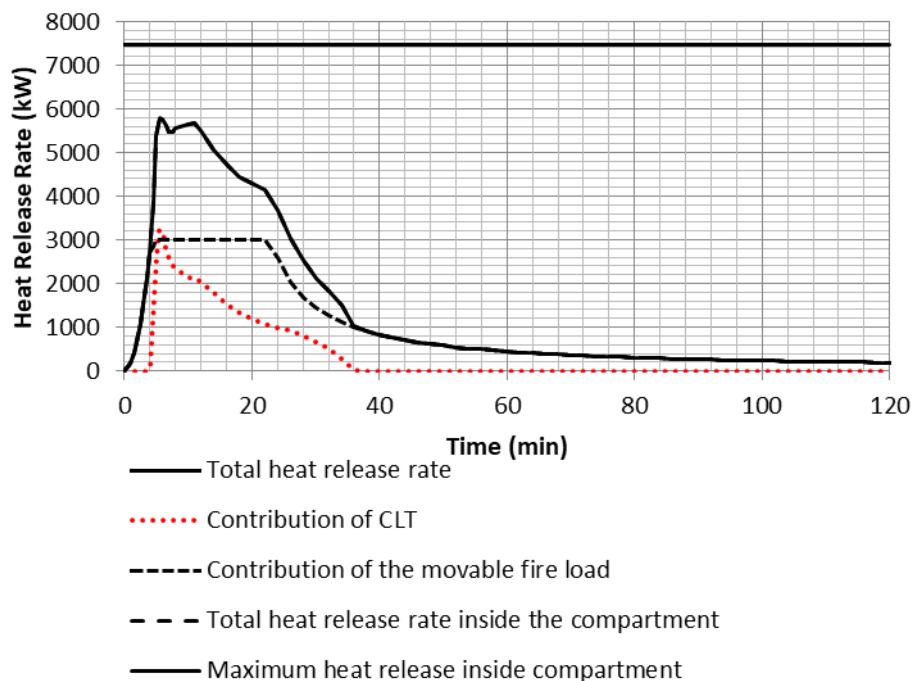
Test parameters	
Room dimensions	
3.5	b (m)
4.5	w (m)
2.5	h (m)
Exposed CLT surface	
20	(m ²)
Window width (total)	
2.8	(m)
Window height	
1.5	(m)
Fire load density	
600	MJ/m ²

Tulekahju dünaamikat mõjutavad parameetrid:

flow coefficient	0.45
Fire growth rate (kW/s ²)	0.047
$Q/(A*\text{sqrt}(H))$	1354.5
Excess fuel fraction	1
Combustion efficiency	0.8
Fraction of fuel load at start of decay	0.5
Heat release rate density (kW/m ²)	190
convection coefficient	30

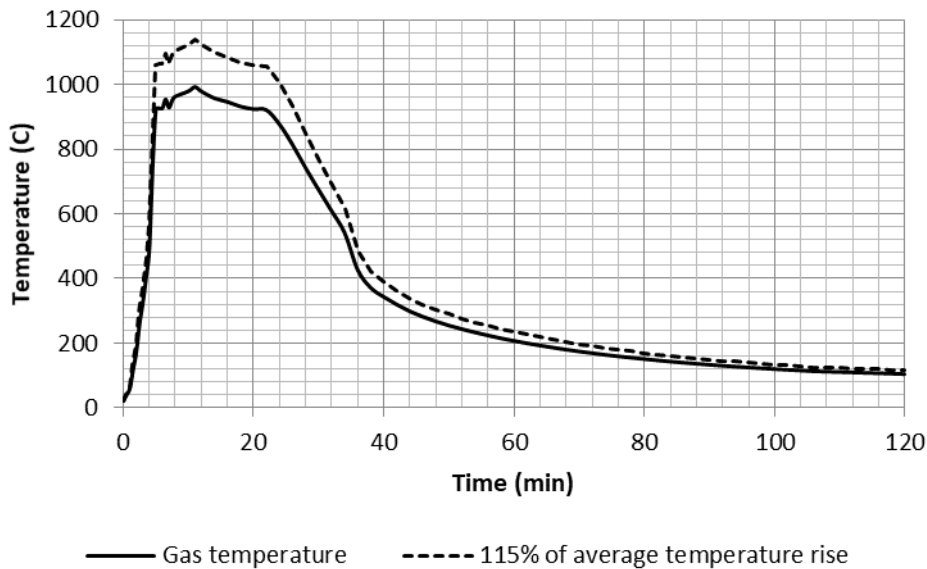
Temperatuurid ja soojuse eraldumise määrad

Soojuse eraldumise määrad:



Joonis 19. Soojuseralduse määrade prognoos

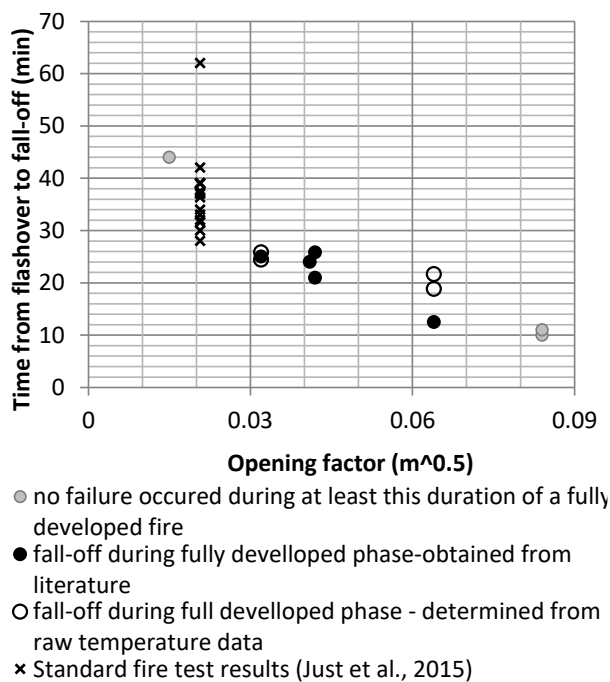
Ruumitemperatuuri prognoos on esitatud Joonis 20. Temperatuur lae lähedal võib olla keskmisest prognoositud temperatuurist 15% võrra kõrgem. Seda eeldust on kasutatud termiliste simulatsioonide abil kipsplaatide temperatuuride leidmiseks.



Joonis 20. Temperatuuri prognoos ruumi keskel ja lae läheduses

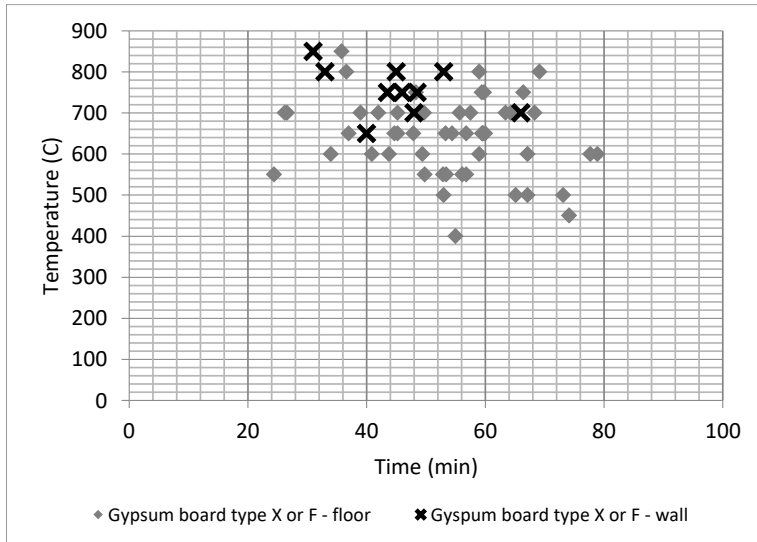
Temperatuurid kipsplaatide taga laes

Tuginedes allpooltoodud (Joonis 21) graafikule, võib eeldada, et esimene kiht kipsi võib laest alla kukkuda 16 minutit pärast lahvatust (väljakujunenud tulekahju algust). Prognoosi kohaselt toimib lahvatus 4 minutit pärast süütamist (siinkohal on erisus katsega, mille puhul aknad on alguses suletud). Seega toimub esimese laekipsi allakukkumine simulatsioonis 20 minuti pärast. Sarnasel eeldusel leiti ka teise kipsikihi kaitseae.



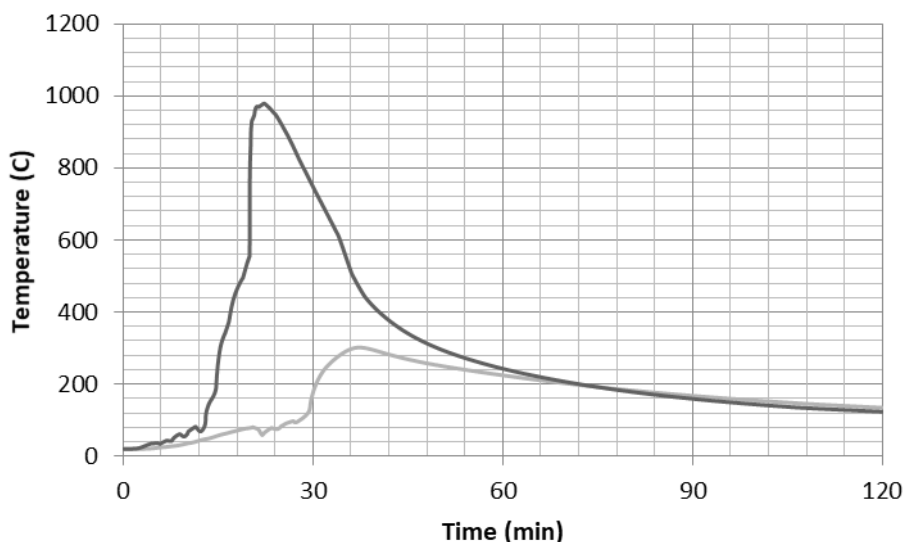
Joonis 21. Aeg lahvatusest kipsplaadi ärakukkumiseni sõltuvalt avade tegurist (graafik Brandon ja Barber, 2018)

Teise kipsikihi ärakukkumise kohta pole otseseid katseandmeid (parameetriliste tulekahjude kohta). Kui katses toimub teise kipsikihi ärakukkumine laest, saab see juhtuda alles tulekahju häbumisfaasis ning vajaks täpsemat hinnangut. Kuna standardtulekahju on tegeliku tulekahju keskmise – väljakujunenud tulekahju – faasi üldistus, saab standardtulekahju katseandmete põhjal teha eeldusi vaid tegeliku tulekahju väljakujunenud faasi kohta. Tuginedes täismõõdus standard-tulekatsete andmetele on eeldatud, et teine kipsikiht kukub ära kui tema taga tõuseb temperatuur 500°C-ni.



Joonis 22. Temperatuurid tuletõkke kipsplaatide taga ärakukkumise hetkel (Just, 2010)

Proгноositud temperatuure esimese ja teise kipsplaadi taga illustreerib Joonis 23. Tuginedes simulatsioonidele, hakkab ristkihtpuut kipsi taga söestuma, kui kasutatakse kaht kihti 15 mm paksust kipsplaati. CLT söestumine muudaks pisut põlemiskoormust. Seda stsenaariumi pole siiski siinkohal analüüsitud.

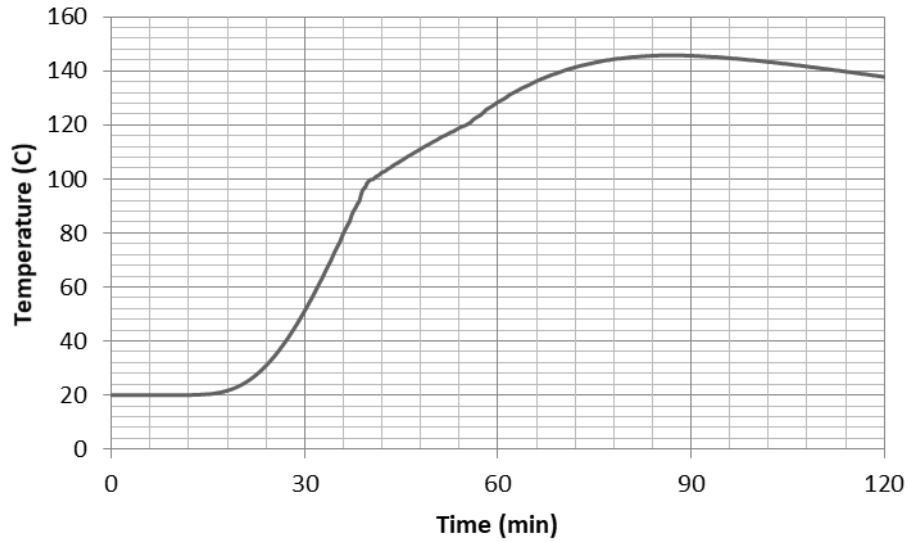


Joonis 23. Temperatuuriprognosis esimese (tumehall) ja teise (helehall) kipsikihi taga

Temperatuurid liimvuugis

Eeldatav kihtide ärakukkumine liimi pehmenemise tõttu toimub 200°C saavutamisel liimvuugis. Kuna eesmärgiks on liimvuugi pehmenemise täielik vältimine (ehk ei toimu lamelli ärakukkumist), on

esimene CLT lamell projekteeritud tavapärasest paksem – 40 mm. Lamelli suurema paksuse tõttu jääb mudeli kohaselt kogu katse vältel temperatuur liimvuugis alla pehmenemise temperatuuri ning seega pole oodata kihi ärakukkumist. Samas kätkevad arvutusmodelid alati endas teatavad määramatust, mistõttu võib ka veidi pikem tulekahju kestus viia kihi ärakukkumiseni.



Joonis 24. Temperatuurid liimvuugis esimese puidulamelli taga (40 mm sügavusel)

8. Tulekatse

Stsenaarium

Valitud parameetritest tulenevalt võis eeldada väga tõsist tulekahju, sest:

- eripõlemiskoormus 600 MJ/m²
- puudub sprinkler
- päästemeeskonna sekkumine ei toimu enne 2 tunni möödumist.

Katsehoones toimus reaalne tulekahju eripõlemiskoormusega 600 MJ/m² ja avateguriga 0,072. Tulekahju süüdati alumisel korrusel akende ja kardinade läheduses paikneval diivanil. Seejärel uks suleti ning kaeti väljastpoolt kaitsva kipsikihiga. Ukse termilise lagunemise jälgimiseks paigaldati temperatuuriandurid ukse ja kipsi vahele.

Akende puhul eeldati, et need purunevad hiljemalt 20. minutiks, mille järel toimub järsk temperatuuri tõus ja lahvatus tänu hapniku kiirele juurdevoolule. Kui aknad iseenesest ei purune (kõrge temperatuuri tõttu ruumis sees), anti päästjatele juhised akende purustamiseks mehaaniliselt.

Pärast lahvatust algab täielikult väljaarenenud tulekahju faas, mille puhul temperatuurid ruumis on väga kõrged ning akendest väljuvad suured leegid. Pärast kütuse (mööbli) ärapõlemist hakkab tulekahju vaibuma kuni täieliku kustumiseni.

Teine korrus peaks jääma leekidest puutumata. Teise korruse akende puhul on purunemine võimalik ning seetõttu kaeti ka teise korruse lagi ja osaliselt ka seinad kaitsva kipsplaadikihiga.

Söekihi ärakukkumine peaks olema välditud paksema tulepoolse lamelli kasutamisega, mis peaks hoidma temperatuurid liimvuugis piisavalt madalad (alla liimi sulamistemperatuuri).

Päästemeeskonna liikmeid juhendati, et leekide tungimisel läbi fassaadita seinte või vahelae tuleb fikseerida juhtumi toimumise aeg ning seejärel leegid kustutada. Katse peaks jätkuma alumise korruse ruumis.

Katsetingimused

Kuupäev ja kellaaeg: 1.11.2017 12:30-14:45

Asukoht: Väike-Maarja, Estonia

Välis temperatuur: -1..+1°C

Tuule kiirus: tuuletü

Katse ajajoonel



Mõõtmised

Katse käigus mõõdeti põhiliselt temperatuure erinevates mõõtepunktides. Selleks olid kasutusel erinevad andurid – plaattermomeetrid ja termopaarid.

Plaattermomeeter on temperatuuri mõõtmise andur, mille puhul on tagumiselt küljelt hästiisoleeritud plaat ühendatud sisuliselt termopaariga. Sellega saavutatakse plaattermomeetri suurem tundlikkus soojuskiirguse suhtes. Plaattermomeetrid paiknevad ka näiteks tulekatseahjudes ning nende mõõdetud temperatuuride põhjal juhitakse temperatuuri ahjus.

Katses kasutati K-tüüpi kroom-alumel termopaare gaasi- ja materjalitemperatuuride mõõtmiseks. Termopaar on temperatuuri mõõtmise andur, mis koosneb kahest omavahel isoleeritud traadist, mis ühendatakse omavahel punktis, kus temperatuuri soovitakse mõõta. Juhtme takistus „tõlgitakse“ logeris temperatuuri väärtuseks. Katses kasutati „tavalisi“ termopaare, mille mõõtmispiirkond on kuni 500°C ning kõrge temperatuuritaluvusega termopaare, mis annavad täpseid tulemusi ka kuni 1200°C puhul.

CLT termopaarid paigaldati tootmise käigus lamellide vahele. Ülejäänud andurid paigaldati vastavatesse kohtadesse hoone ehituse käigus kohapeal.

Katsehoonet kaaluti katse jooksul 50kN mõõtmispiirkonnaga koormuspeadega, mis olid paigaldatud seinu ja teist korrust kandva liimpuidust alusraami nurkadesse. Esimese korruse põrand kaaluti eraldi väiksemate (5kN) koormuspeadega, mis olid asusid viies kohas põrandaplaadi all.

Andurite signaalid juhiti logeritesse, kus juhtmete takistuse signaal tõlgendati ümber vastavaks väärtuseks (temperatuur Celsiuse kraadides vms). Kasutati INTAB andmelogereid.

Katse kulgu jälgiti visuaalselt ning kogu katse salvestati videole, mida katse vältel edastati ka otsepildis (vt link ptk 11). Katse käigus pildistati toimuvat tava- ja termokaameratega erinevatest vaatenurkadest.

Kustutamine

Süttivaid materjale sisaldavate hoonete kustutamisel peab kasutama efektiivseid strateegiaid tulekollete leidmiseks ja kustutamiseks nii nähtavates kui ka suletud õõnsustes.

Peamine tulekustutusstrateegia koosneb järgmistest sammudest:

1. nähtavate leekide kustutamine ruumis sees (Joonis 25),
2. nähtavate leekide kustutamine fassaadil (Joonis 26),
3. tulekollete otsimine ruumis sees termokaameraga ning kustutamine veega (Joonis 27),
4. tulekollete otsimine termokaameraga fassaadil ja tuulutusvahes (Joonis 28-Joonis 30).



Joonis 25. Nähtavate leekide kustutamine ruumis



Joonis 26. Nähtavate leekide kustutamine fassaadil



Joonis 27. Tulekollete otsimine termokaameraga ning kustutamine veega



Joonis 28. Tulekollete leidmine termokaameraga fassaadi tuulutusvahes või isolatsiooni taga ja kustutamine veega



Joonis 29. Elementide lõhkumine, et pääseda tulekoldele ligi



Joonis 30. Tulekollete kustutamine isolatsiooni taga ja tuulutusvahes veega

Tulekahju kustutati järgmiste tegevustega:

Tegevus	Kestus (min)
Nähtavate leekide kustutamine ruumis	2,5
Nähtavate leekide kustutamine fassaadil	1
Tulekollete otsimine ruumis termokaameraga ja kustutamine veega	3
Tulekollete otsimine termokaameraga fassaadi tuulutusvahes ja isolatsiooni taga	12*

* Uue kustutustehnoloogia katsetamise tõttu oli see periood paari minuti võrra pikem

Tulekahju kustutamine tuulutusvahes ja isolatsiooni taga võttis umbes 12 minutit. Olgu märgitud, et tulelevik tuulutusvahes oli katsehoone puhul piiratud mitme meetme kasutamisega ehituse faasis. Tuletõrjujaid võib aga realsuses ees oodata palju keerulisemad olukorrad, kui hoone projekteerimise ja ehituse puhul ei ole erilist tähelepanu pööratud põlevaid materjale sisaldavate fassaadide tuleohutumaks muutmise meetmete korrektsele kasutamisele. Võimalik on vajadus kustutada fassaaditulekahjusid kohtades, kus pole otsest ligipääsu põlevale kohale. Selliste olukordade puhuks katsetatigi uudset kustutussüsteemi kivivillaga isoleeritud fassaadi puhul.

Fassaadilaudisesse puuriti auk, et pääseda tuulutusvahesse. Seejärel suunati sinna süsihappegaas, mis summutab ja kustutab tulekahju. Kuigi seda meetodit on edukalt kasutatud isoleerimata tühimike efektiivseks kustutamiseks, ei olnud antud katses võimalik selliselt kustutada tulekahju kivivilla taga.



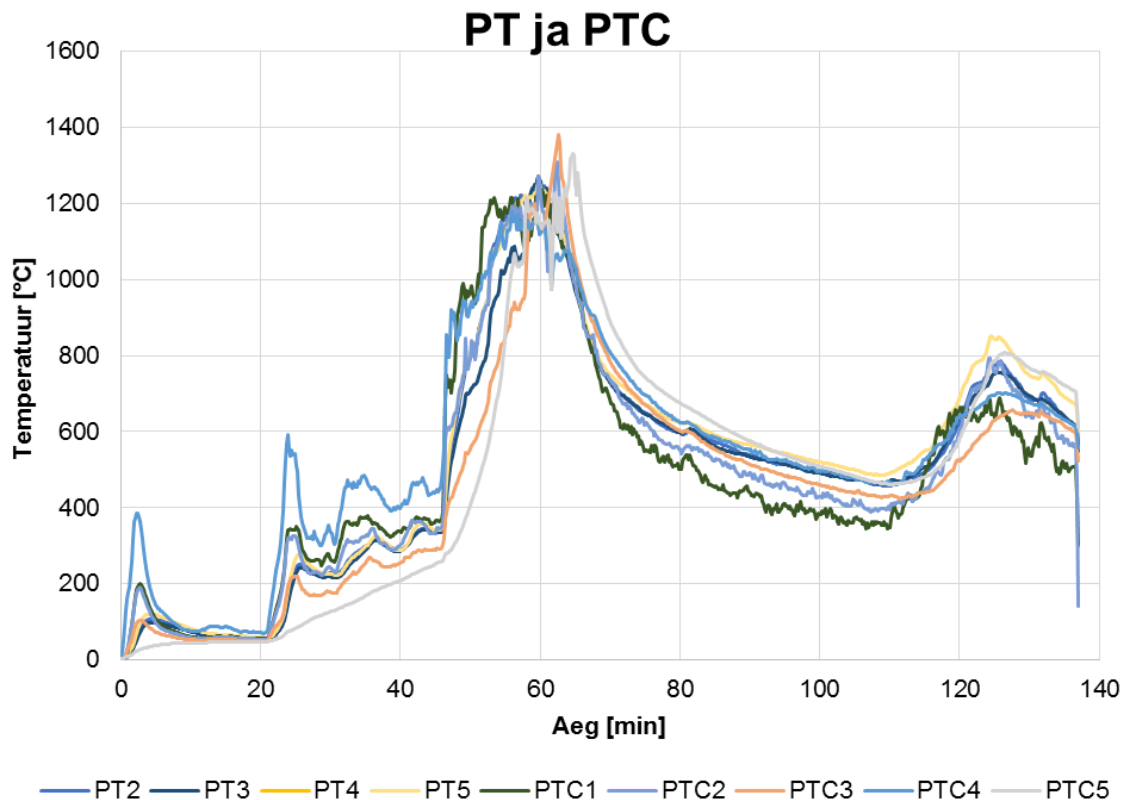
Joonis 31. Augu puurimine fassaadilaudisesse



Joonis 32. Kustutamine süsihappegaasiga

9. Mõõtetulemused

Temperatuurid

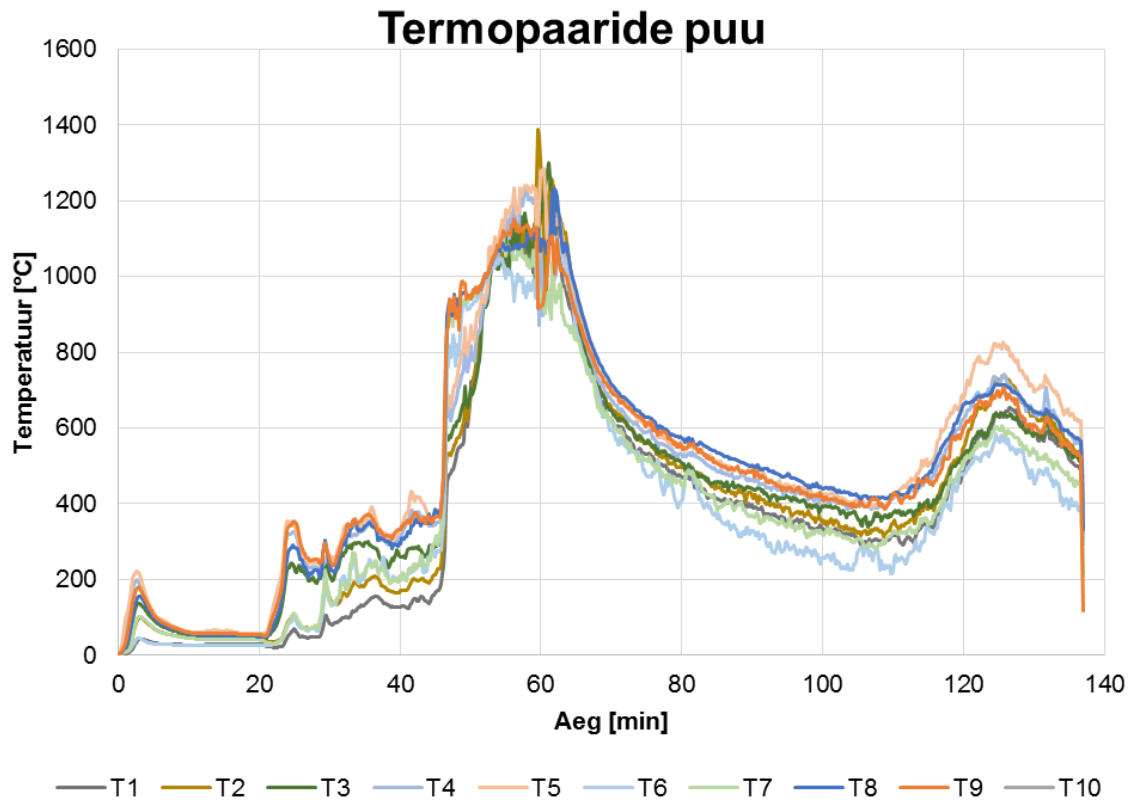


Joonis 33. Plaattermomeetrite ja nende kõrvale paigutatud termopaaride temperatuurid

Plaattermomeeter on tulekatsetes kasutatavate termomeetrite üks eritüüp, mille puhul on termopaar ühendatud plaadiga. Seetõttu on plaattermomeetrid tundlikumad kiirguse suhtes. Plaattermomeetri tagumine külg on hästi isoleeritud. Tulekatseahjudes kasutatakse plaattermomeetreid temperatuuri kontrollimiseks ahjus. Joonis 33 on tähistatud plaattermomeetrite mõõtetulemused – PT.

Iga plaattermomeetri vahetusse lähedusse paigaldati ka tavaline termopaar (PTC), et võrrelda eri viisidel mõõdetud temperatuure.

Peale süütamist toimus temperatuuri hetkeline tõus kuni umbes 400°C-ni. Seejärel langes temperatuur kiiresti alla 100°C. Pärast akende purustamist (umbes 20. minutil) hakkas temperatuur ruumis uuesti tõusma tänu hapniku juurdevoolule ja põlemise intensiivistumisele. 47. minutil toimus lahvatus, mida näitab ka järsk temperatuuri tõus. Intensiivne põlemine toimus umbes 20 minuti jooksul, mille järel algas jahtumisfaas, kus ruumitemperatuur hakkas uuesti langema, alguses järsult, seejärel aeglustuvalt. Umbes 110. minutil hakkas kivivillaga fassaadiga seinalt söekiht ära kukkuma. See põhjustas uue lahvatuse, mis oli siiski eelmisest oluliselt väiksem. Ruumi temperatuur ei tõusnud üle 600°C. Seejärel algas ka teine jahtumisfaas.

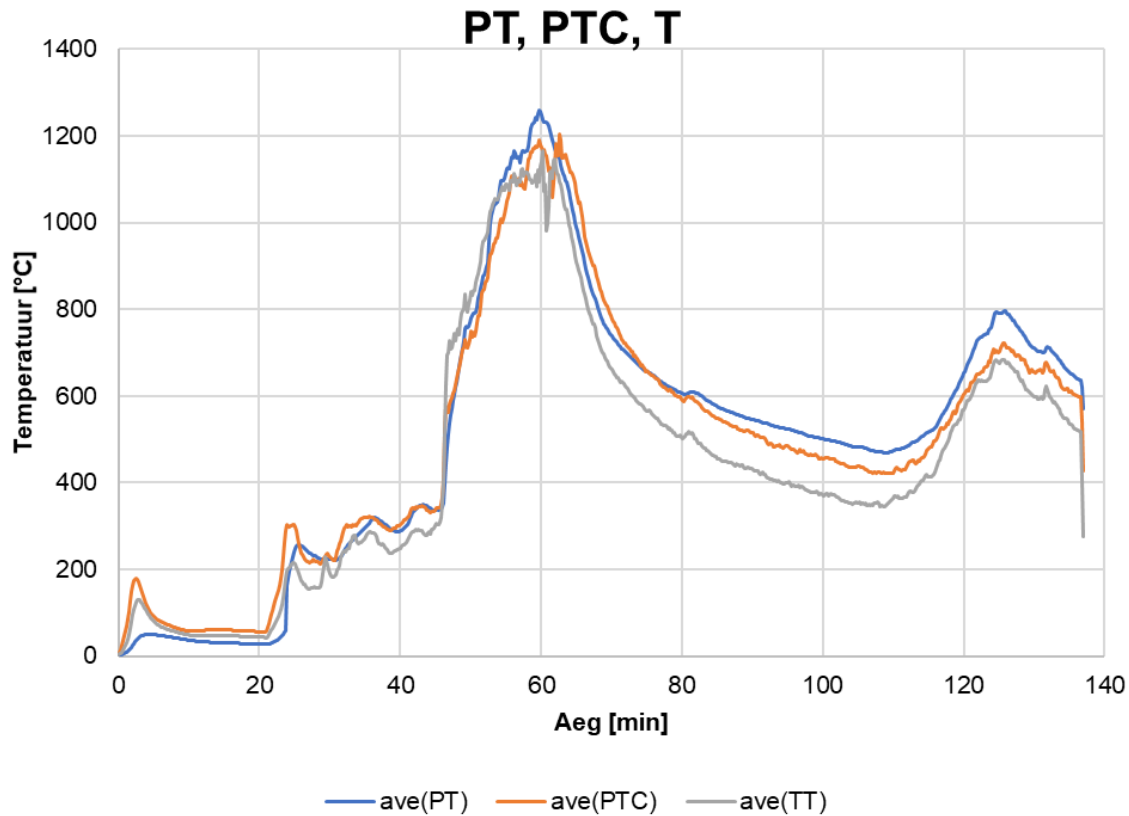


Joonis 34. Temperatuurid ruumi eri kõrgustel

Kõrge temperatuuritaluvusega termopaarid paigaldati ruumis kahte kohta viiele eri kõrgusele, et saada aimu gaasitemperatuuri homogeensusest ruumi eri paigus ja kõrgustel.

Temperatuurid tõusid kiiremini süütamisele lähemal olnud termopaarides (T6...T10) ning kõrgemal asunud termopaarides (T5 ja T10). Erinevused kõrgeima ja madalaima termopaari tulemustes erinesid kohati isegi 300°C võrra. Madalamal asunud termopaarides mõõdeti ka madalamad temperatuurid, mida ka eeldati.

Süütamisele järgnenud mõne minuti jooksul mõõdetud temperatuurid ületasid kõrgemal asunud termopaarides napilt 200°C. Ühes mõõtepunktis (T6), mis asus süütamise kohale lähedal kõige madalamal, langes temperatuur umbes 100. minutil alla 300°C, mida loetakse puidu söestumistemperatuuriks. Sellest võib järeldada, et tulekahju iseeneslik kustumine/hääbumine oli lähedal.



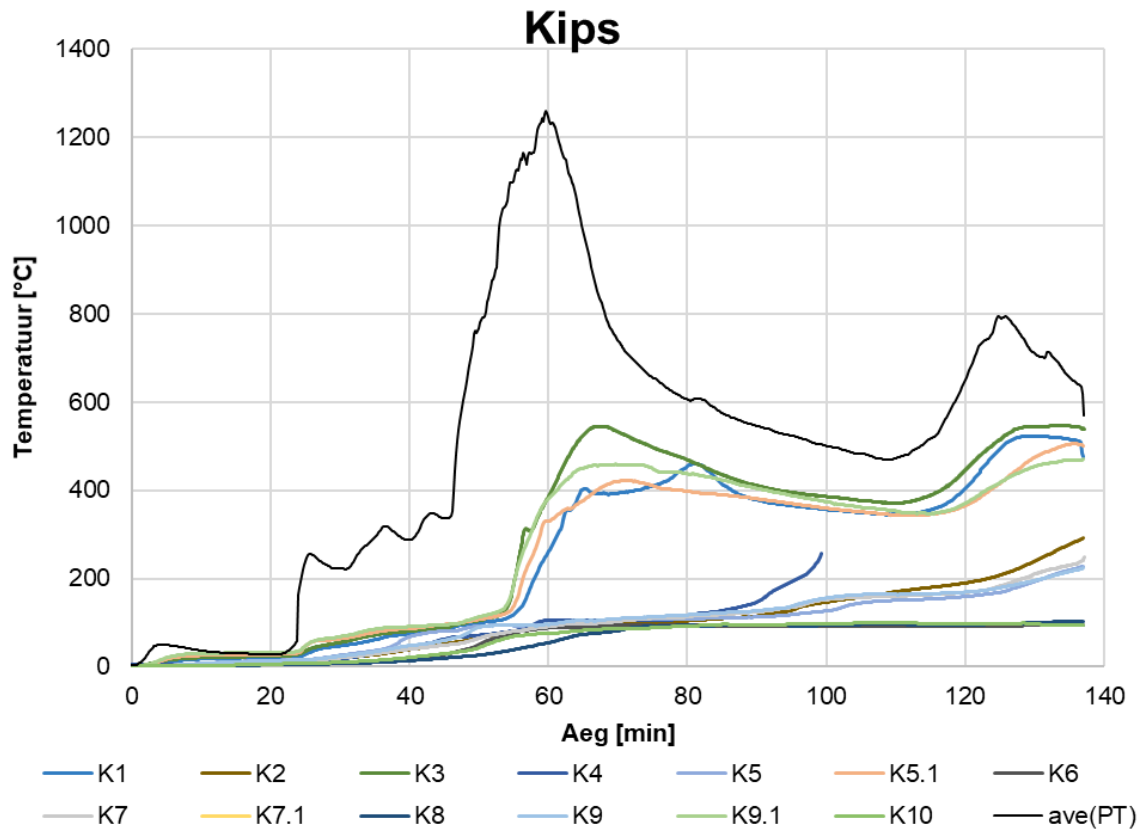
Joonis 35. Plaattermomeetrite, õhu termopaaride ja termopaaride puu keskmised temperatuurid

Plaattermomeetrite (PT), vahetult nende kõrvale paigaldatud termopaaride (PTC) ja termopaaride puu (TT) keskmiste temperatuuride võrdlust illustreerib Joonis 35.

Plaattermomeetrite näitude keskmine ei tõuse oluliselt enne akende purustamist tulekahju alguses. Samuti on PT mõõtetulemustes vähem "müra", mis tähendab, et nende reageerimine väikestele temperatuurikõikumistele on aeglasem. Väljakujunenud tulekahju ja häabumisfaasis olid PT temperatuurid kõrgemad. Seda võib mõjutada osaliselt nende paigutus, PT asusid ruumi ülaosas ning seinte lähedal.

Plaattermomeetrite vahetusse lähedusse paigaldatud termopaaride mõõdetud temperatuurid olid enne lahvatust pisut kõrgemad kui PT tulemused. Jahtumisfaasi näitavad PTC mõõtetulemused väikese viivitusega võrreldes PT-ga. Umbes 75. minutist alates on PTC mõõdetud temperatuurid madalamad kui PT kuid kõrgemad kui TT.

Termopaaride puu mõõdetud temperatuuride keskmine on õigustatult madalam kui PT ja PTC kuna TT termopaarid paiknesid eri kõrgustel ruumis ning põrandale lähemal olid madalamad temperatuurid.



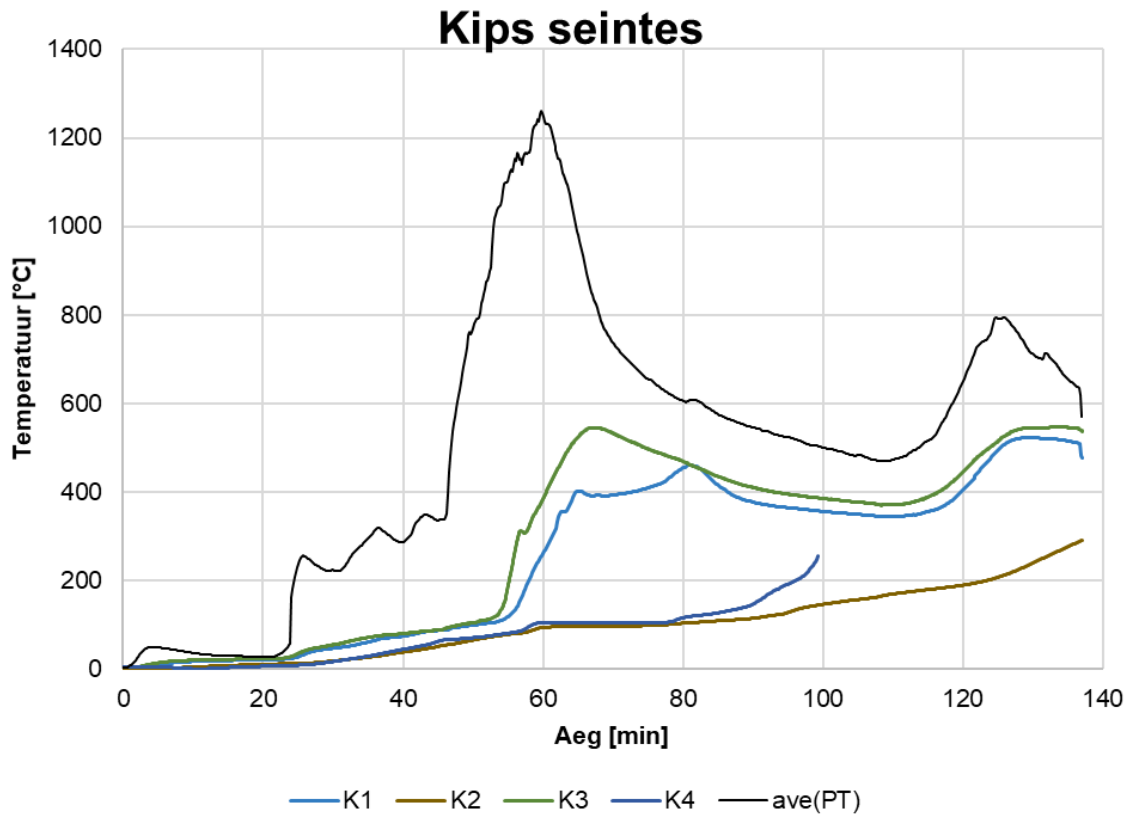
Joonis 36. Temperatuurid kipsikihtide vahel seintes ja laes

Temperatuuri järsk tõus esimese kipsplaadi taga algab nii seinas kui laes umbes 10 minutit pärast lahvatust.

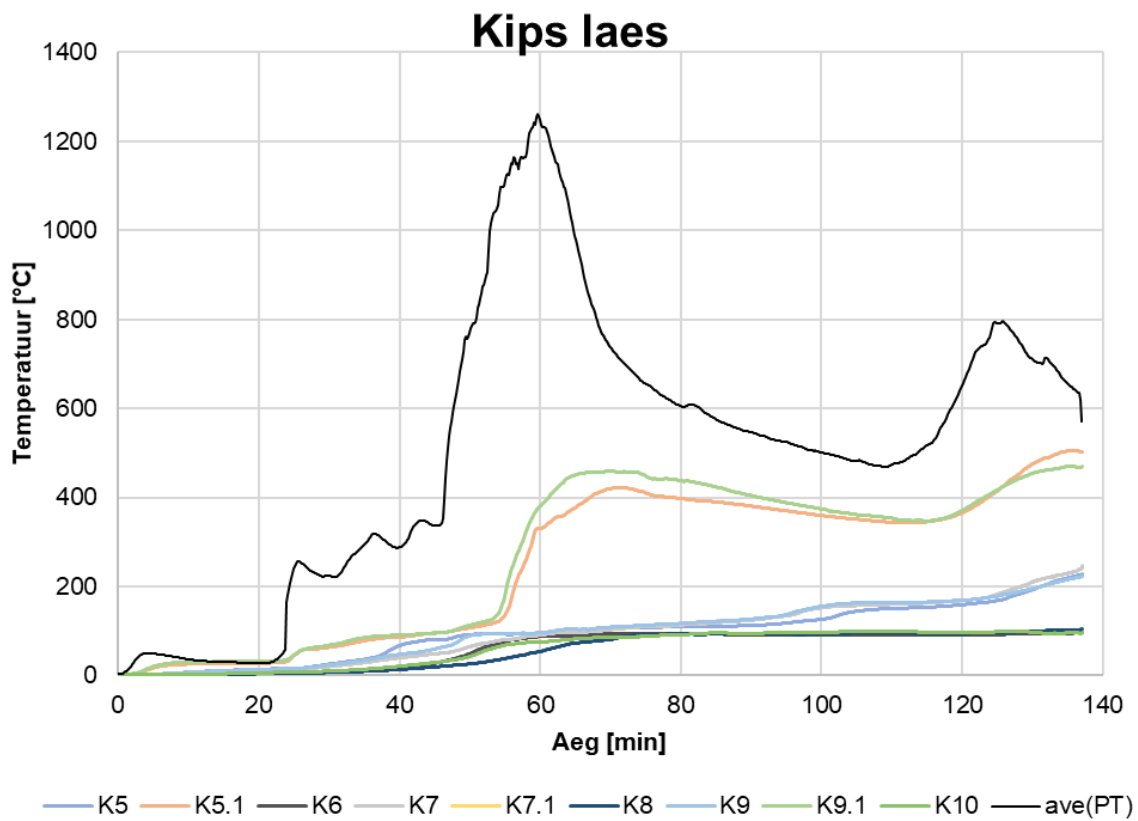
Vaatamata kiirele temperatuuri tõusule ei toimunud plaatide varisemist ei seinast ega laest. Suurim temperatuur jääb alla 600°C.

Teise lahvatuse järel ei ole kipsplaadi taga temperatuuri tõusul viivitust, see toimub umbes samaaegselt lahvatusega.

Lakke paigaldatud kipside eri kihtide taga mõõdetud temperatuuride (Joonis 38) põhjal võib järeldada, et ka kahest kipsikihist oleks antud katses piisanud, et vältida puidu söestumise algust. Seda aga eeldusel, et kipsikihid oleks olnud sama efektiivselt kinnitatud.

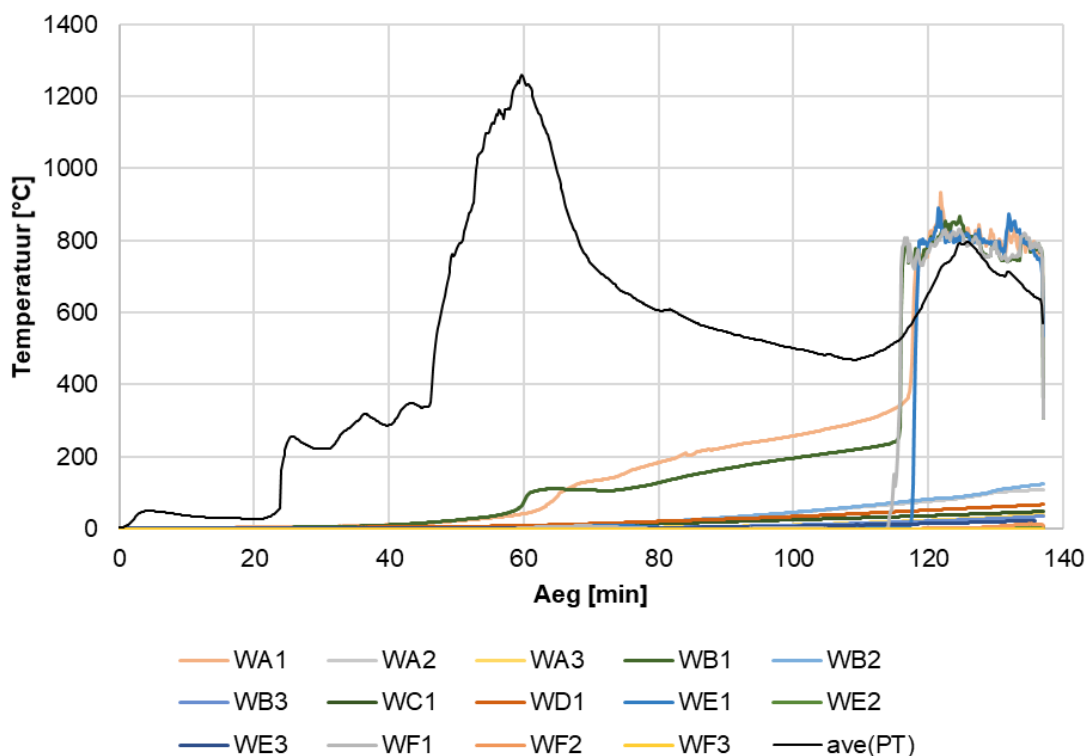


Joonis 37. Temperatuurid kipsikihtide vahel seintes



Joonis 38. Temperatuurid kipsikihtide vahel laes

CLT seinad



Joonis 39. Temperatuurid ristkihtpuidust seintes eri kihtide vahel

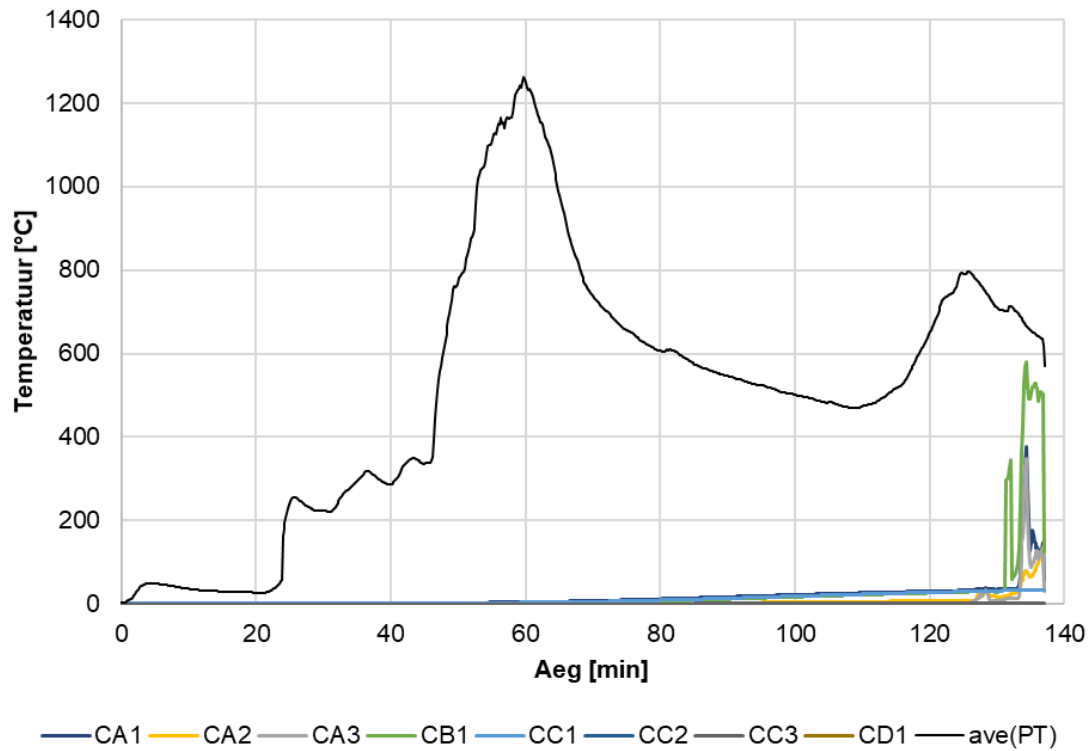
Lahvatus toimus 47. minutil. Temperatuuri tõus CLT esimese lamelli taga algab hiljem (umbes 60. minutil) ning on ootuspäraselt aeglane. Andurid WA1 ja WB1 paiknesid kipsiga kaitsmata seintes tulepoolse lamelli taga. Ühes neist mõõtepunktidest on toimunud lamelli eemaldumine (ärakukkumine) enne söestumise algust (temperatuur jäi alla 300°C), teise mõõtepunkti andmetel on ära kukkunud söekiht. Tulepoolne lamell hakkas ära kukkuma 115. minutil akna juures (samal kohas, kus tulekahju süüdati).

Kõik termopaarid teise lamelli taga näitavad temperatuure alla 150°C.

Termopaarid WC1 ja WD1 on kipsiga kaetud seintes esimese lamelli taga ning mõõdetud temperatuuritõus on väike.

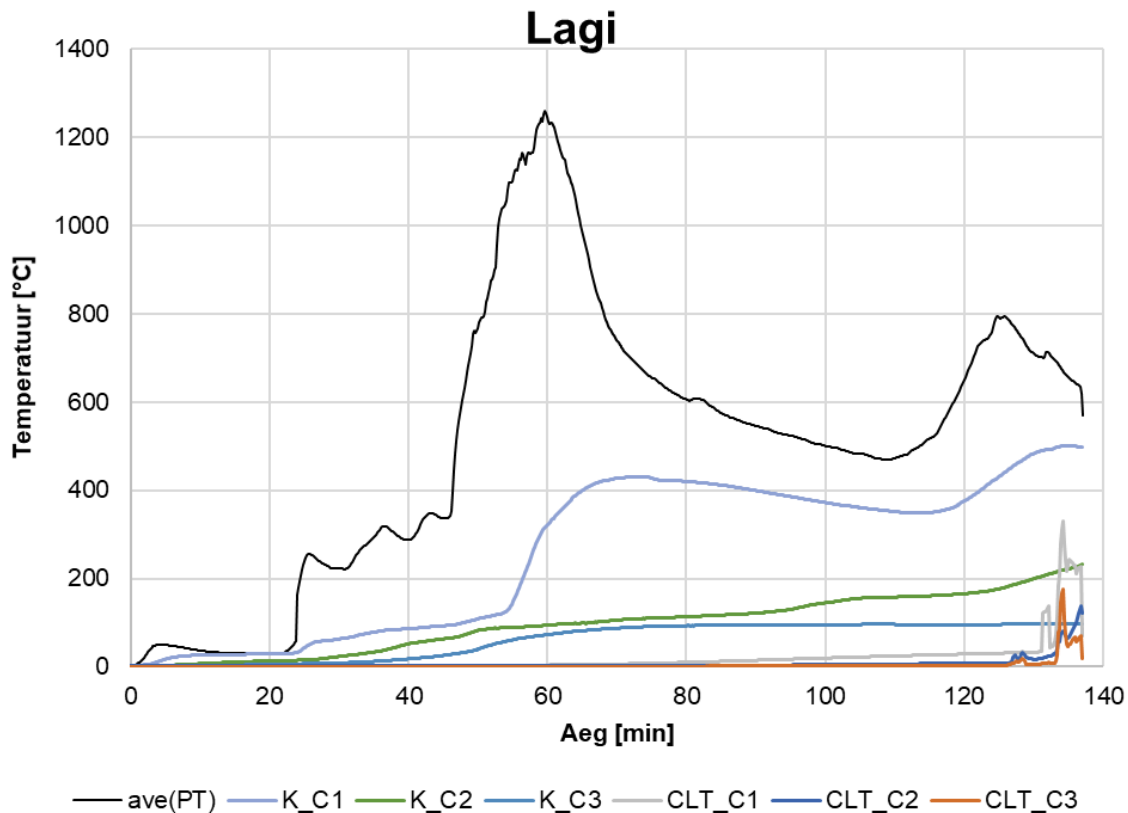
Termopaarid seeriastest WE ja WF olid paigaldatud teisele korrusele. Temperatuuri järsk tõus termopaarides WE1 ja WF1 on tingitud esimese korruse tulepoolse lamelli ärakukkumisest. Teise ja esimese korruse termopaarid paigaldati CLT sisse tootmise ajal ning teise korruse traadid jäid tule kätte samal ajal kui esimesel korrusel toimus söekihi ärakukkumine.

CLT lagi



Joonis 40. Temperatuurid ristkihpuidus laes

Lakke oli paigaldatud 3 kihti 15 mm paksust tuletõkkekipsi. Jooniselt 37 järeldub, et kipsi taga ei alanud söestumine. Seega on käesoleval graafikul pärast 130. minutit toimunud häired mõõtmistes, mis oli tingitud asjaolust, et vahelae termotraadid kulgesid fassaadil CLT ja PIR isolatsiooni vahel. Ilmselt on tulekahju lõpus temperatuurid oluliselt tõusnud CLT välispinnal, kui tuli pääses PIR isolatsiooni taha.

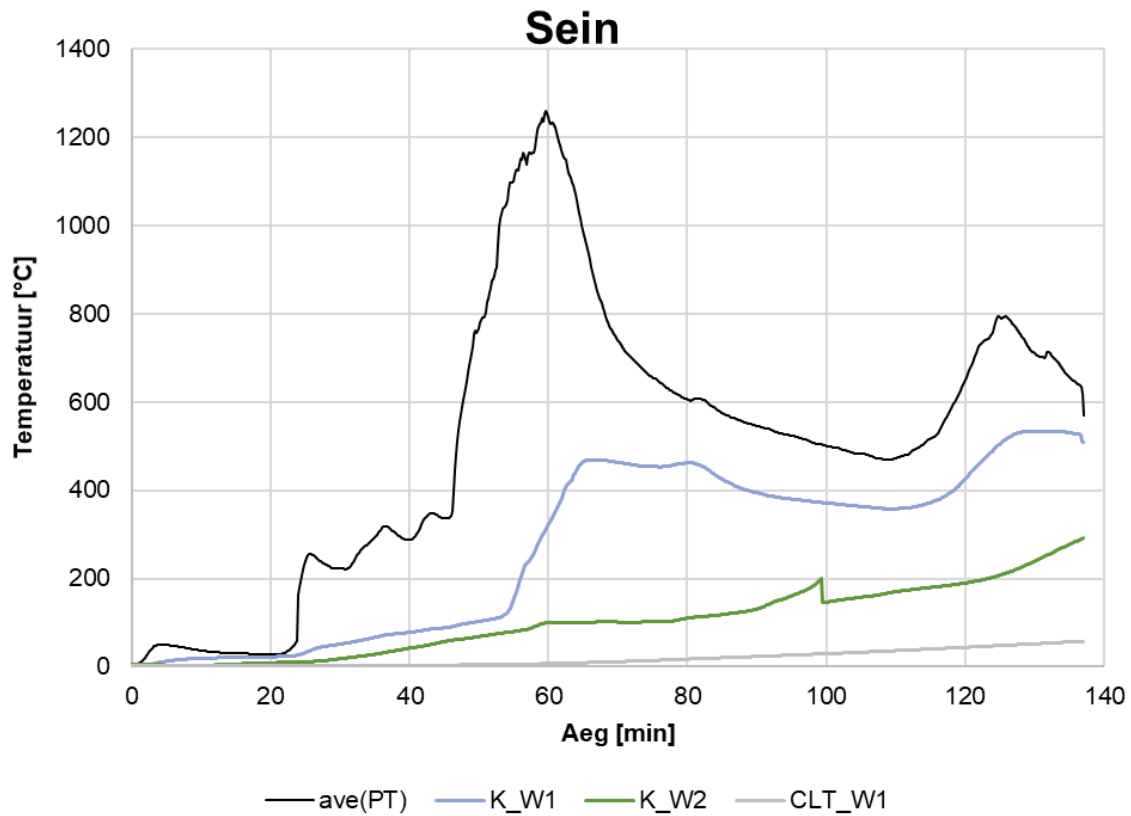


Joonis 41. Keskmised temperatuurid lae eri kihtides

Keskmised temperatuurid erinevate kihtide taga laes on näidatud Joonisel 41, ruumitemperatuur ave(PT), esimese kipsikihi taga K_C1, teise kipsikihi taga K_C2, kolmanda kipsikihi taga (ehk CLT pinnal) K_C3, esimese CLT lamelli taga CLT_C1, teise CLT lamelli taga CLT_C2, kolmanda CLT lamelli taga CLT_C3.

Kolmanda kipsikihi taga oli temperatuur katse lõpus umbes 100°C, seega on välistatud, et CLT sees olid kõrgemad temperatuurid alates 130. minutist. Tegemist on mõõteveaga, mis võib olla tingitud näiteks traatide kaitsekihi kahjustumisest mõnes muus kohas, mis on tekitanud termopaari kahes traadis kokkupuute mõnes teises kohas, mitte kindlaksmääratud mõõtepunktis.

Kolmekihiline kips oli äärmiselt efektiivne kaitse puitpindade söestumise eest.



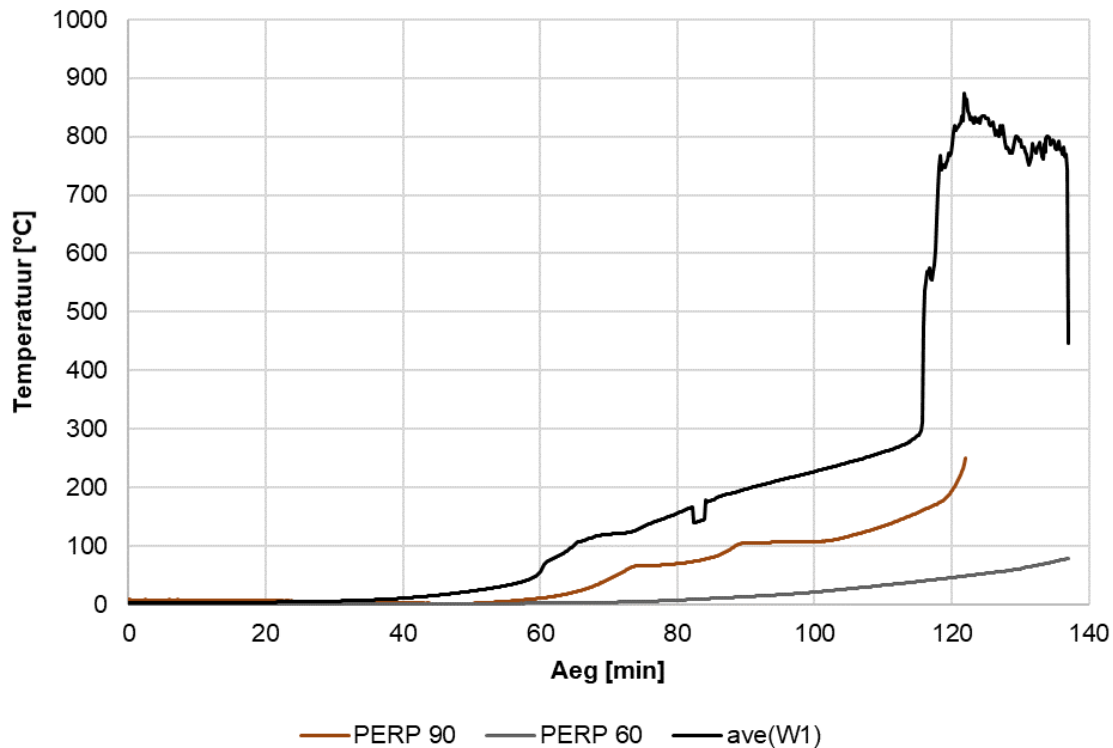
Joonis 42. Keskmised temperatuurid seina eri kihtides

Keskised temperatuurid erinevate kihtide taga seinas on näidatud Joonis 42, ruumitemperatuur ave(PT), esimese kipsikihi taga K_W1, teise kipsikihi taga (ehk CLT pinnal) K_W2, esimese CLT lamelli taga CLT_W1.

Kahekordse kipsi taga oleks puit hakanud söestuma pikema katse puhul, sest temperatuur on umbes 300°C.

CLT esimese lamelli taga on temperatuur aeglaselt tõusnud, kuid siiski väga madal.

Puuritud termopaarid

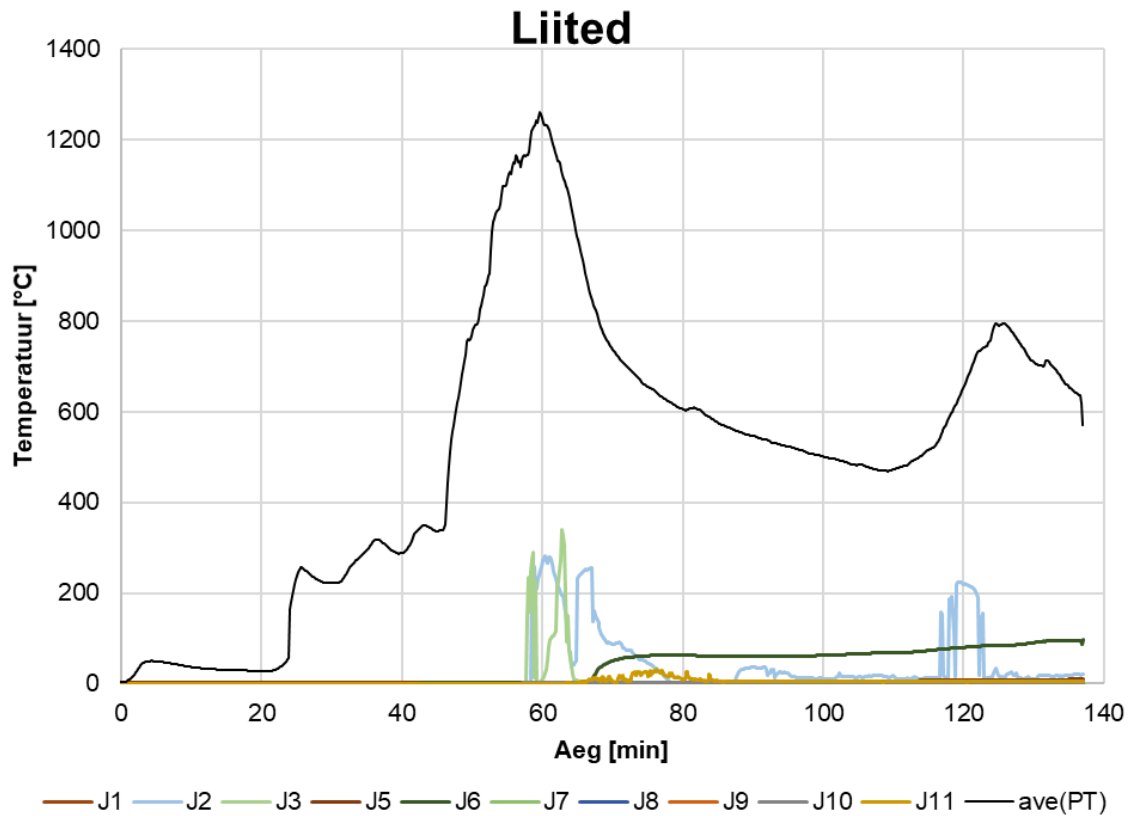


Joonis 43. Ristkihtpuitu puuritud termopaaride mõõtmistulemused

Kohapeal puuriti katsehoone (kipsiga kaitsmata) seinä väliselt poolelt kaks termopaari 90 mm ja 60 mm sügavusele. Sisepuuritud termopaaride kaugus tulepoolsest pinnast oli seega vastavalt 40 mm ja 70 mm. Graafikul on ave(W1) ja PERP90 samal kaugusel tulepoolsest pinnast.

Kõige täpsemaid mõõtmistulemusi annavad tootmise käigus katsekehasse paigaldatud termopaarid, mis peaksid vähemalt 5 cm pikkuses olema sama temperatuuri joonel. Pärast CLT tootmist katsekeha külmalt poolelt termopaaride sisepuurimist kasutatakse sagedasti, kuid selliselt paigaldatud termopaarid näitavad aeglasemat temperatuuri tõusu.

Puuritud ja tootmise käigus paigaldatud termopaaride mõõdetud temperatuuride erinevus on mõnel ajahetkel peaaegu 150°C.

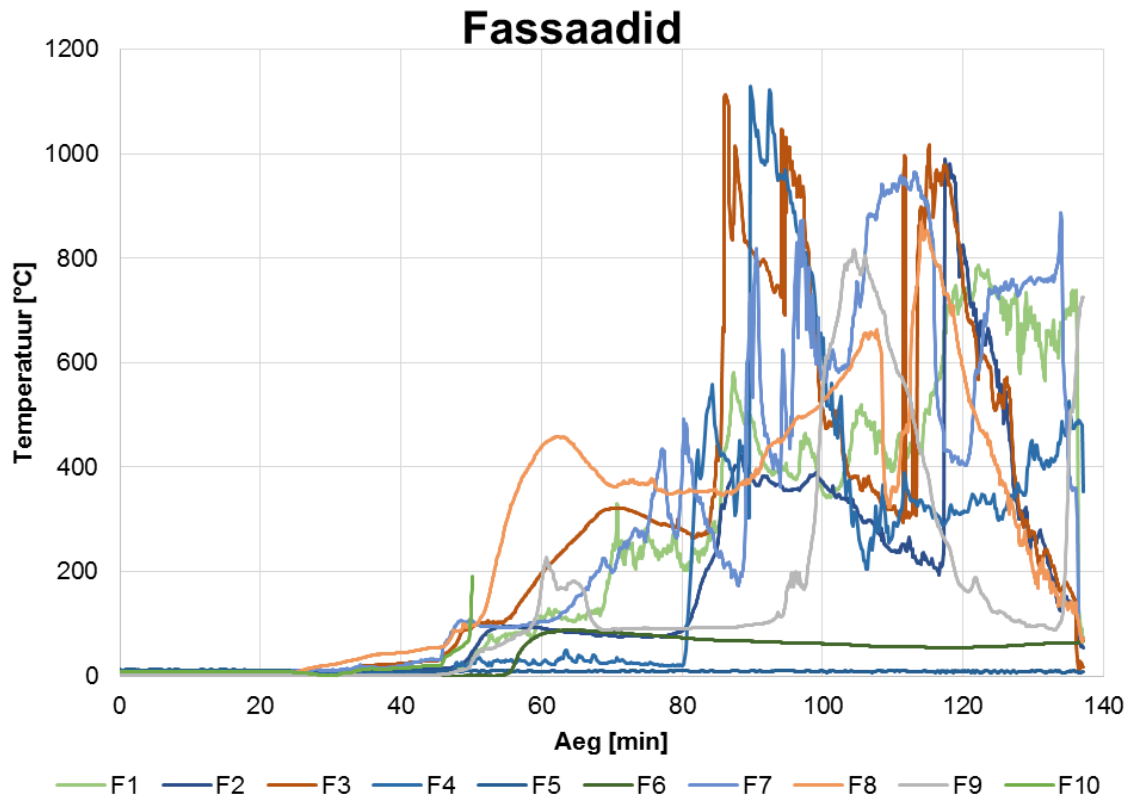


Joonis 44. Temperatuurid CLT paneelide liitekohtades

Liited kandvate puitelementide vahel olid 1. korrusel varustatud paisuva vuugilindiga, mis teatud temperatuuri saavutamisel paisub ning sulgeb pilu.

Umbes tunni möödumisel tulekahju algusest on hakanud kahes mõõtepunktis vuugilint tööle ning on sulgenud liitekohta.

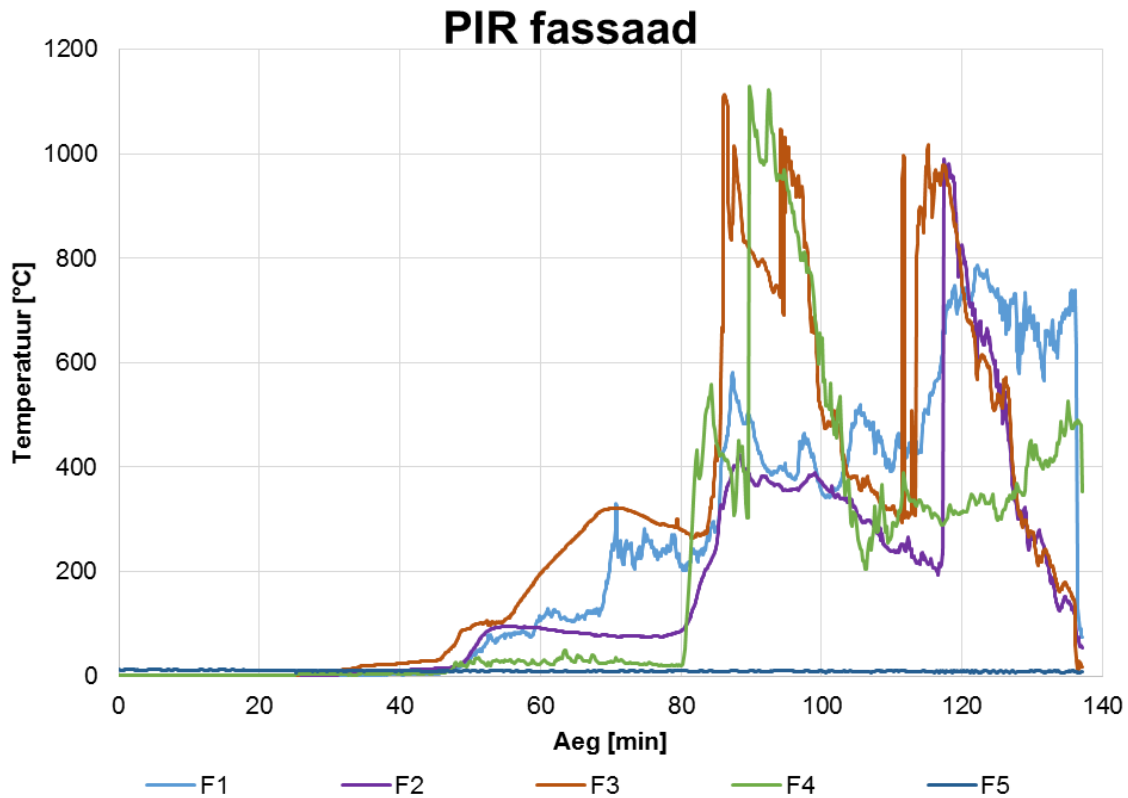
Vuugilindi paisumist oli näha teiselt korruselt vaatlusel vahelaeplaadi nurkades.



Joonis 45. Temperatuurid fassaadide eri kohtades

Termopaarid olid paigutatud mõlemale isolatsiooniga fassaadile tuulutuspilu isolatsioonipoolsele pinnale.

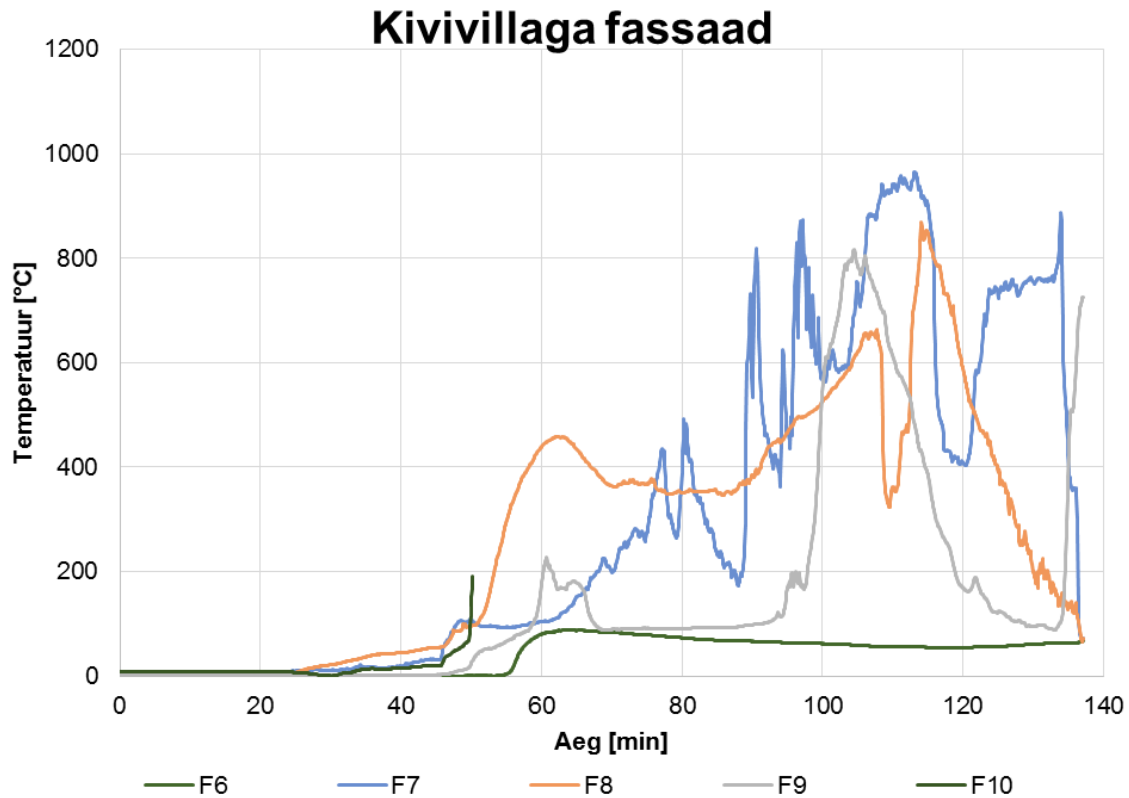
Pärast lahvatust tulekahju 47. minutil ei alanud kohe väga kiire temperatuuritõus fassaadi tuulutuspilus. Temperatuurid tõusid järsult 1100°C-ni alles umbes 85. minutil.



Joonis 46. Temperatuurid PIR isolatsiooniga fassaadil

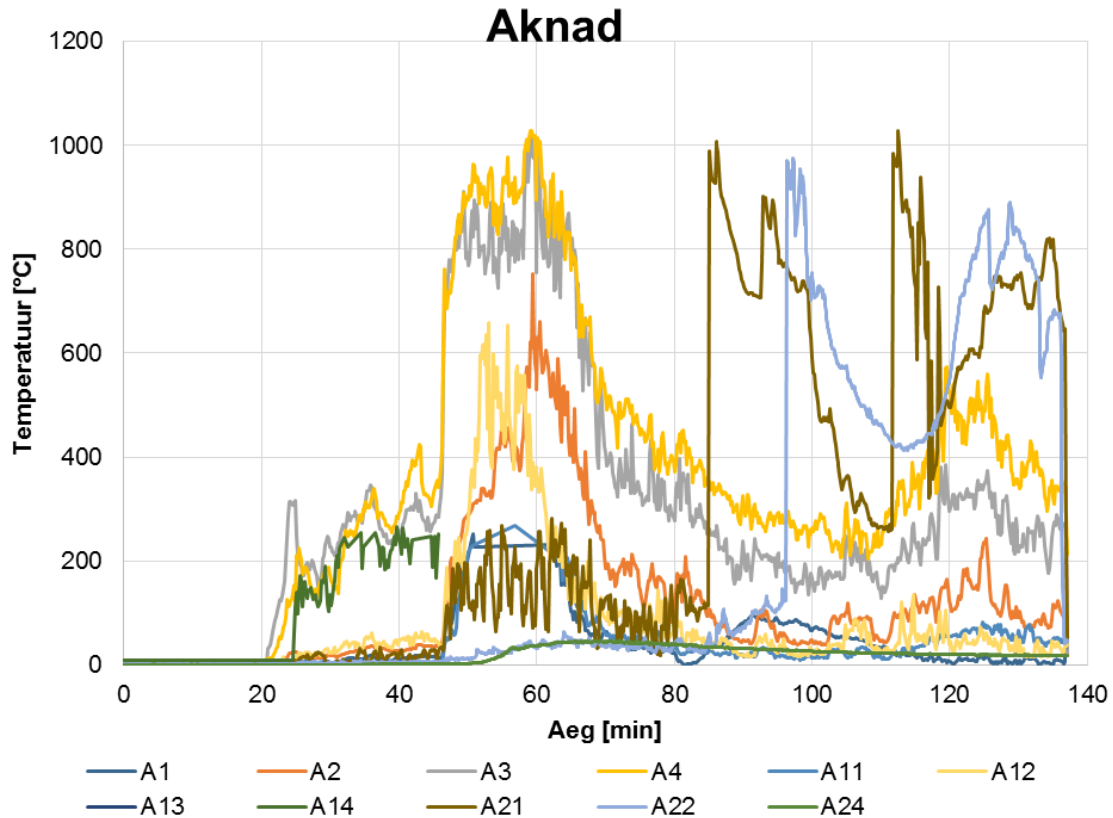
PIR isolatsiooniga fassaadil tõusid temperatuurid kõrgemaks kui kivivilla puhul. Samuti on kahjustused PIR isolatsiooniga fassaadil suuremad, CLT pinnad on ka väljastpoolt söestunud akna ümbruses.

Mõõtmispunktides F3 ja F4 toimus temperatuuritõus kõige varem seoses suurte leekide tungimisega esimese korruse aknast välja.



Joonis 47. Temperatuurid kivivillaga fassaadil

Kivivillaga soojustatud fassaadil oli temperatuuritõus madalam kui teisel fassaadil. Järsud tõusud on toimunud umbes alates 90. minutist. Pärast lahvatust 47. minutil toimus temperatuuri tõus kivivillaga fassaadil varem kui PIR fassaadil, mis võib olla tingitud asjaolust, et kivivillaga fassaadi aken purustati pisut varem.



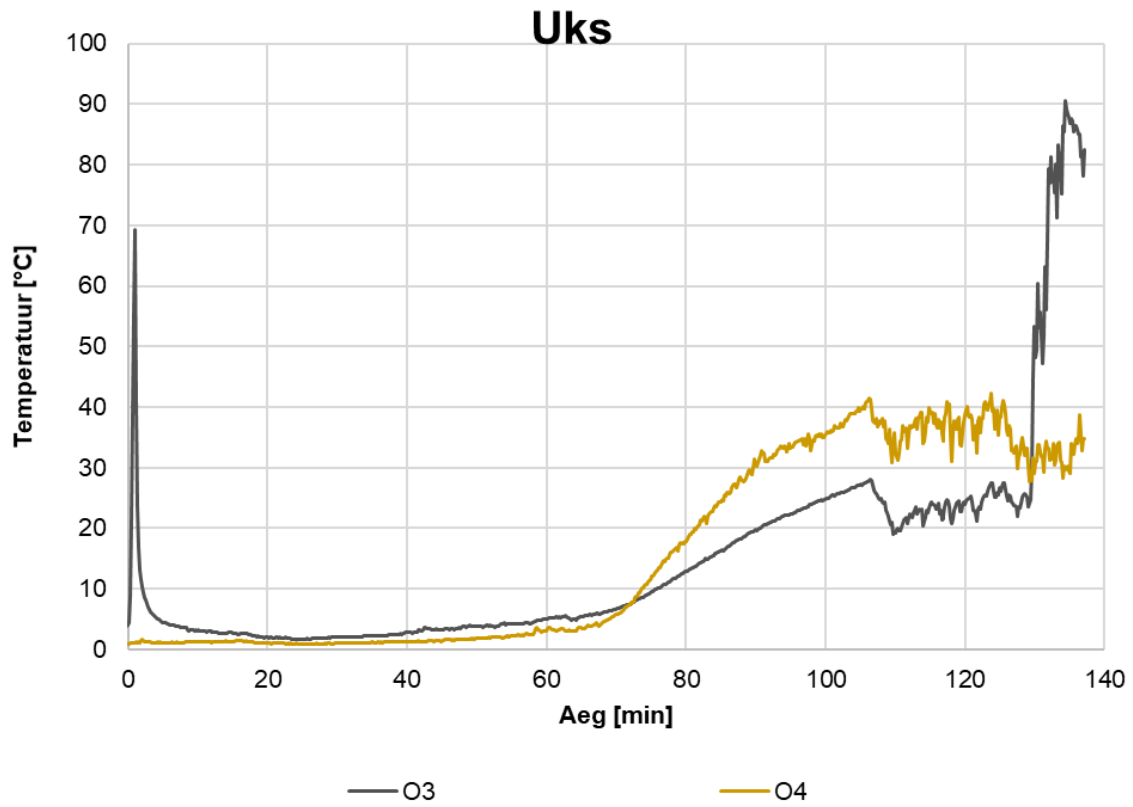
Joonis 48. Akende temperatuurid

Esimese korruse akende (A1-A14) temperatuuride puhul on temperatuuri areng sarnane ruumitemperatuuridega. Teisel korrusel on temperatuurid järsult kasvanud akende välispinnal paiknenud termopaarides (A21 ja A22). Kuna teisel korrusel oli tegemist EI30 tuletõkkeakendega, mille paketi sees oli kuumusega paisuv materjal, jäi temperatuur sisemisel küljel madalaks (A24).

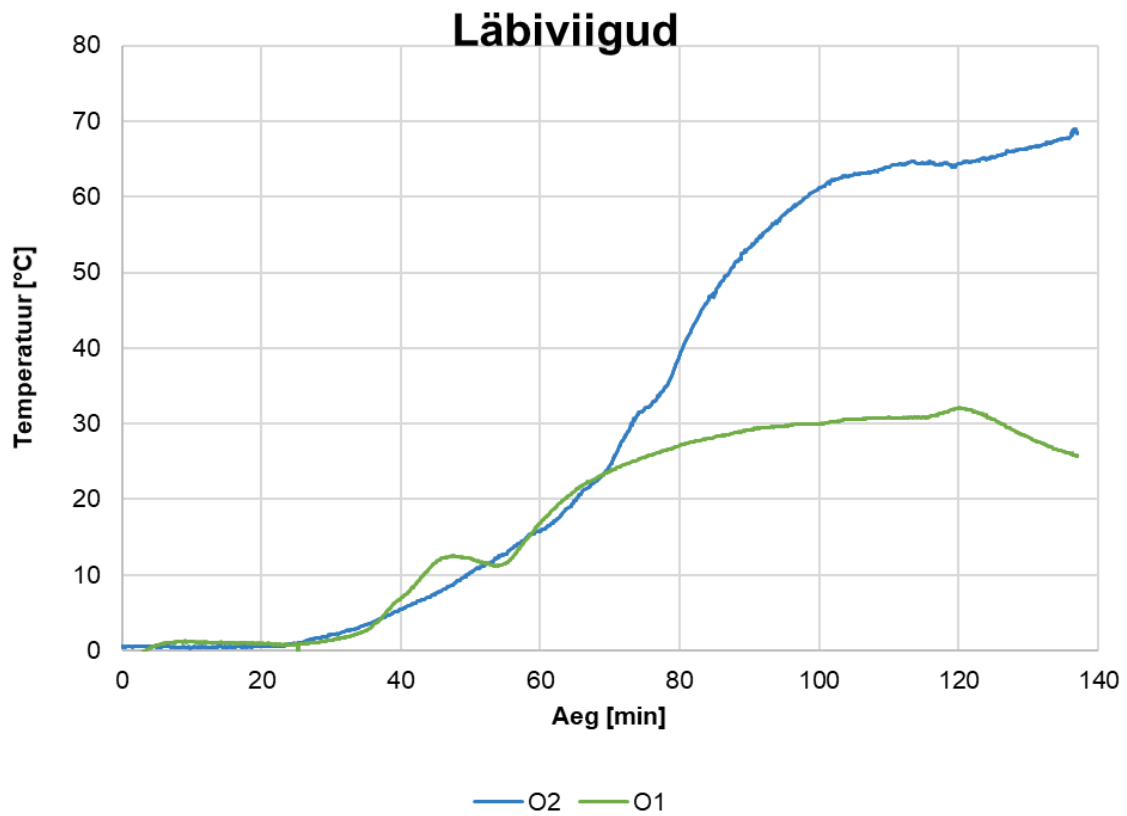
Andurid A1-A4 paiknesid kivivillaga fassaadi akna lähedal ning A11-A14 PIR isolatsiooniga fassaadi akna lähedal eri kõrgustel. Akna ülemise serva lähedal olid temperatuurid mõlemal juhul kõrgemad.

Ukse ja läbiviikude juures mõõdetud temperatuurid olid madalad, tõustes ukse ülemise piida juures alles 130. minutil umbes 90°C-ni ning läbiviikudes katse lõpus maksimaalselt 70°C-ni.

Esimesel korrusel oli EI30 tuletõkkeuks, mis tõkestas üle ootuste hästi tulelevikut parameetrilise tulekahju puhul, pidades vastu üle 2h, seejuures ei toimunud ukse välispinnal olulist temperatuuritõusu.

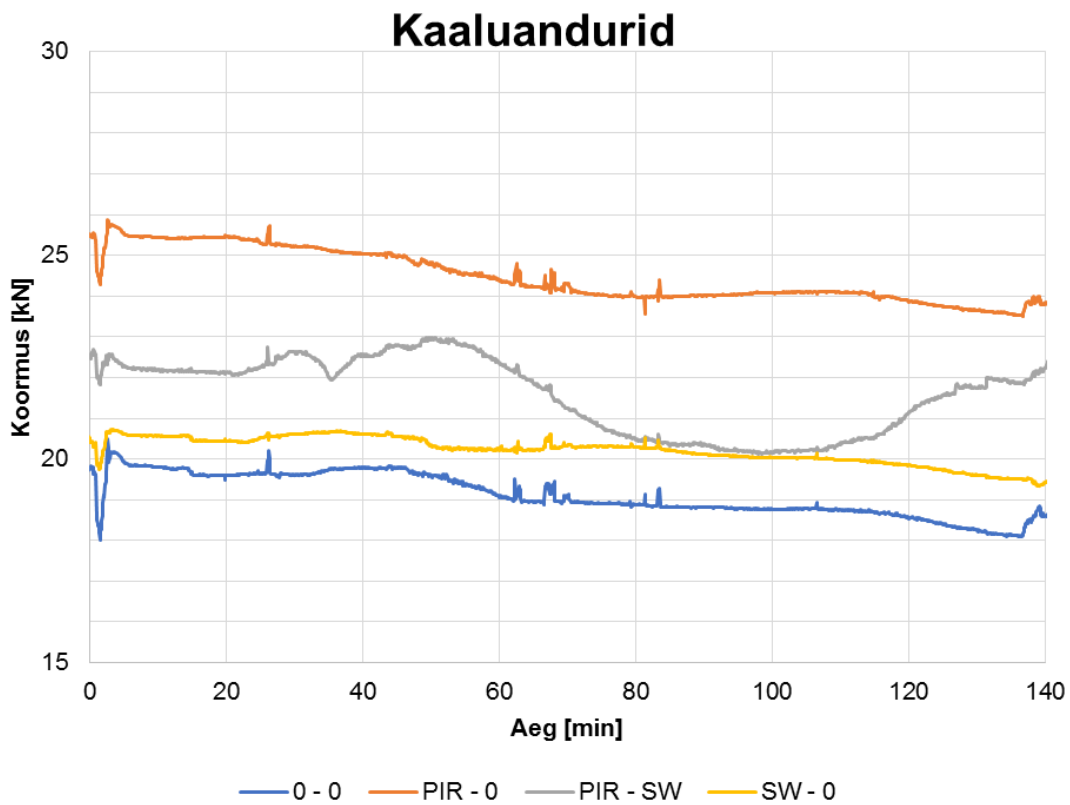


Joonis 49. Ukse temperatuurid

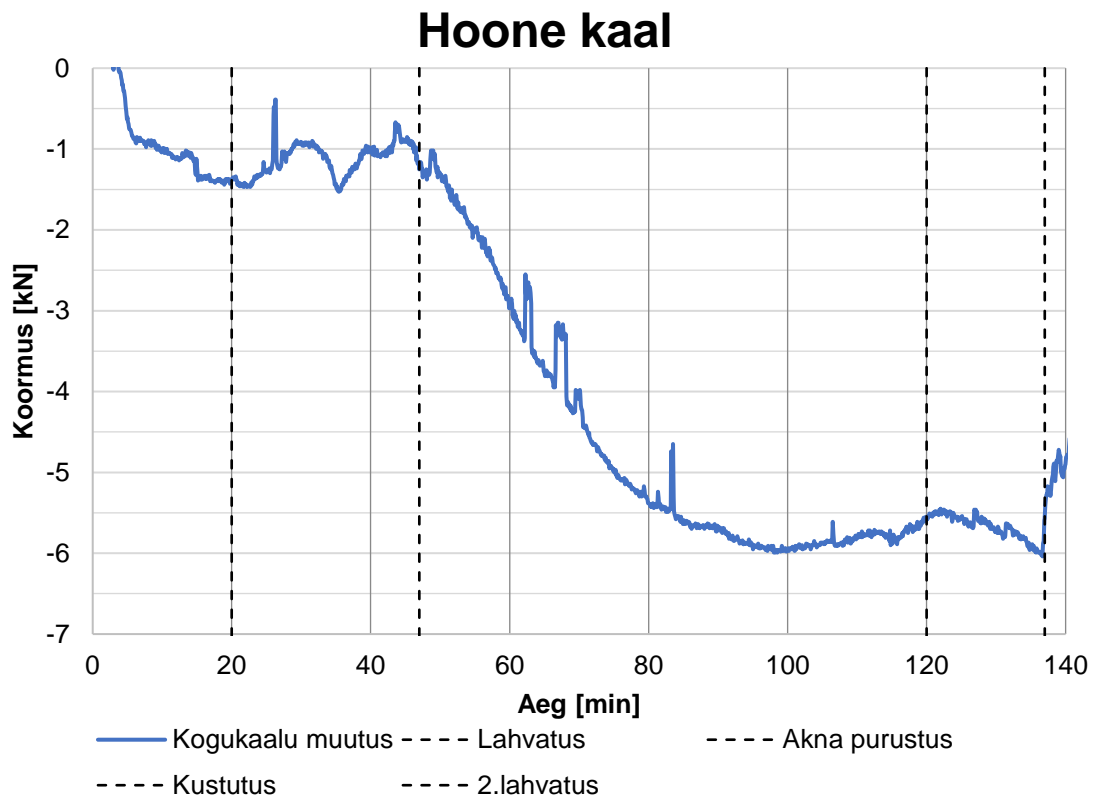


Joonis 50. Temperatuurid läbiviikude juures

Kaalud

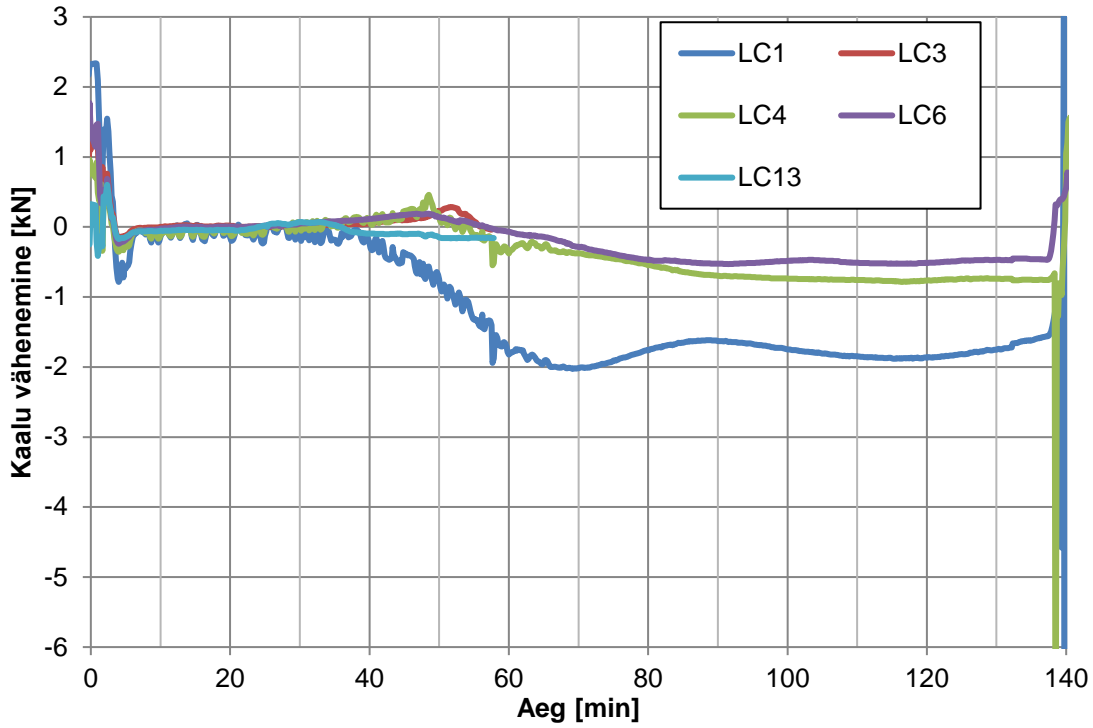


Joonis 51. Koormused hoone nurkades



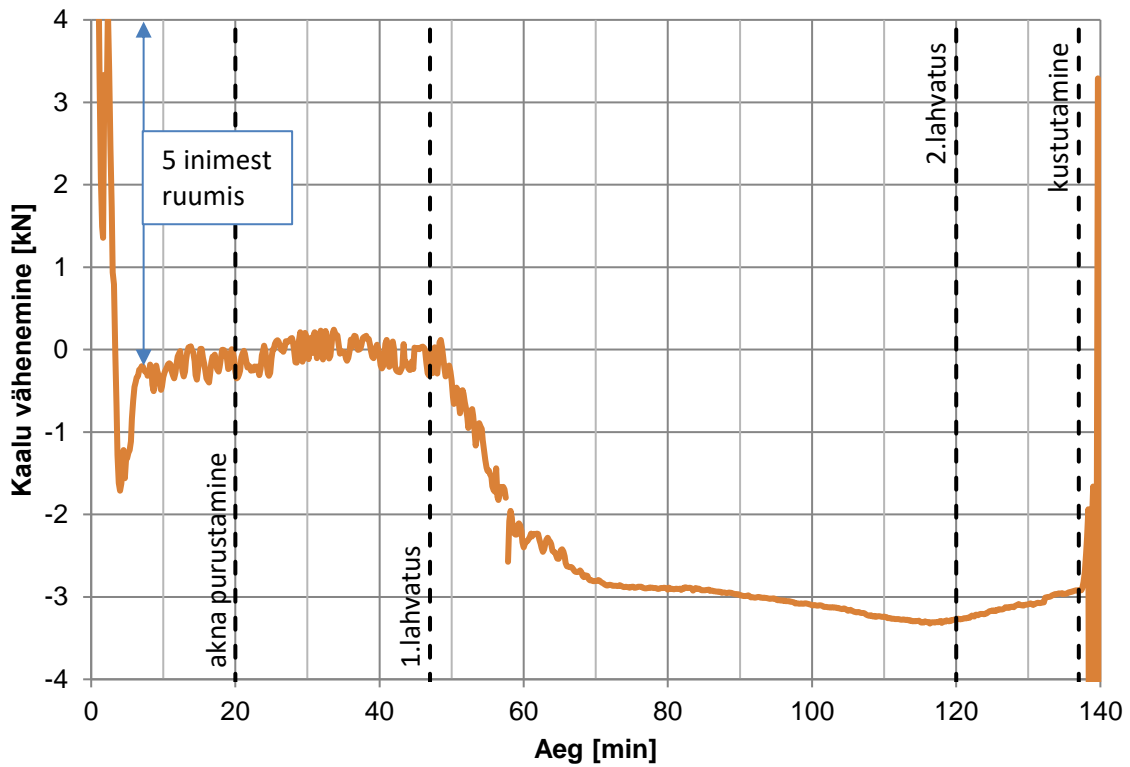
Joonis 52. Hoone kaalu muutus

Põranda kaal



Joonis 53. Esimese korruse põranda koormused

Põranda kaal



Joonis 54. Esimese korruse põranda summaarne kaalu vähenemine.

Tulekahju käigus mõõdeti konstruktsioonide kaalu muutumist. Neli kaaluandurit (koormuspead) oli paigaldatud hoone nurkadesse.

Viis kaaluandurit oli paigaldatud esimese korruse põranda alla. Põrandaplaat oli hoone muudest konstruktsioonidest eraldatud. Põranda all paiknevate anduritega mõõdeti sisustuse põlemisest tulenevat kaalu vähenemist.

Süütamise hetkel oli ruumis 5 inimest. Seetõttu on kaal esimestel minutitel oluliselt suurem.

Suurem kaalu vähenemine hakkas toimuma alates 47. minutist, pärast lahvatuse toimumist. Pärast teist lahvatust kaal suurenes seintelt kukkuma söestunud kivi tõttu. Kustutamise ajal suurenes kaal kustutusvee tõttu.

Neli kaaluandurit, mis asusid hoone nurkades, seinte all, mõõtsid põhiliselt ristkihtpuidu ja fassaadilaudise põlemisest ning materjalidest vee eraldumisest tekkivat kaalukadu.

Neljast kaaluandurist kolm töötasid katse lõpuni. Kaalu muutust mõjutas ka inimeste lühiajaline viibimine teisel korrusel.

Hoone kaal vähenes katse jooksul 650-700 kg. Sellest moodustab ära põlenud puit ca 400 kg ja kipsplaadist aurustunud vesi ca 200 kg. Ülejäänud kaalukadu tuleb fassaadimaterjalidest.

10. Kokkuvõte

Käesolev raport sisaldab kokkuvõtet kahekorruselise ristkihtpuidust maja ruumtulekatsest Sisekaitseakadeemia Väike-Maarja harjutusväljakul 1.novembril 2017. Tegemist oli esimese mõõtmiste abil kontrollitud tegeliku tulekahju katsega Eestis.

Hoone konstruktsioonid ja sõlmed projekteeriti suure tulepüsivusega. Hoone põhiplaan oli mõõtudega 3,5x4,5 meetrit. Ruumi neljast siseseinast olid kaks kaetud kipsplaatidega ning kaks seinat katmata puit. Lagi oli kaetud kipsplaatidega ning põrand tsementplaatidega. Hoone kahes aknaga välisseinas olid vastavalt PIR ja kivivillast soojustusega fassaadid. Fassaadi katematerjaliks oli vaheldumisi tsementplaadist ja puitlaudisest vooder. Puitlaudis ei olnud tulekaitsevahenditega töödeldud. Fassaadi katematerjali tagustes tühikutes kasutati kivivillast tuletõkkeid. Kaks välisseina olid ilma fassaadimaterjalideta.

Põlemiskoormus oli põlengu ruumis 600 MJ/m², mille hulka ei ole arvestatud konstruktsioonides põlemiskoormust.

Tulekahju kestis 137 minutit, seejärel kustutati. **Tuli ei levinud kogu tulekahju jooksul teisele korrusele**, kuna konstruktsioonide omavahelised liited olid tulekindlalt tihendatud. Vahelaeplaadi ja seinat liitumisel kasutati kahesuguseid liiteid – plaat seinat peal ja plaat seinat kõrval.

Puitkonstruktsioonide tules käitumise teoreetilise prognoosimudeliga erines tulekahju tegelikest tagajärgedest. Prognoosimudel vajab katseandmete põhjal täiendamist.

Kasutatud ehituslahendused toimisid efektiivselt tule leviku takistamisel. Ristkihtpuit oli valmistatud 40 mm paksuse tulepoolse lamelliga, mis võimaldas tulekahju sumbumise umbes 100 minutiga.

Ruumi kahel seinal oli puit katmata ning teistel seintel ja lagedel kipsplaatidega kaetud. See hoidis ära tulekahju suurema arengu. Seintele paigaldatud kaks kihti kipsplaati oli piisav ja vajalik, et tagada puitelemendi kaitse. Lakke paigaldati kolm kihti, mõõtmised näitasid, et piisava tulekaitse oleks taganud ka kaks kihti sarnast kipsplaati.

Fassaadidel oli tule levik tõhusalt takistatud tänu selle liigendatusele mittepõlevast ja põlevast materjalist katetega. Tuletõkked fassaadi õhutuspiiludes hoidsid ära tule kiire leviku fassaadil. Tule levik fassaadil külgedele oli väike.

Kivivillaga isoleeritud fassaadil oli tule levik väljast poolt kandekonstruktsioonini takistatud. Hoone PIR-soojustusega fassaadil levis tuli kandekonstruktsiooni ka väljastpoolt.

Hoone teise korruse tulekindlad aknad hoidsid ära tule leviku fassaadilt teise korruse ruumi. Hoone esimese korruse aknad purustati kaste käigus vastavalt stsenaariumile.

Hoone puituks esimesel korrusel takistas tule levikut selle kaudu kogu katse jooksul. Ukse tulepoolne tahvel hävis, kuid väline tahvel säilis.

Kokkuvõttes võib teostatud katse lugeda edukaks. Katse käigus demonstreeriti, et **tulepüsiva puithoone põleng kulgeb aeglaselt ning selle kulgu on võimalik ennustada.**

Hoonete tulepüsivuse vastutustundlik ja teadlik projekteerimine on aluseks inimeste turvalisusele ning võimalike kahjude riski vähendamisele.

11. Lisamaterjal

Tulekatse video (5h):

<https://www.youtube.com/watch?v=ErJgPreyLEk&feature=youtu.be>

Lühike tutvustav video (15 min):

Eesti keeles: <https://vimeo.com/249079126/de175ab079>

Inglise keeles: <https://vimeo.com/249077905/ab6bd31630>

12. Allikad

Siseministri määrus nr 17. Ehitisele esitatavad tuleohutusnõuded ja nõuded tuletõrje veevarustusele.

EN 13501-1:2007+A1:2009 Ehitustoodete ja –elementide tuleohutusala klassifikatsioon. Osa 1: Klassifikatsioon tuletundlikkuse katsete alusel

ISO 834 Fire-resistance tests – Elements of building construction

EN 1995-1-2:2005 Eurokoodeks 5: Puitkonstruktsioonide projekteerimine. Osa 1-2: Üldreeglid. Tulepüsivusarvutus

Brandon, D. (2016) Practical method to determine the contribution of structural timber to the heat release rate and fire temperatures of post-flashover compartment fires. Technical Research Institute of Sweden – SP, SP Rapport 2016:68, Borås, Rootsi

Just, A., Brandon, D. (2017) Fire Stops in Buildings. Technical Research Institute of Sweden – SP, SP Rapport 2017:10, Stockholm, Rootsi

Medina Hevia, A. R. (2014) Fire resistance of partially protected cross-laminated timber rooms. Master thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University. Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, Ottawa, Ontario, Kanada

McGregor, C. J. (2013) Contribution of cross-laminated timber panels to room fires. Master thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University. Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering, Ottawa, Ontario, Kanada

EVS 812-7:2008 Ehitiste tuleohutus. Osa 7: Ehitistele esitatava põhinõude, tuleohutusnõude tagamine projekteerimise ja ehitamise käigus