



Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy

Timo Jokinen

Johtava asiantuntija

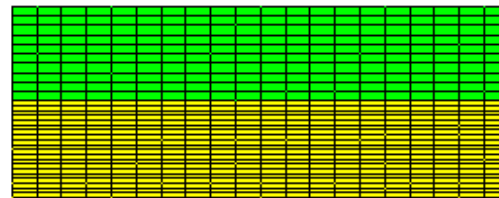
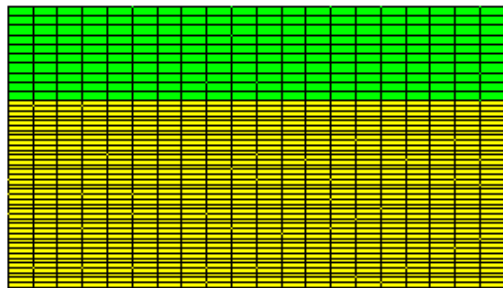
timo.jokinen@kauriala.fi



STALK-hanke: Palosimuloinnit ja niiden alustavat tulokset

Savi+hampun päistäre -levyt: kalibrointi DBI:n testeihin

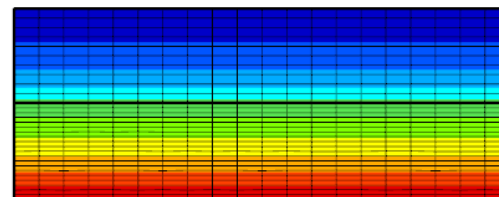
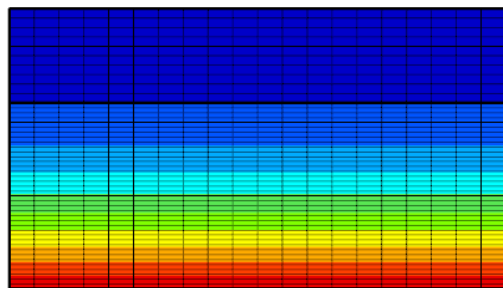
- Savi+hampun päistäre -levyjen materiaalimalli kalibroidaan SAFIR lämmönsiirtymisanalyysillä DBI:n testeihin.



WOOD
USER

CONTOUR PLOT
TEMPERATURE PLOT
MESH PLOT

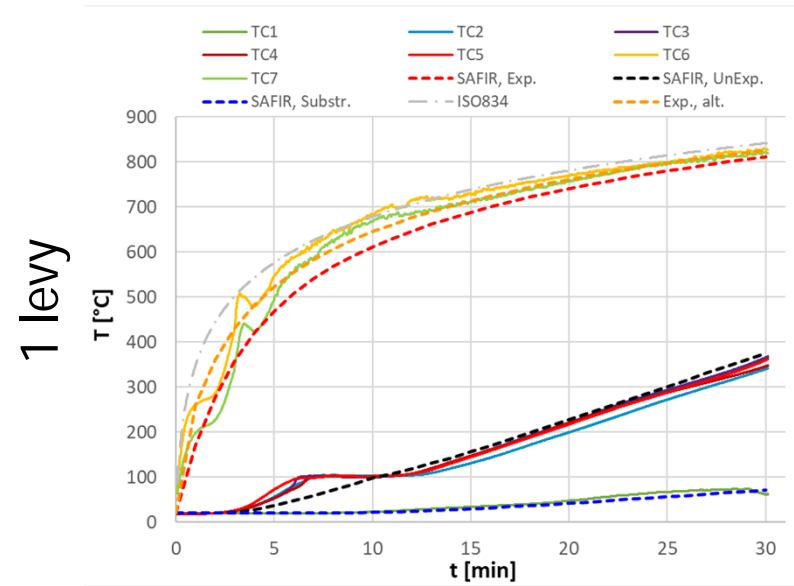
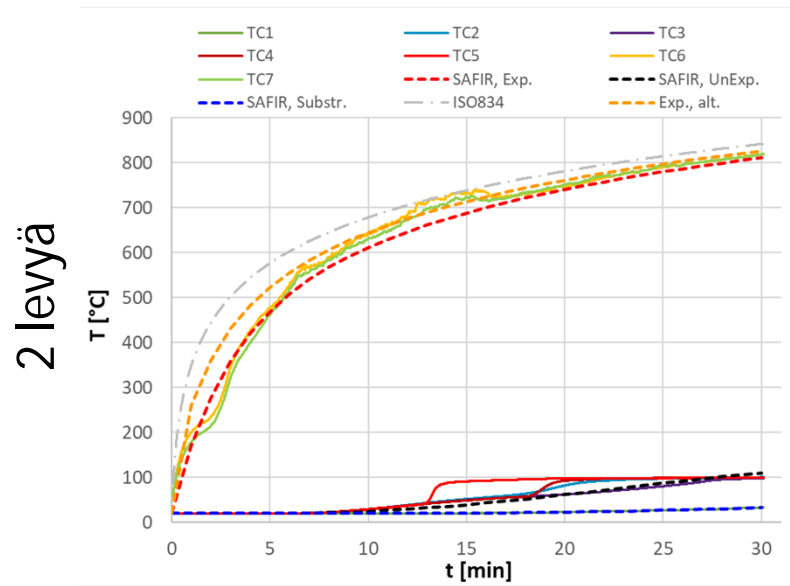
TIME : 1800 sec



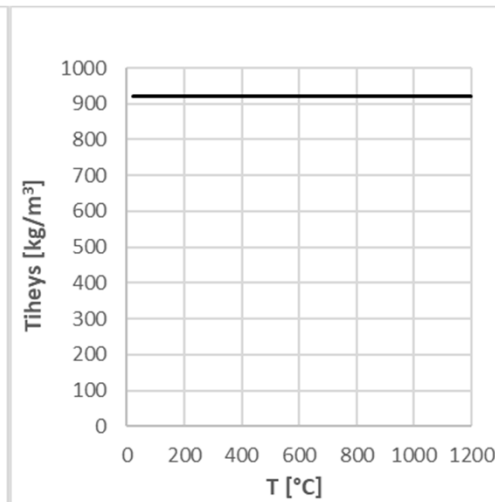
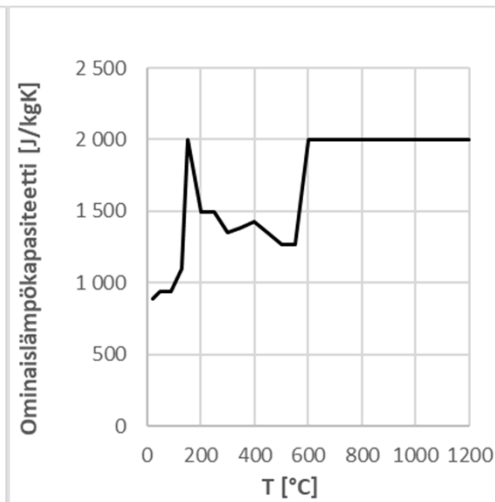
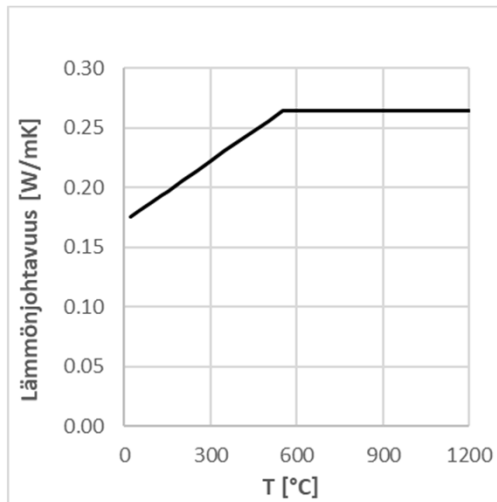
TEMPERATURE :

733.9°C to 811.8°C
656°C to 733.9°C
578.1°C to 656°C
500.3°C to 578.1°C
422.4°C to 500.3°C
344.5°C to 422.4°C
266.6°C to 344.5°C
188.7°C to 266.6°C
110.8°C to 188.7°C
32.93°C to 110.8°C

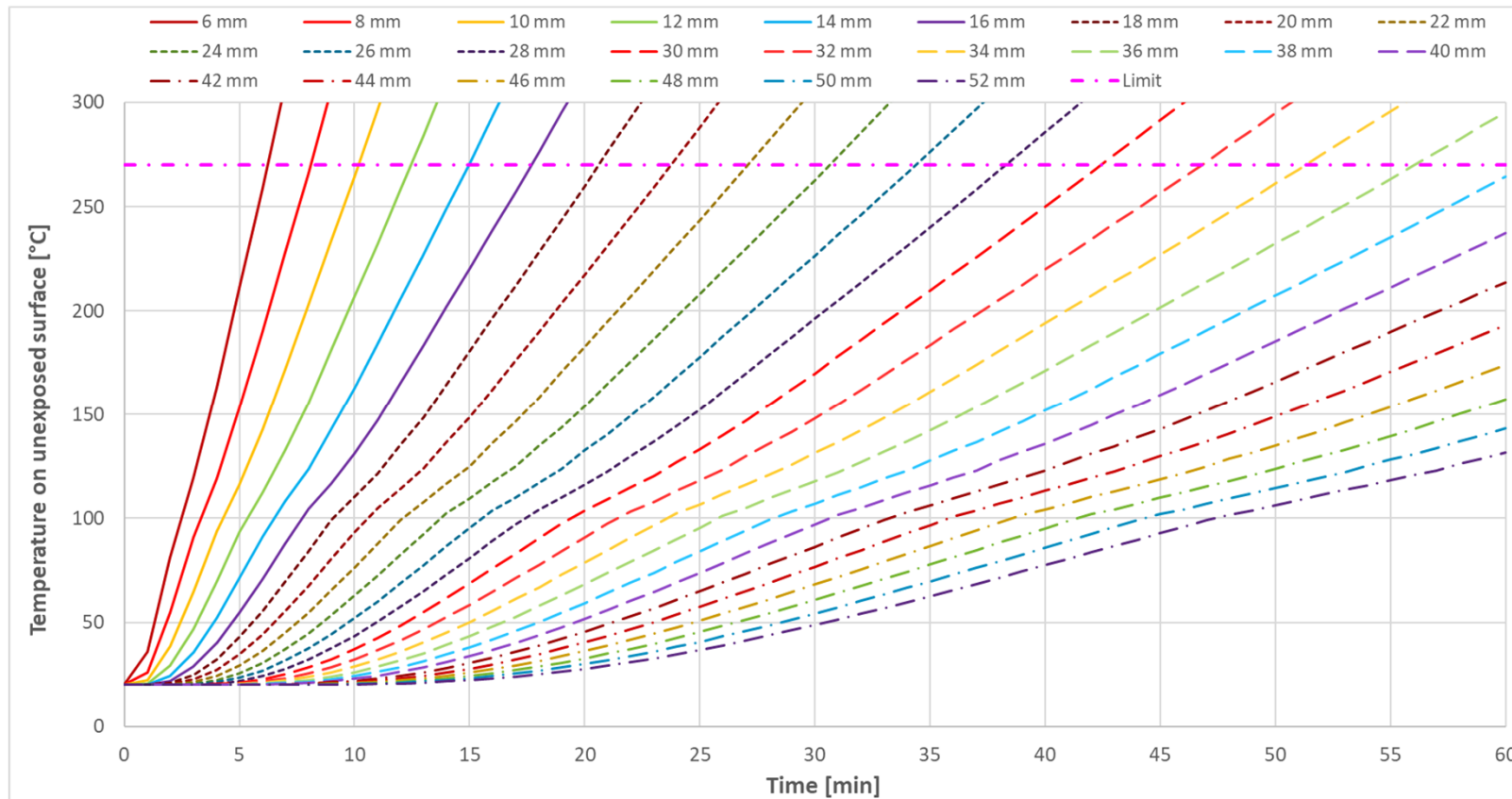
Savi+hampun päistäre -levyt: kalibrointi DBI:n testeihin



Kalibroitu materiaalimalli:



Indikatiiviset K₂-luokitukset eri paksuuksilla

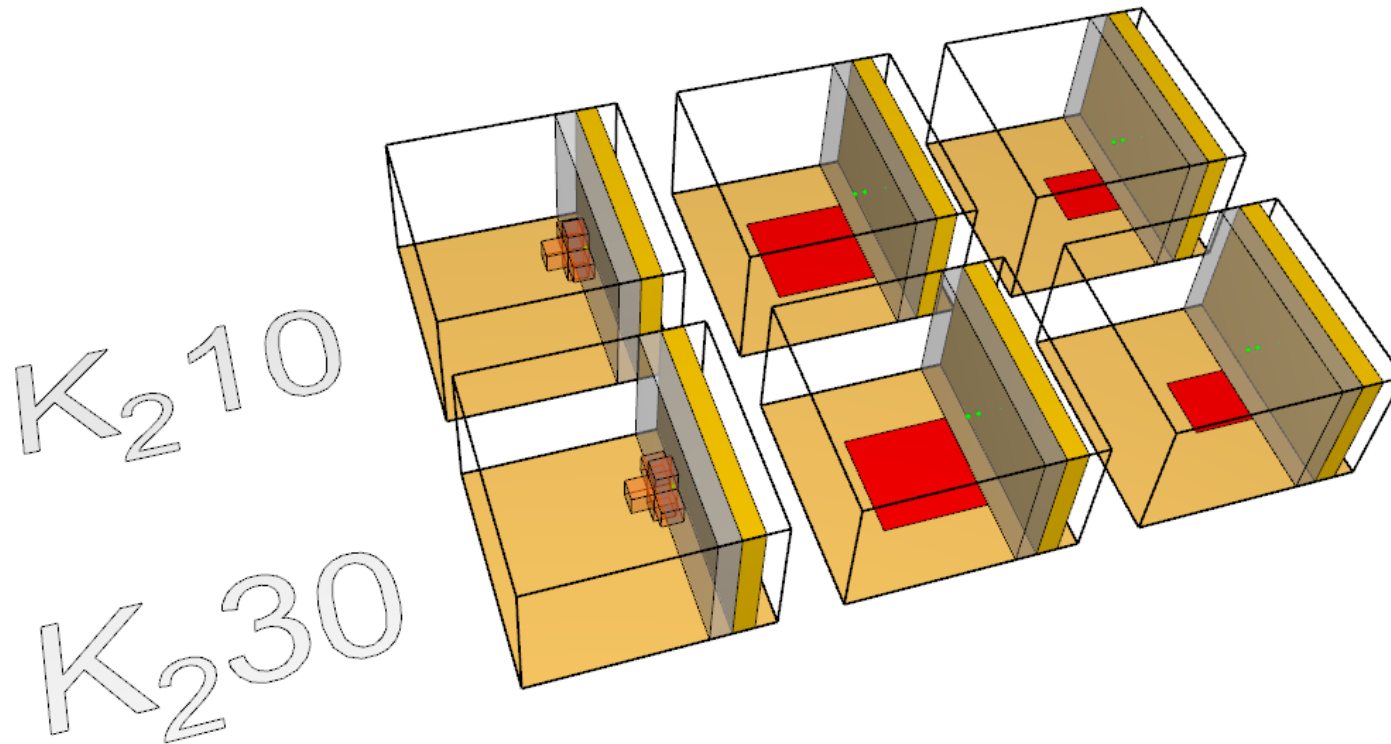


Savi+hampun päistäre -levykerrosten kokonaispaksuus:

- K₂10: n. 10 mm
- K₂30: n. 24 mm
- K₂60: n. 38 mm

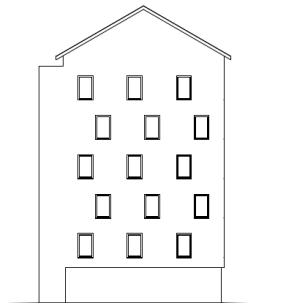
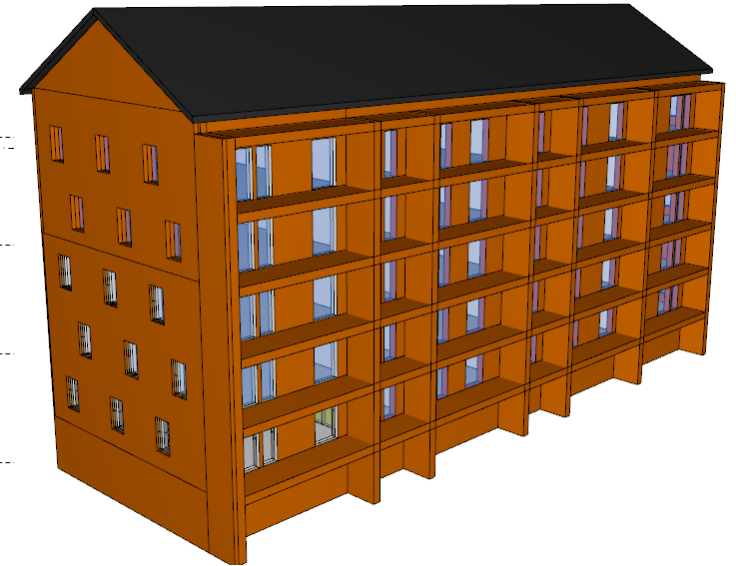
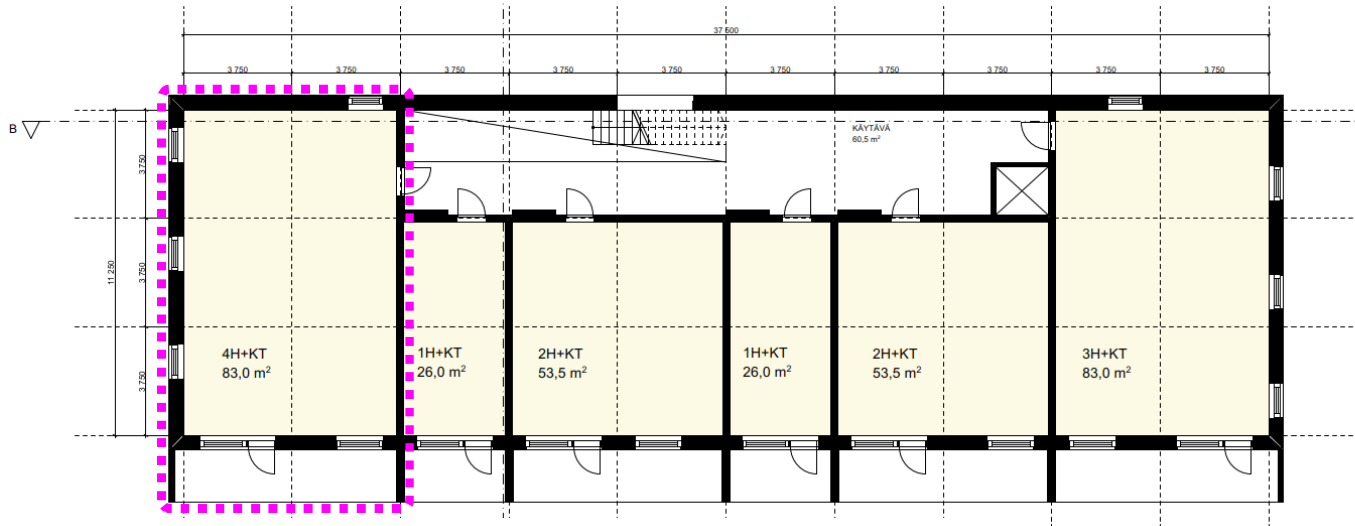
Savi+hampun päistäre -levyt: mallinnus palosimuloinneissa

- Savi+hampun päistäre -levyt: mallinnetaan palosimulointiohjelmassa (Fire Dynamics Simulator, FDS) rakenteina jotka katoavat mallista kun takapinnan luokituslämpötila ylitetään, jonka jälkeen takana oleva olkieriste voi alkaa osallistumaan paloon.
- Kuva testimallista:



Palosimuloinneissa käytettävä case rakennus

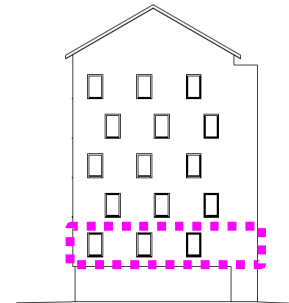
- Case rakennuksen sijainniksi on oletettu: Pirkanmaa riskiluokka II
- Palosimuloinnit kohdistetaan palon kannalta pahimpaan asuinhuoneistoon



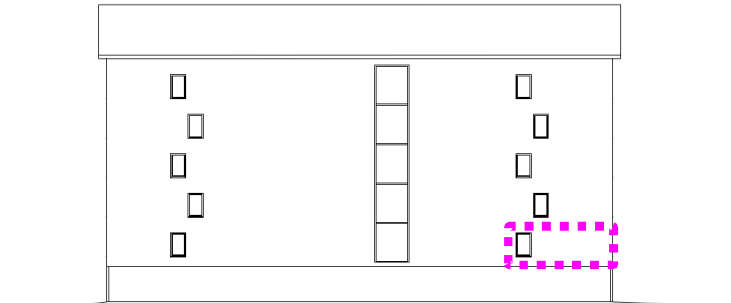
East facade



South facade
- maximum amount of window openings



West facade



North facade
- minimal amount of window openings

Palosimuloinneissa tarkasteltavat rakennetyypit

- Ulkoseinän rakennetyyppi:
 - Savi+hampun päistäre –levytys (K₂30, 24 mm)
 - Olkielementti, puurunkoinen, 400 mm
 - Ilmansulkukalvo
 - Savi+hampun päistäre –levytys (K₂10, 10 mm)
 - Pystykoolaus + vaakakoolaus, palosuojakäsitelty luokkaan B-s2, d0
 - Puuverhous, palosuojakäsitelty luokkaan B-s2, d0
- Yläpohjan rakennetyyppi:
 - Savi-hampun päistäre –levytys (K₂60, 38 mm)
 - Koolaus ja sähköinstallaatiot
 - Ilmansulkupaperi
 - Puurunko + kutterilastu-sahanpurueriste (ainakin pintakerros savetettuna)
- Välipohjat eivät olleet mukana tutkimuksen laajuudessa
- Asuntojen väliset väliseinät ovat CLT:tä

Palomääräysten vaatimukset toiminnallisille tarkasteluille

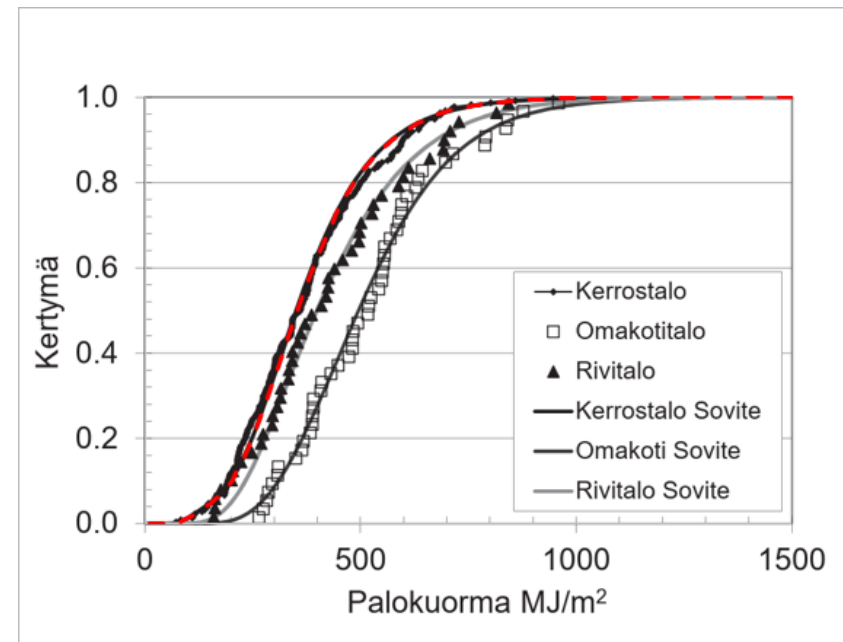
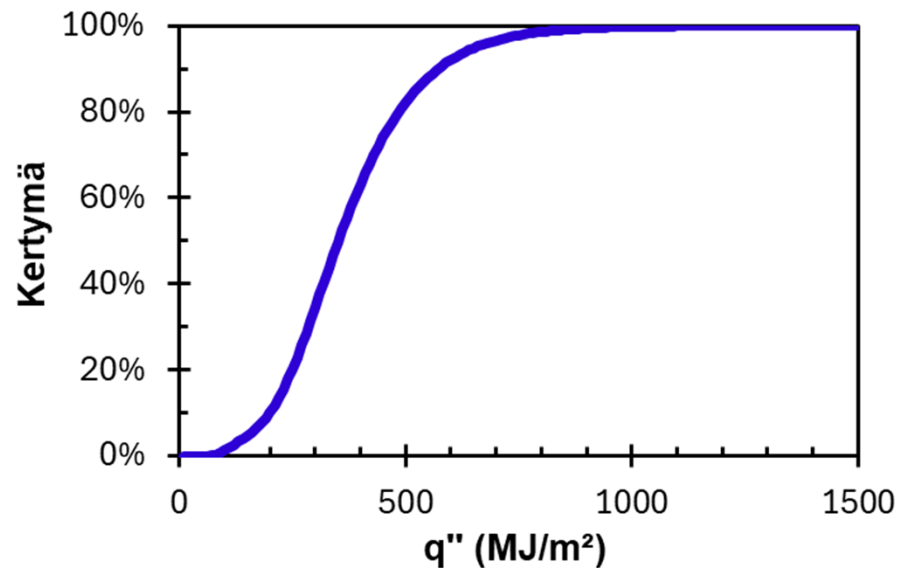
- YMa 848/2017, 13§, Taulukko 4:

Rakennus	Rajoitukset	Olellaisten kantavien rakenteiden kestävyys palossa	Mitoituspalokuorman tiheys MJ/m ²
Yli 2-kerroksinen	Korkeus enintään 28 m	Palo- ja jäähtymisvaihe	Q _{fi,k} , vähintään 600 MJ/m ^{2 2)}
<p>Q_{fi,k} on tilastollisesti tai laskennallisesti määritetty kokonaispalokuorman tiheyden ominaisarvo (80 % fraktiili).</p> <p>Tarkastelu tehdään täysin kehittyneelle palolle. Jos voidaan osoittaa, että lieskahtamista ei tapahdu, mitoitus voidaan tehdä paikalliselle palolle. Lieskahtamisen katsotaan tapahtuneen, kun kuuman savukerroksen keskilämpötila saavuttaa 500 celsiusastetta tai kun säteily savukerroksesta lattiaan on yli 20 kilowattia neliömetrille.</p> <p>Kellarikerrokset mitoitetaan palo- ja jäähtymisvaiheen rasituksille.</p> <p>1) Ylin kellarikerros, vähintään 600 MJ/m².</p> <p>2) Ylimmän kellarikerroksen alapuolella sijaitsevat kellarikerrokset, 2,0*Q_{fi,k}, vähintään 900 MJ/m².</p>			

- YMa 848/2017, 13§: *“Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa kantavien rakenteiden mitoituksessa voi ottaa huomioon lämpötilan hitaamman nousun ja kantavien rakennusosien jäähtymisen, kun rakennus on varustettu tarkoitukseen sopivalla automaattisella sammutuslaitteistolla.”*
- Sprinklerijärjestelmän luotettavuus/vikaantuminen tulee ottaa huomioon mahdollisten seurausten mukaisesti (perustelumistio 39§ ja 3§).

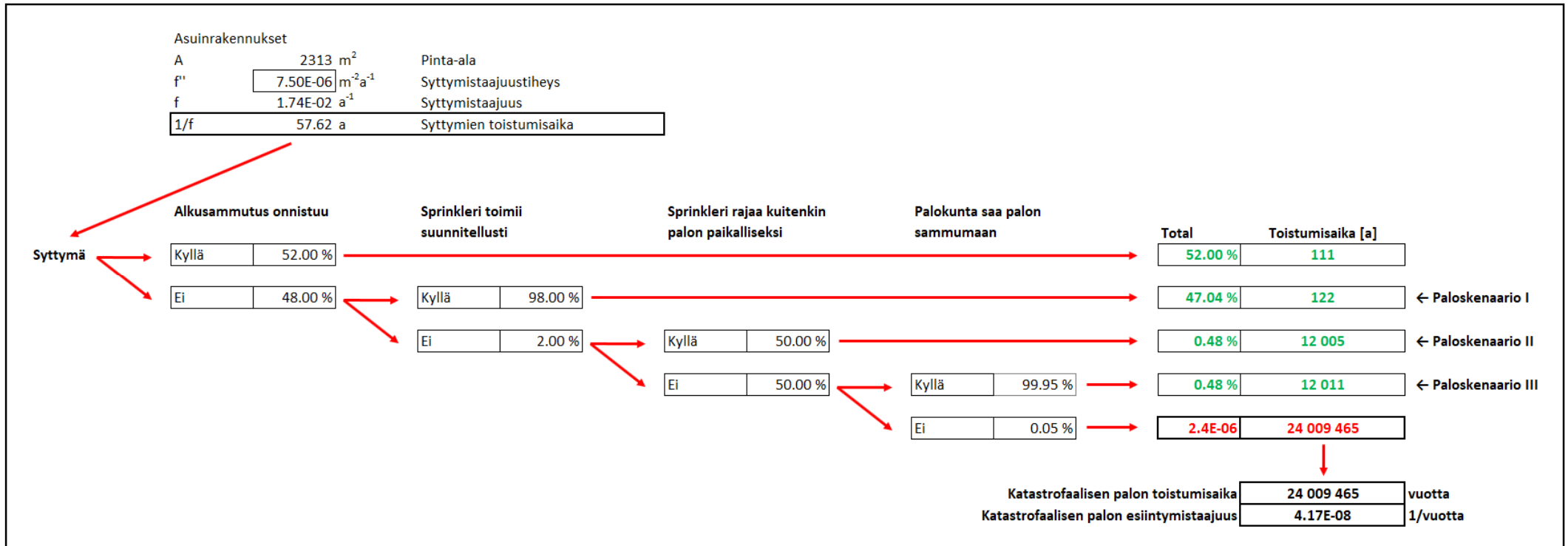
Palokuorma ja paloteho

- Palokuormajakauma kerrostaloasunnossa sis. irtaimisto, kiintokalusteet, asunnon sisäiset väliseinät yms., mutta **ei rakenteellista palokuormaa** (rakenteellinen palokuorma huomioidaan malleissa erikseen):



- 80 % -fraktiili: **485 MJ/m²** (eli tämä palokuorma jää vielä alle 600 MJ/m², mutta toteutunut palossa vapautunut energia tarkastellaan myöhemmin)
- Paloteho 250 kW/m², kasvunopeus keskinkertainen (SFS-EN 1991-1-2)

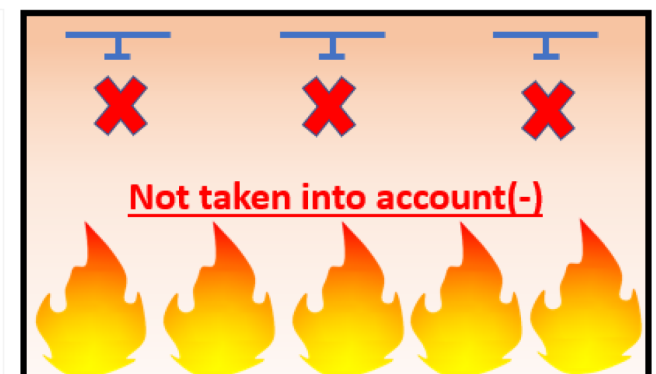
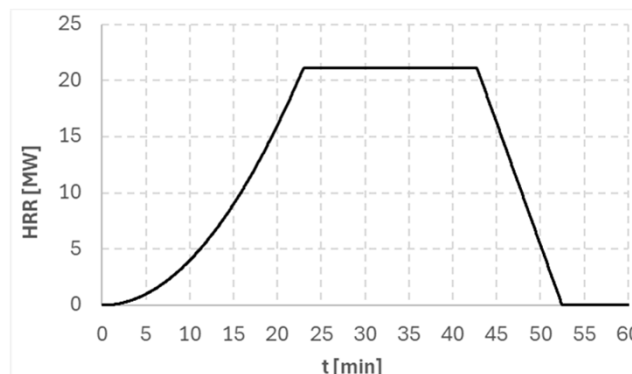
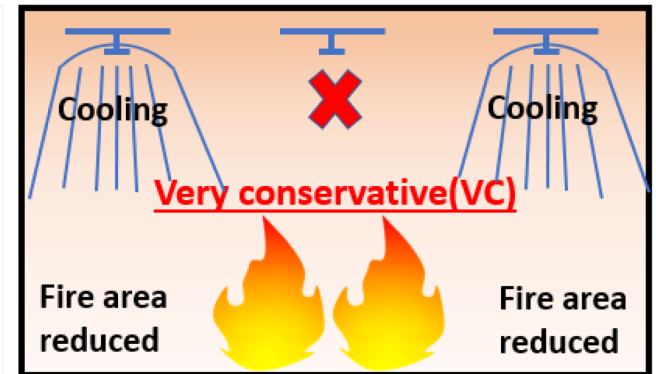
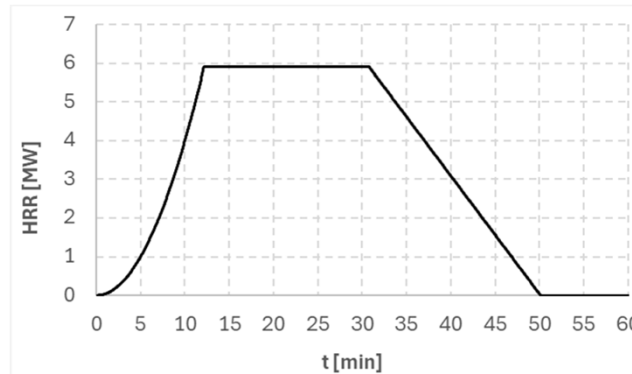
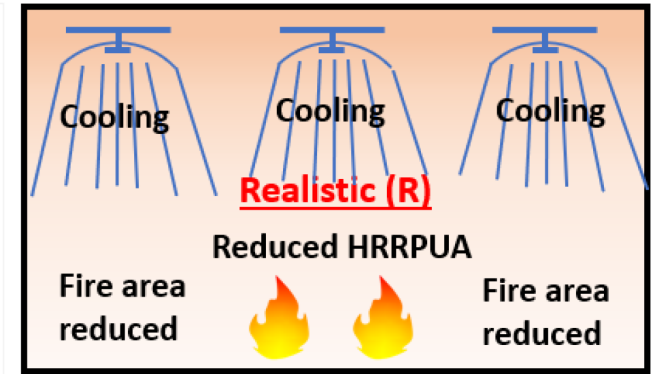
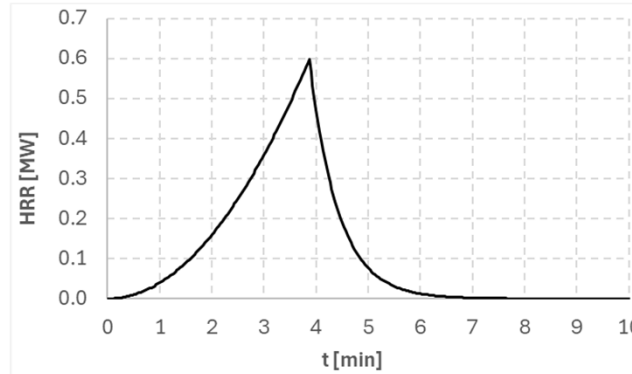
Riskianalyysi ja paloskenaariot



- Salminen, M., Malaska, M., Jokinen, T., Ranua, R. 2023. Framework to Incorporate Sprinkler System in Structural Fire Engineering. Fire Technology. <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-023-01503-7>

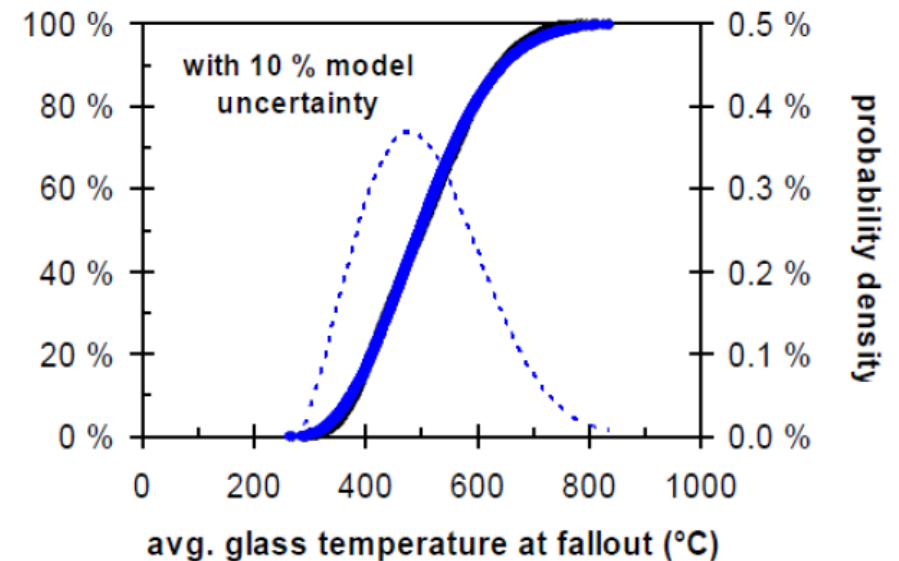
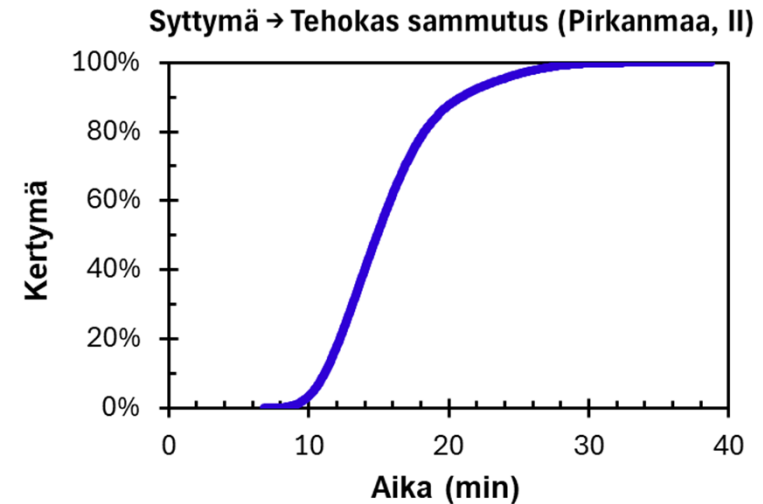
Mitoituspalot

- **Palo I:** Sprinkler toimii suunnitellusti
- **Palo II:** Sprinkler toimii vain osittain
- **Palo III:** Sprinkler ei toimi lainkaan
- (näiden lisäksi tulee vielä syttyvien rakenteiden palotehojen osuudet)



Hyväksymiskriteerit

- Rakennuksen kantavien rakenteiden on kestettävä sortumatta vaaditut ajat:
 - Palo I: koko palo, **600 s (10 min)**
 - Palo II: kaiken palokuorman palaminen loppuun (pl. rakenteellinen palokuorma), **3010 s (50,2 min)**
 - Palo III: sen ajan, että palokunta saa palon hallintaan 99,95 % todennäköisyydellä, **1960 s (32,6 min)**
- Palo ei myöskään saa levitä toiseen palo-osastoon em. aikojen kuluessa:
 - Palon leviäminen ikkunoiden kautta kriittisin leviämistapa näissä tarkasteluissa
 - Normaalien ikkunalasien voidaan olettaa pysyvän tiiviinä alle 300 °C pintalämpötilassa (konservatiivinen oletus, säröjä saattaa kuitenkin syntyä jo alemmissa lämpötiloissa)

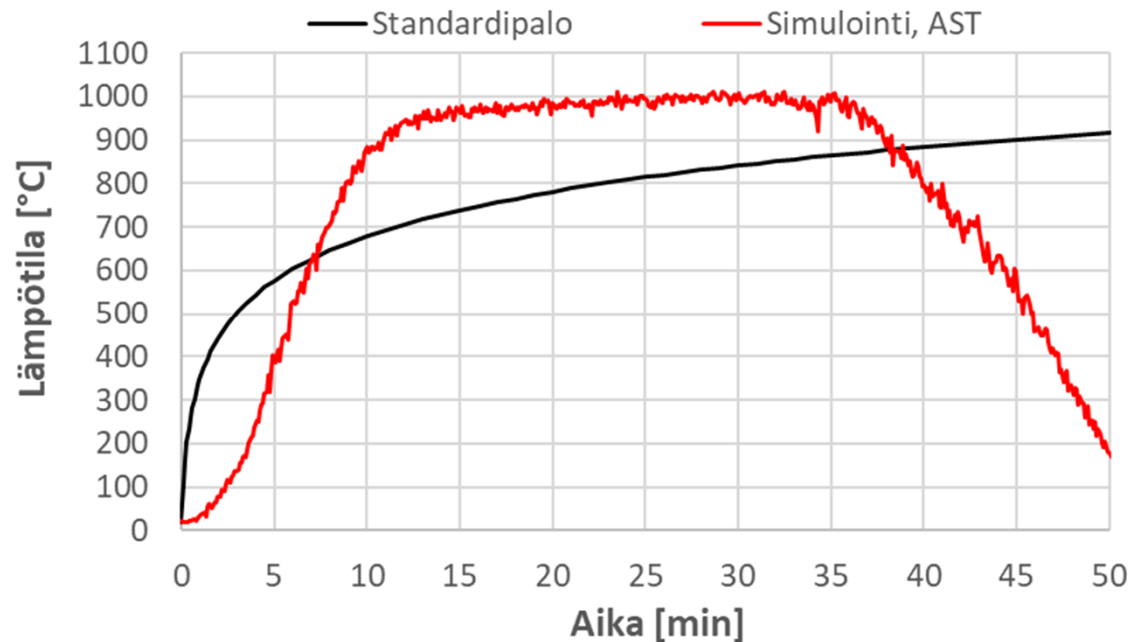


Ekvivalentti standardipaloaltistus

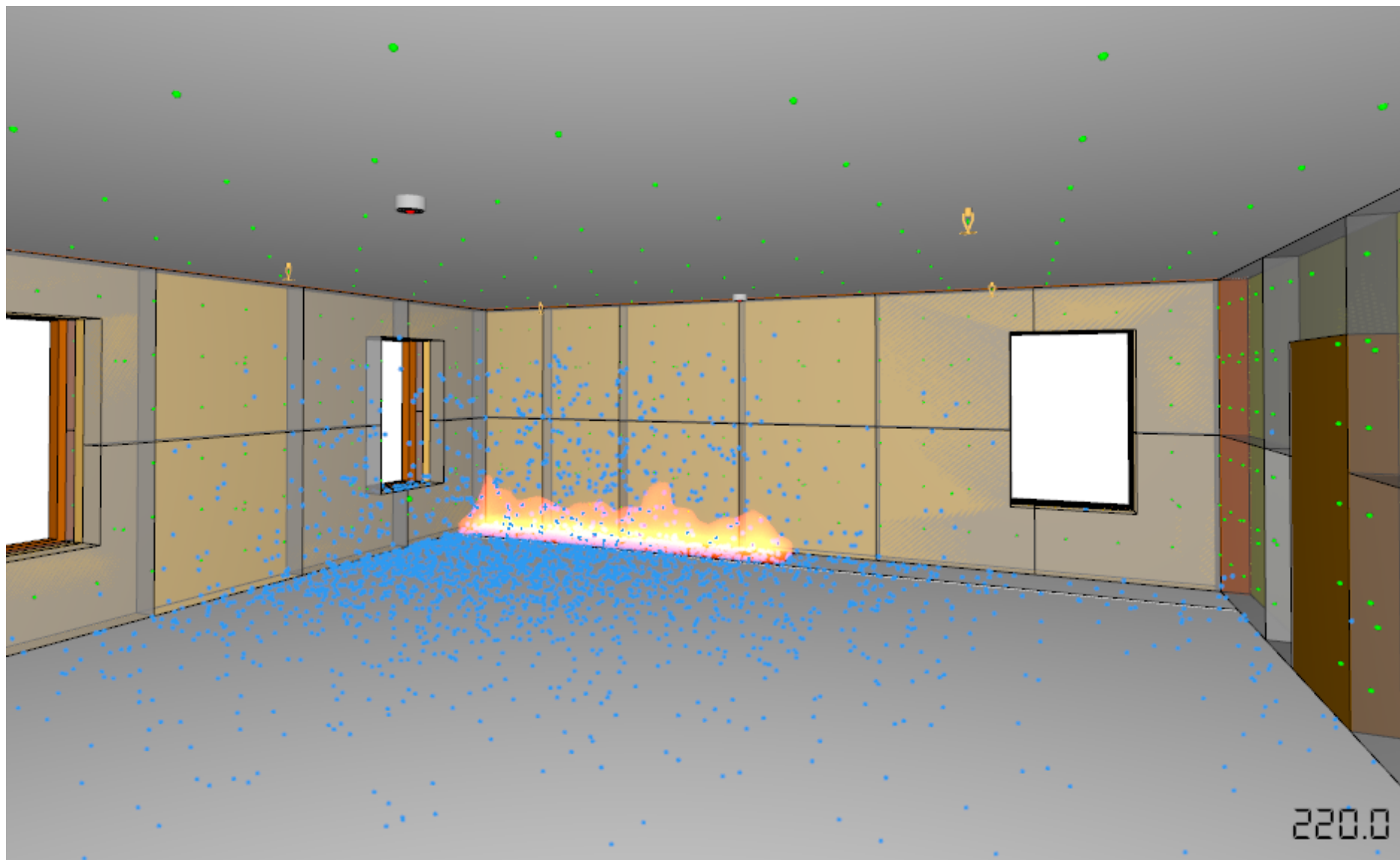
- Simulointimalleista mitatut lämpötilat (adiabaattiset pintalämpötilat, AST) voidaan muuttaa ekvivalentiksi standardipaloaltistukseksi seuraavilla kaavoilla:

$$E = \int_0^{t_{sim}} h_{net.sim} dt = \int_0^{t_{ISO}} h_{net.ISO} dt$$

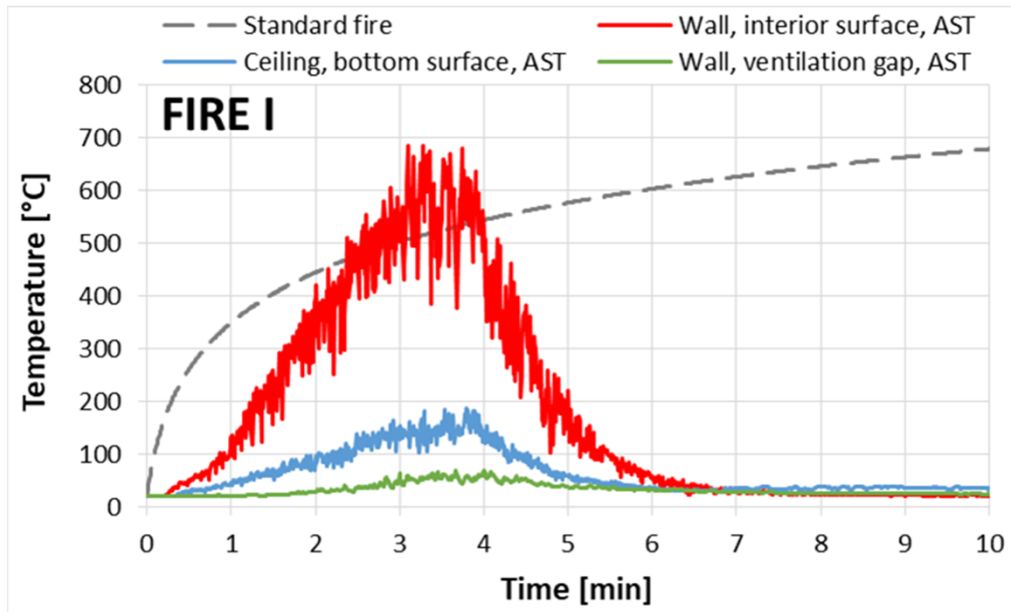
$$h_{net} = h_{net,c} + h_{net,r} = \alpha_c(\Theta_g - \Theta_m) + \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\Theta_r + 273^\circ C)^4 - (\Theta_m + 273^\circ C)^4]$$



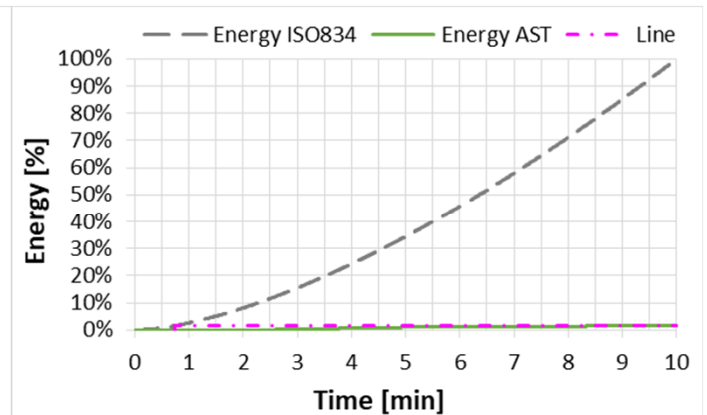
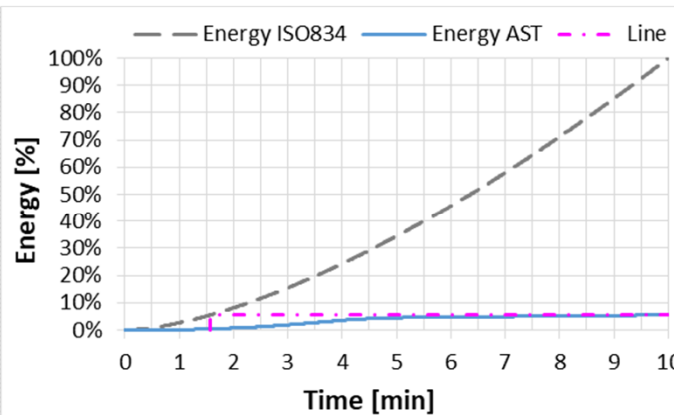
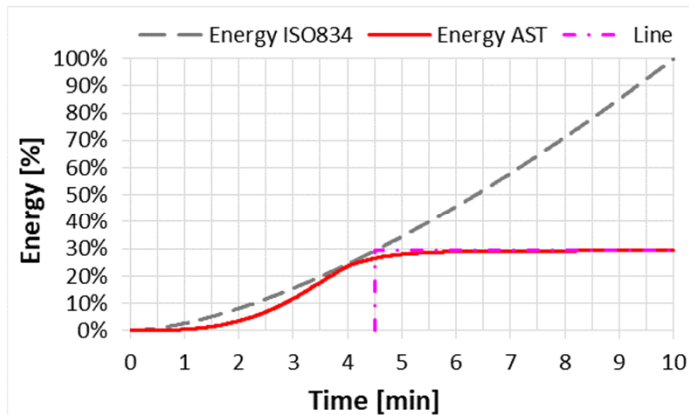
Palosimuloinnit: Palo I



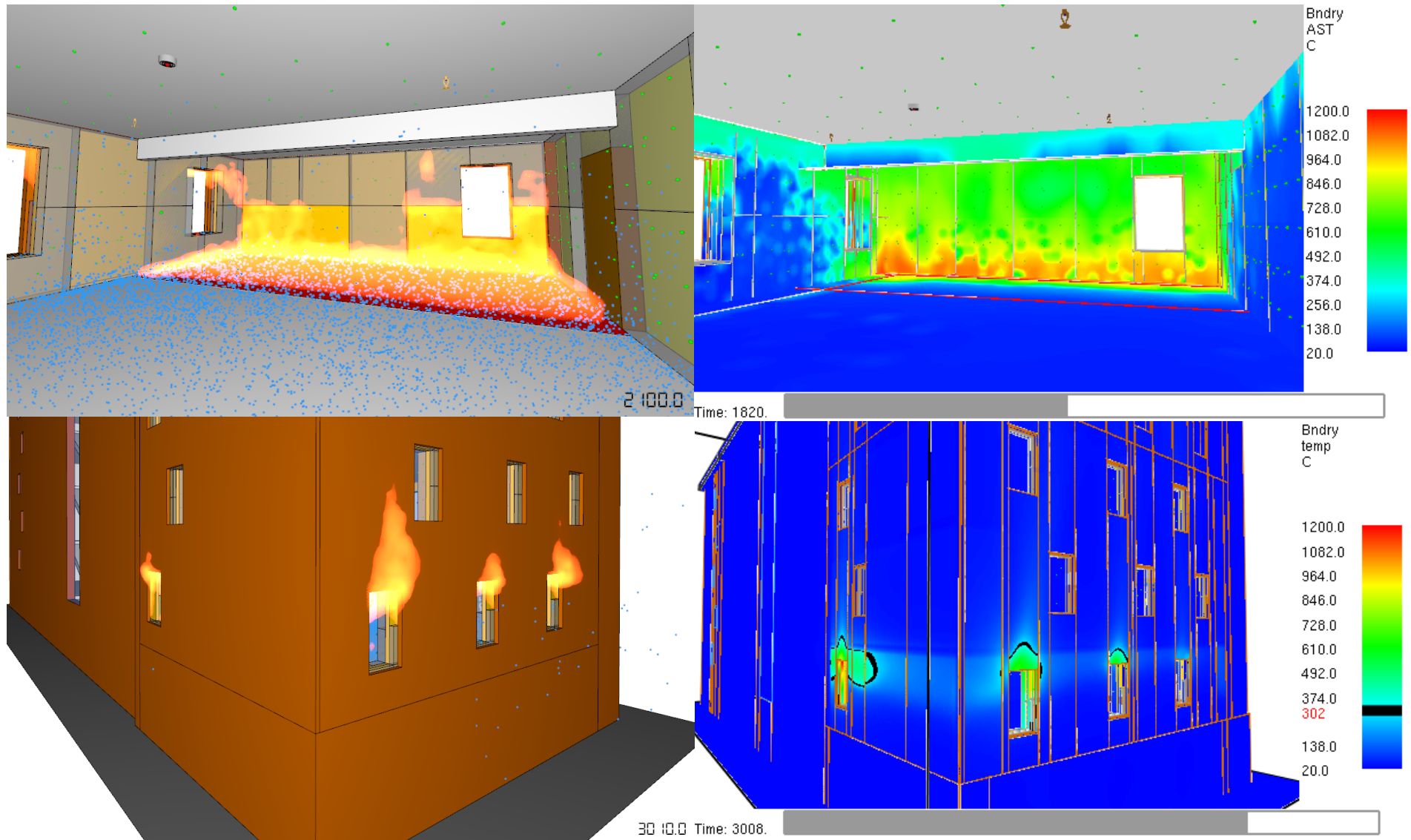
Kuumimpien pisteiden lämpötilat ja ekvivalentti standardipalo: Palo I



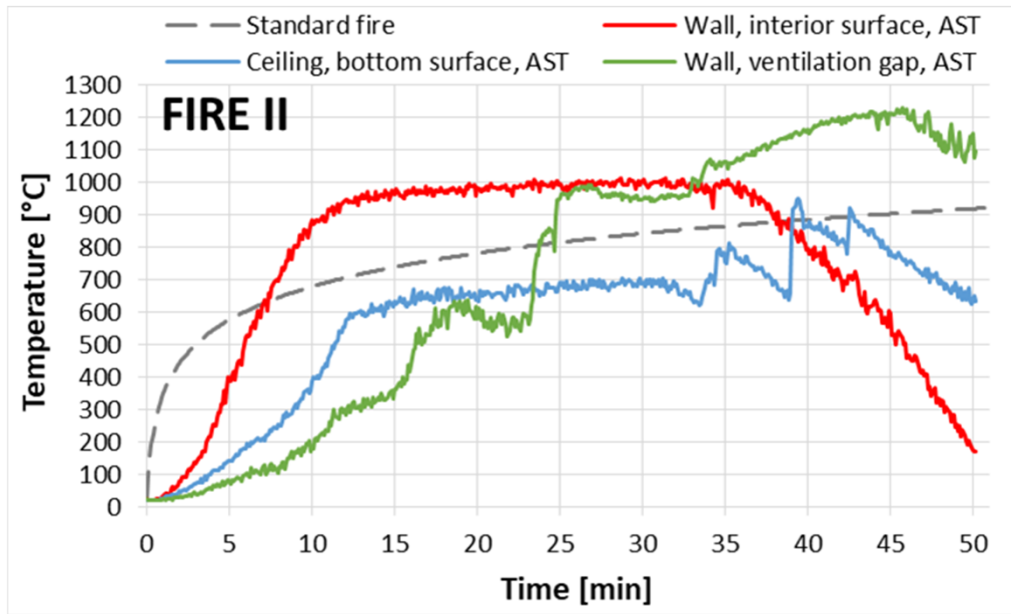
- Ekvivalentti standardipalorasitus eri pintojen kuumimmissa pisteissä:
 - Seinän sisäpinta: **4,5 min**
 - Ylä-/välipohjan alapinta: **1,6 min**
 - Seinän tuuletusväli: **0,7 min**



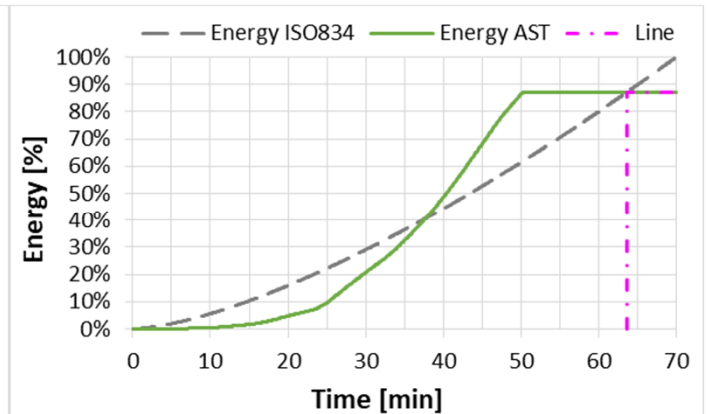
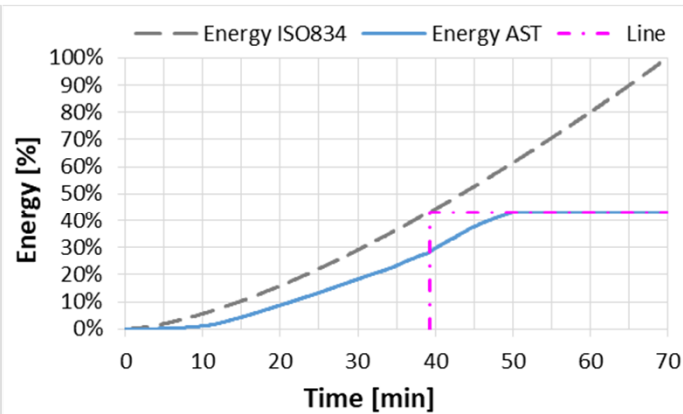
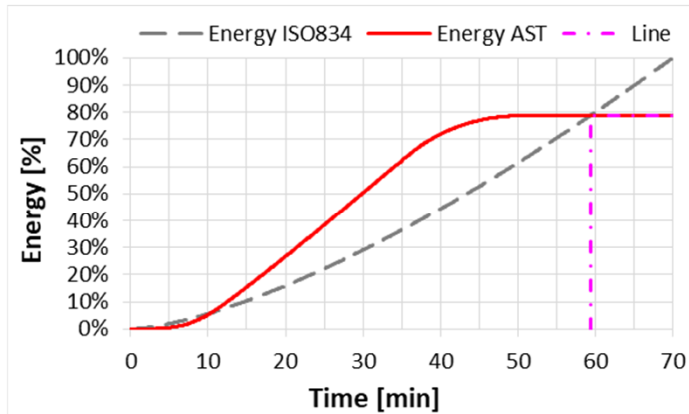
Palosimuloinnit: Palo II



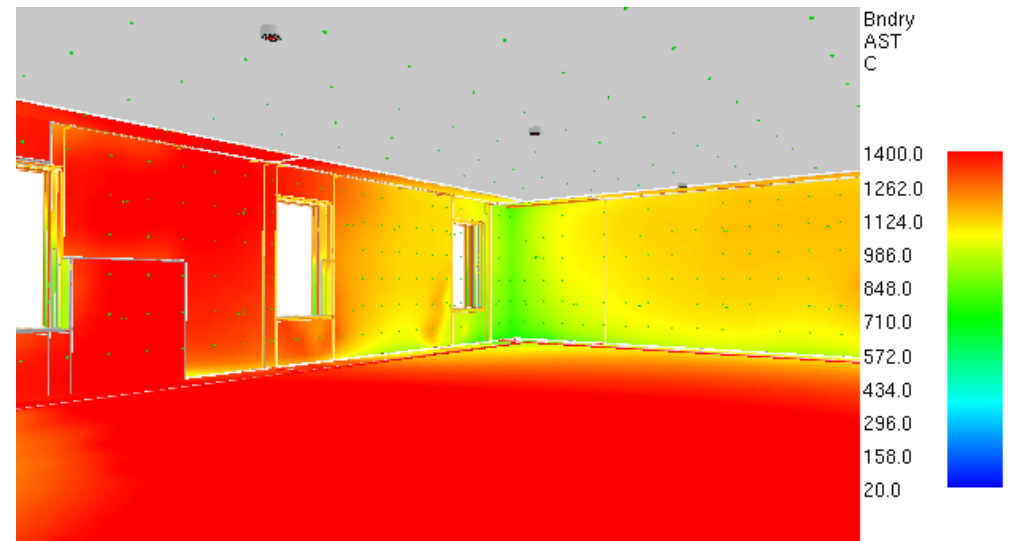
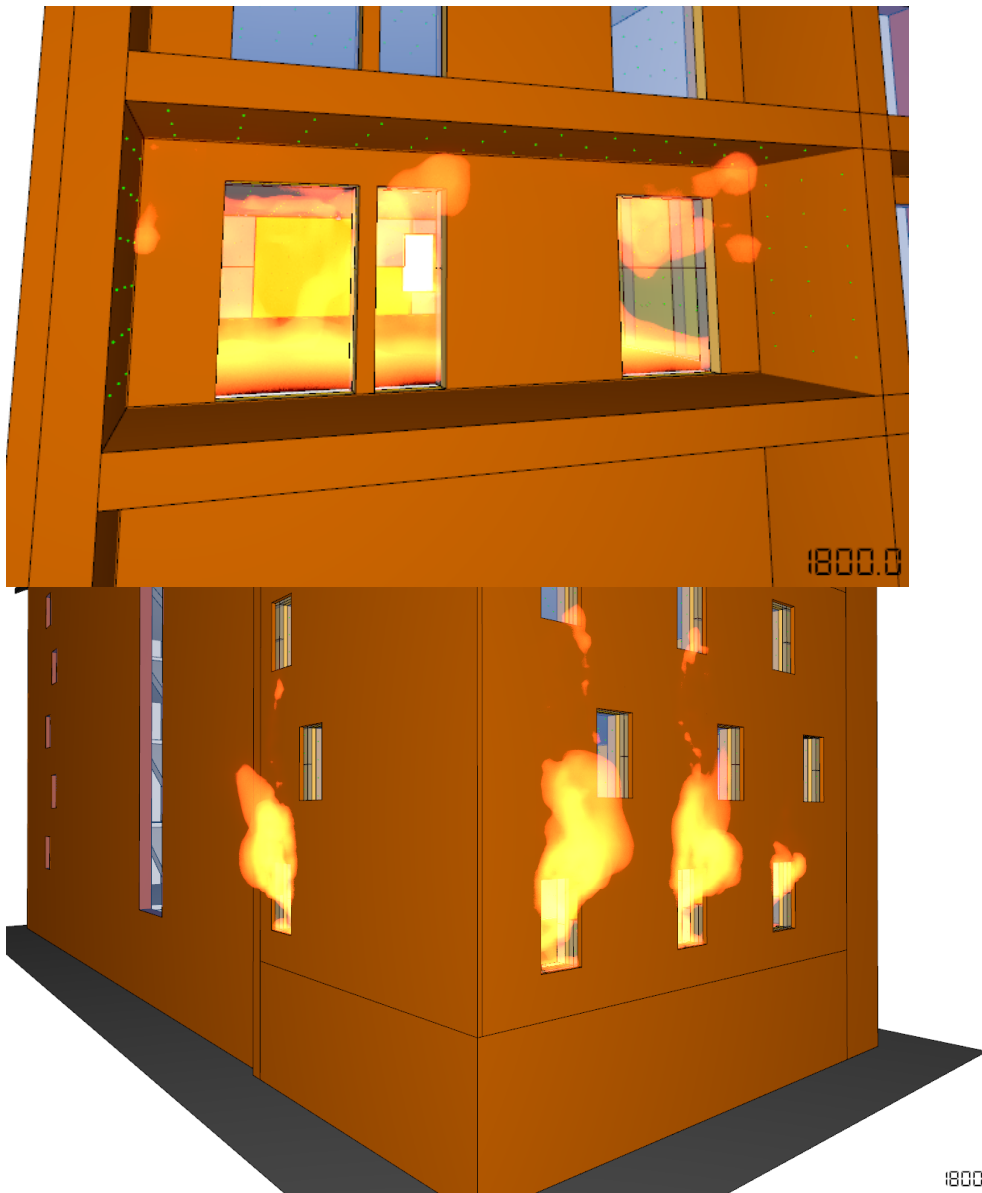
Kuumimpien pisteiden lämpötilat ja ekvivalentti standardipalo: Palo II



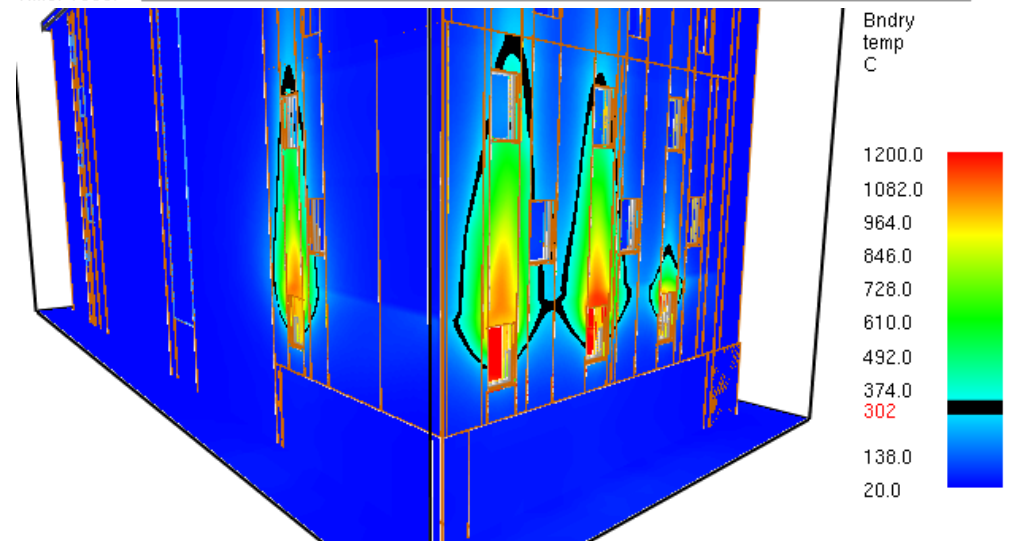
- Ekvivalentti standardipalorasitus eri pintojen kuumimmissa pisteissä:
 - Seinän sisäpinta: **59,4 min**
 - Ylä-/välipohjan alapinta: **39,3 min**
 - Seinän tuuletusväli: **63,6 min**



Palosimuloinnit: Palo III



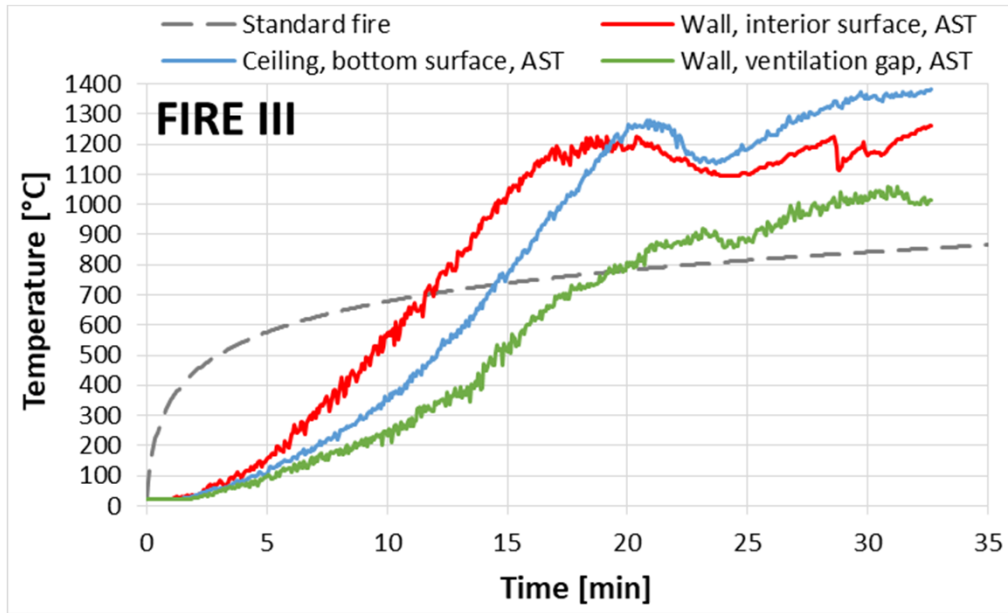
Time: 1958.



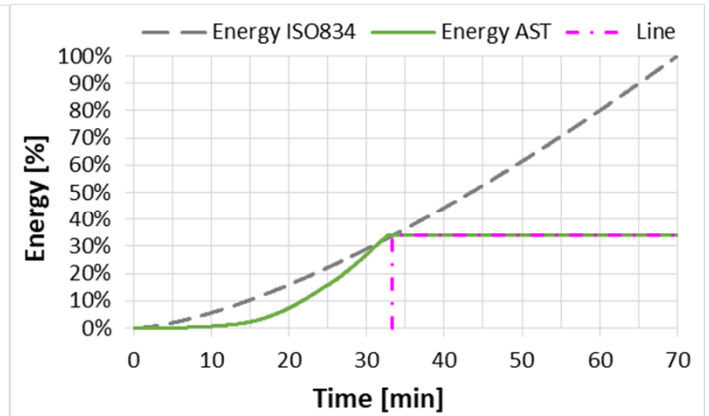
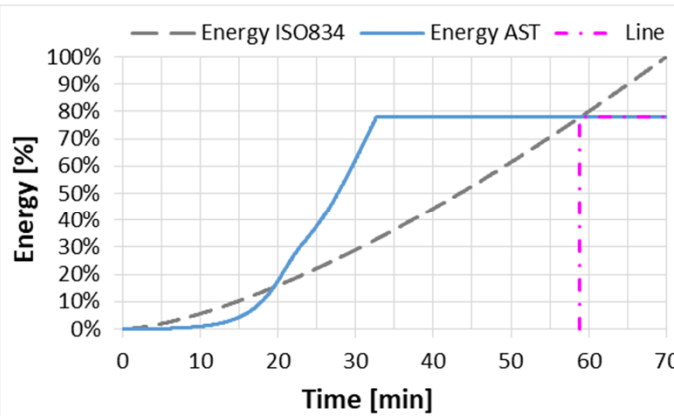
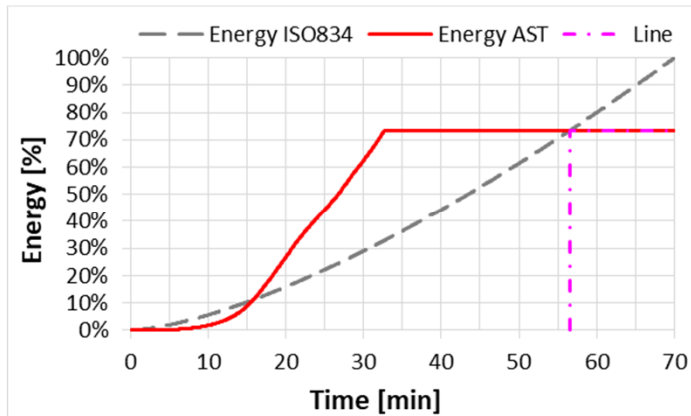
1800.0

Time: 1958.

Kuumimpien pisteiden lämpötilat ja ekvivalentti standardipalo: Palo III

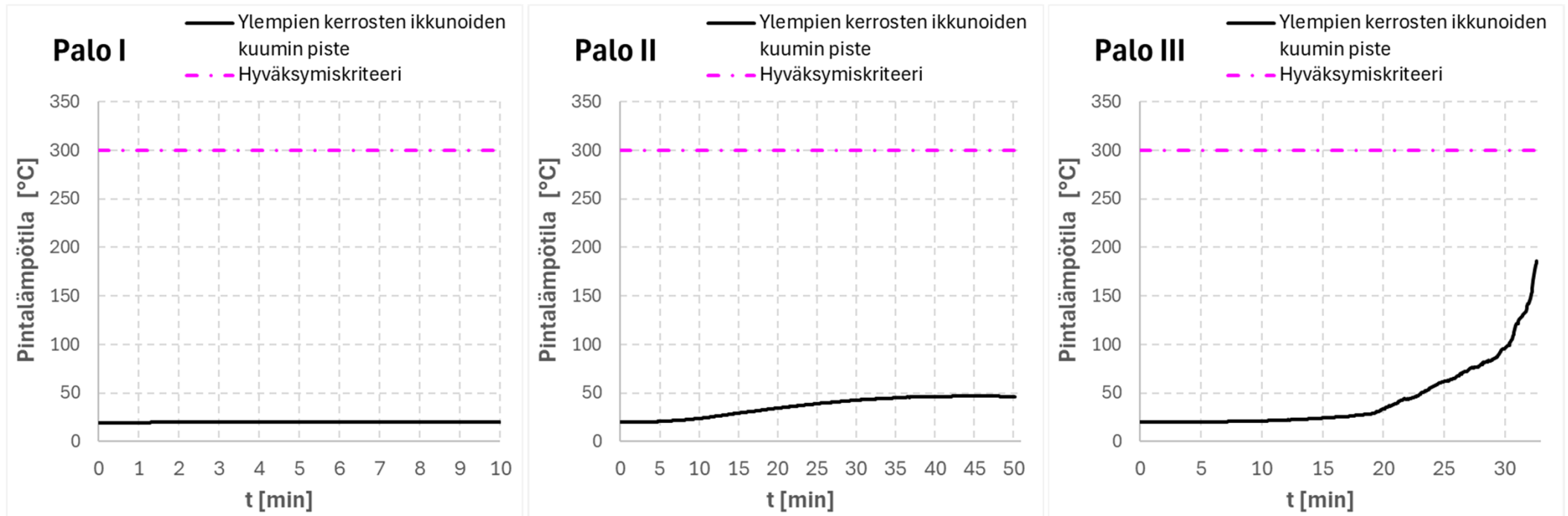


- Ekvivalentti standardipalorasitus eri pintojen kuumimmissa pisteissä:
 - Seinän sisäpinta: **56,6 min**
 - Ylä-/välipohjan alapinta: **58,9 min**
 - Seinän tuuletusväli: **33,3 min**

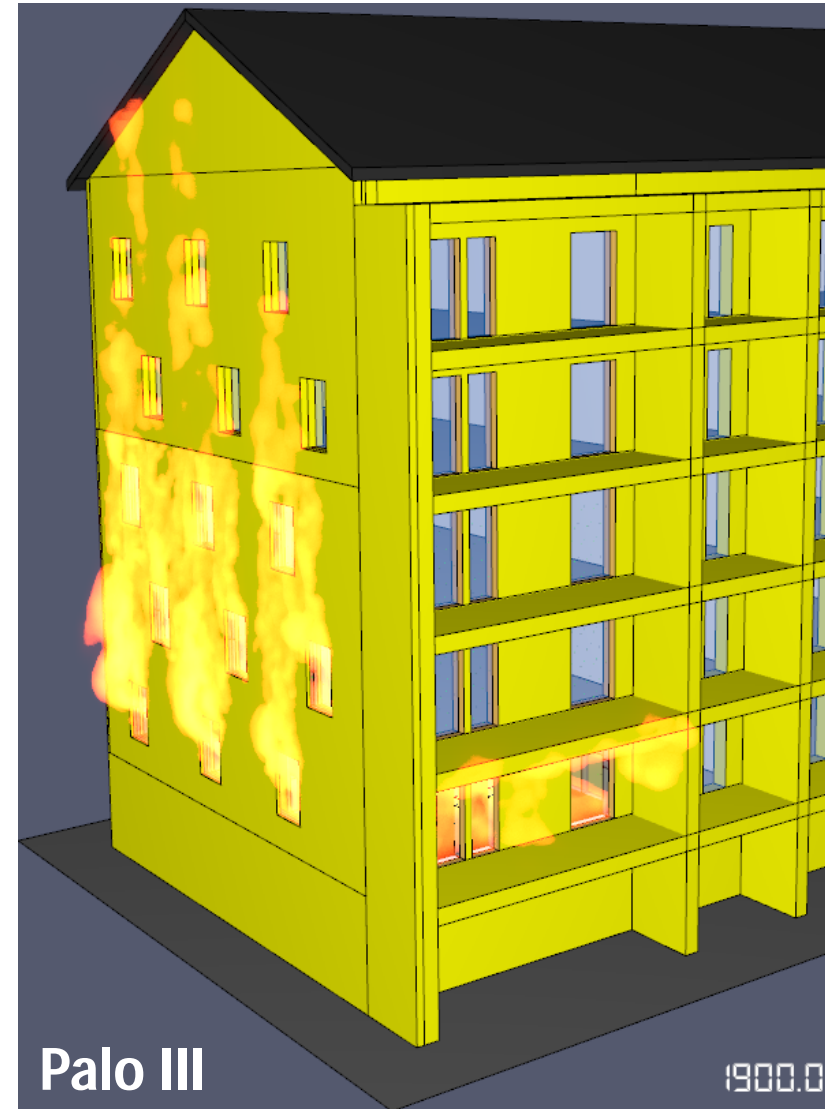


Palon leviäminen ylempiin kerroksiin

- Palo voi helpoimmin levitä ylempiin kerroksiin rikkoutuvien ikkunoiden kautta.
- Seuraavissa kuvissa on esitetty ylempien kerrosten kuumimpien pisteiden pintalämpötilojen kehitys ja sen vertailu rikkoutumislämpötilaan.
- Osastoivuus siis säilyy kaikissa tapauksissa vaadittavan ajan.

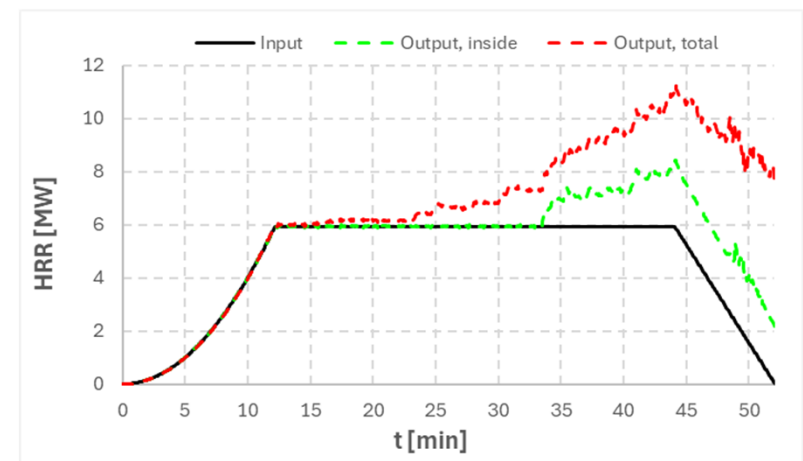
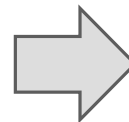
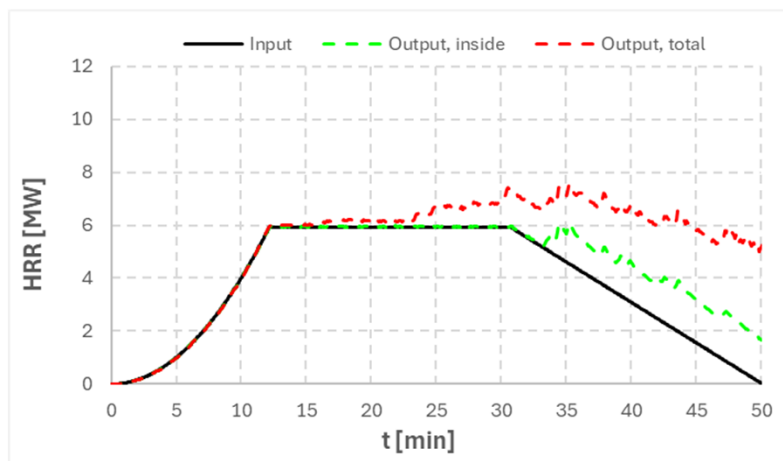
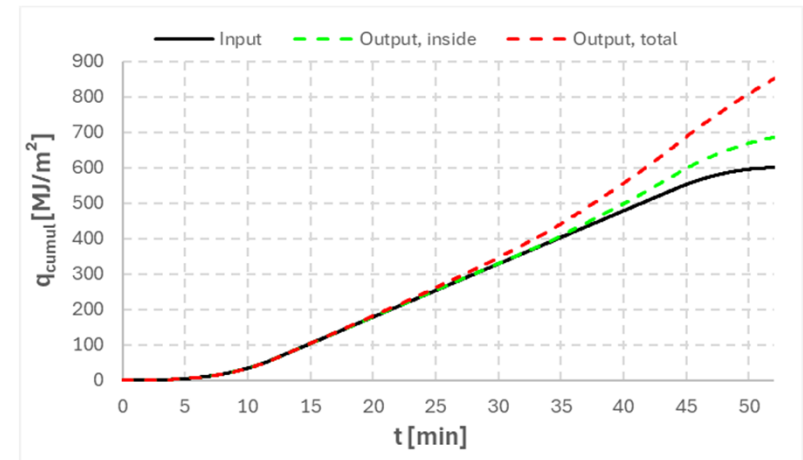
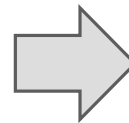
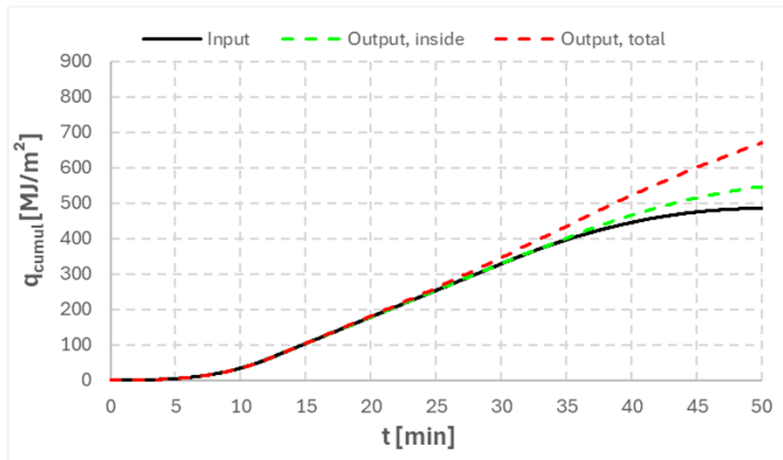


Herkkyytarkastelu: palosuomattomien ulkoverhouspaneelien vaikutus

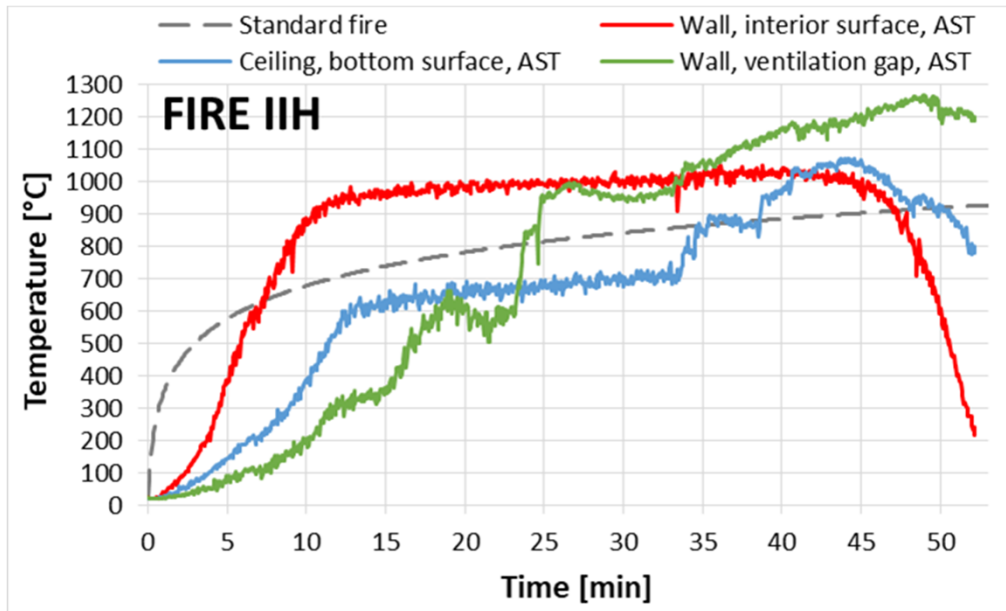


Herkkyystarkastelu: Palokuorman kasvatus Palossa II

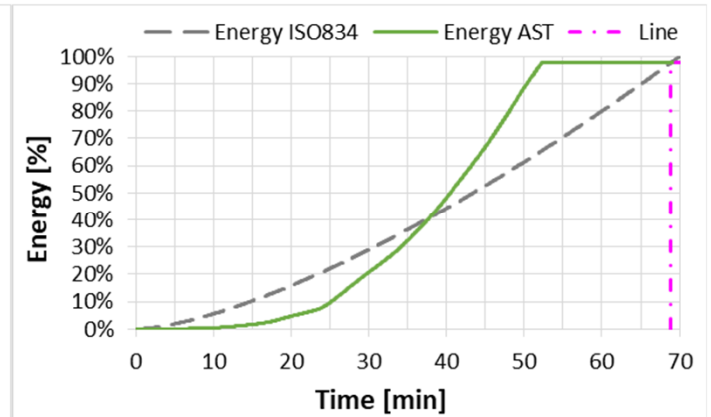
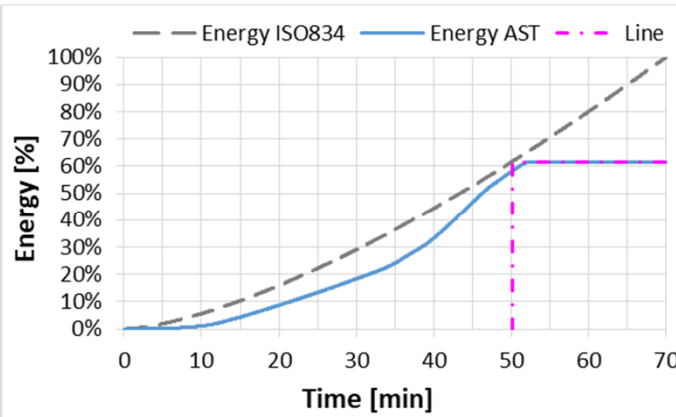
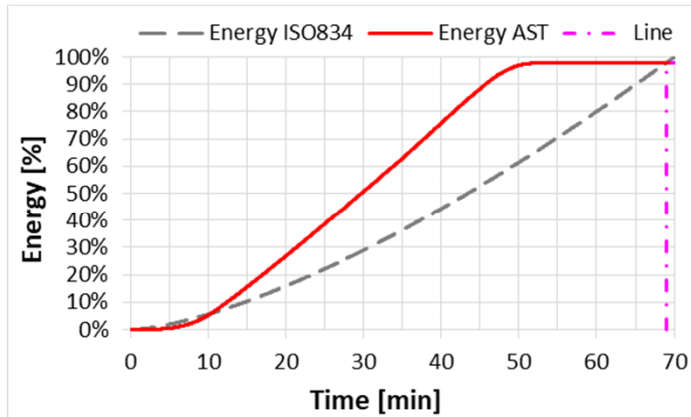
- Asetuksen minimivaatimus 600 MJ/m² ei aivan toteutunut Palossa II, joten kasvatetaan Palon II palokuormaa.



Herkkyystarkastelu: Palokuorman kasvatus Palossa II

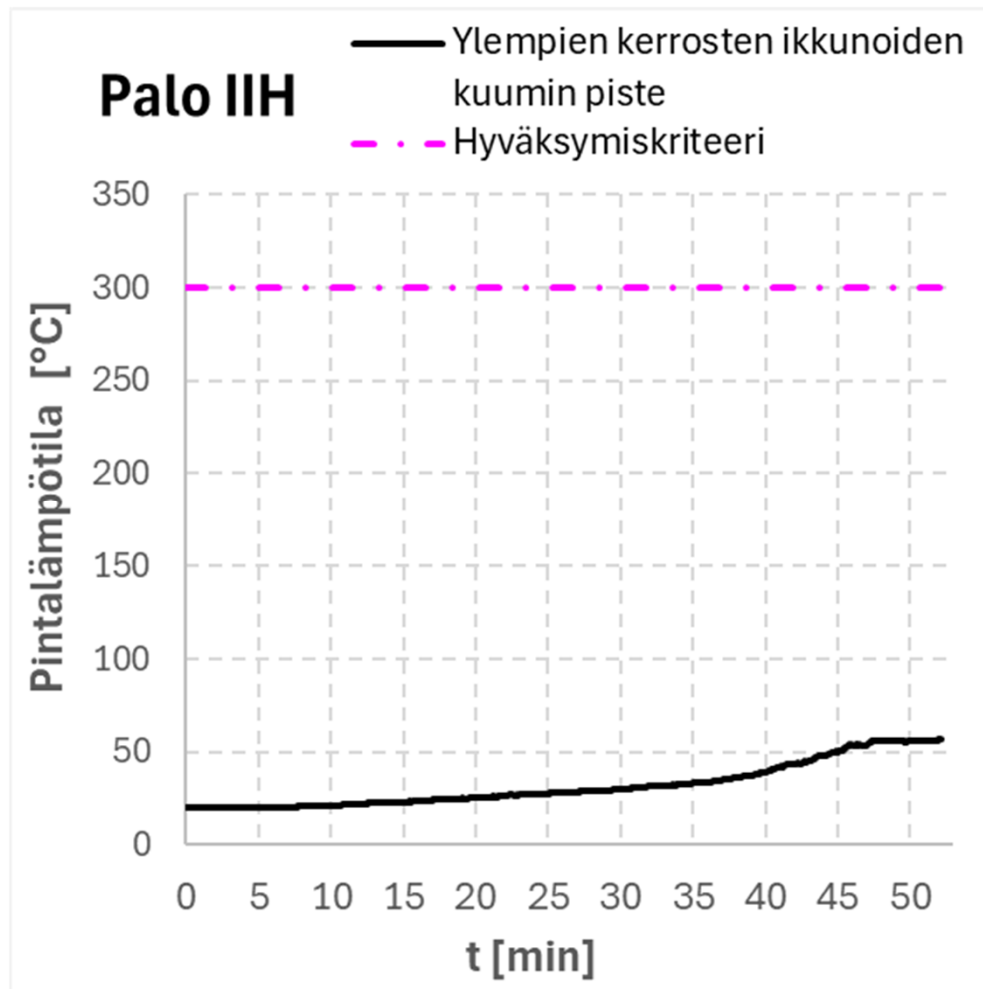


- Ekvivalentti standardipalorasitus eri pintojen kuumimmissa pisteissä
 - Seinän sisäpinta: **68,9 min**
 - Ylä-/välipohjan alapinta: **50,1 min**
 - Seinän tuuletusväli: **68,9 min**
- Palorasitukset siis hieman kasvavat verrattuna aiempaan.



Herkkyystarkastelu: Palokuorman kasvatus Palossa II

- Osastoivuus säilyy edelleen vaadittavan ajan.



Johtopäätökset: suojaverhoukset

- Seinän sisäpinnan suojaverhousvaatimus **K₂30**
 - Eli sama vaatimus kuin vastaavan P2 paloluokan puukerrostalon taulukkomitoituksessa.
 - Savi+hampun päistäre -levytyksen kokonaispaksuus **24 mm.**
- Tuuletusvälin sisäpinnan suojaverhousvaatimus **K₂10**
 - Eli sama vaatimus kuin vastaavassa P1 paloluokan asuinrakennuksessa silloin kun käytetään palavia eristeitä.
 - Savi+hampun päistäre -levytyksen kokonaispaksuus **10 mm.**
 - Ruoko-tärkkelyslevylle ei ole rakenteessa varsinaista paloteknistä tarvetta, ellei sitten kantavien puurakenteiden palomitoituksessa tarvita ylimääräistä hiiltymäsuojaa.

Johtopäätökset: suojaverhoukset

- Yläpohjan alapinnan suojaverhousvaatimus **K₂60**
 - Kutterilastueristettä käytettäessä (muussa tapauksessa ks. välipohjat)
 - Savi+hampun päistäre -levytyksen kokonaispaksuus **38 mm**.
 - Vaatimuksen tulee siitä, ettei näissä laskennallisissa tarkasteluissa paloa voitu päästää etenemään kutterilastueristeeseen asti. Pelkästään laskennallisesti ei siis voitu määrittää riittävällä varmuudella missä vaiheessa yläpohjan osastoivuus menetetään sen jälkeen, kun kutterilastueriste on syttynyt palamaan (eli täyttyykö REI60?). Tällöin koko 60 minuutin vaatimus on jouduttu kohdistamaan suojaverhouskerrokseen. Viemällä kyseinen yläpohjarakenne koepoltettavaksi vaatimusta todennäköisesti saisi pudotettua alemmas.
 - Yläpohjan yläpintaan (eli yläpohjan tuuletusrakoon) ei tule suojaverhousvaatimusta, mutta yläpohjan ontelon rakenteen näkyvän pinnan tulee täyttää D-s2, d2 pintaluokkavaatimus. Kutterilastueristeiden yläpinta tulee siis esim. savettaa tai päällystää esim. puulevytyksellä.
- Välipohjien alapinnan suojaverhousvaatimus **K₂60**
 - Välipohjat eivät olleet mukana tutkimusprojektin laajuudessa, joten niille on jouduttu käyttämään sellaista suojaverhousa etteivät välipohjat osallistu paloon.
 - Tätä vaatimusta on mahdollista optimoida alemmas (todellisessa suunnittelukohteessa, kun välipohjarakenne on lukittu) esim. K₂30 luokkaan asti, mutta tämän suojaverhouksen heikentäminen saattaa nostaa vaatimuksia muualla, koska myös välipohjan osallistuessa paloon tulipalon kokonaisvoimakkuus kasvaa.

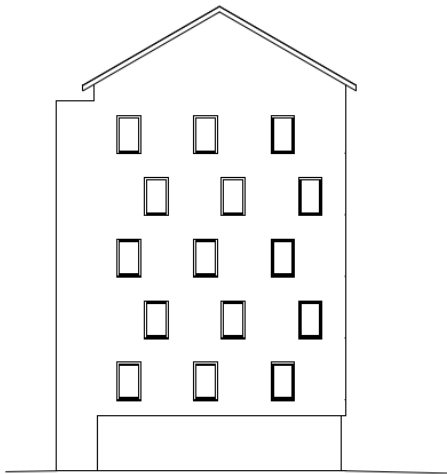
Johtopäätökset: muut rakenteet

- Kantavien rakenteiden palonkestävyys **R70 (tai R75)**
 - Eli vaatimus on siis hieman korkeampi kuin vastaavalla P2 tai P1 paloluokan asuinrakennuksella (jossa ko. vaatimus on R60).
 - R70-R75 vaatimus pätee palon molempiin suuntiin (sisältä ulos tai ulkoa sisään).
- Ulkoseinän ulkopinnan ja tuuletusvälin sisäpinnan pintaluokkavaatimus **B-s2, d0**
 - Vaatimus on siis hieman tiukempi kuin taulukkomitoituksessa, jossa tietyin ehdoin sallitaan myös D-s2, d2 ulkoverhous, mutta tällöinkin taulukkomitoituksessa tuuletusvälin suojaverhousvaatimus kasvaa eikä palosuojaamatonta puupintaa sallita maantasokerrokseen.
 - Puupaneeleita käytettäessä siis verhous on palosuojakäsiteltävä (molemmiin puolin).
 - Sama vaatimus koskee myös tuuletusvälin koolausta (eli joko palosuojakäsittely tai teräskoolausta).
- **Palon eteneminen tuuletusraossa on estettävä kerroksittain**
 - Vaatimus on siis hieman tiukempi kuin taulukkomitoituksessa, jossa tätä ei aina edellytetä.
 - Esim. rei'itetyt hattuprofiilit.



Johtopäätökset: muut rakenteet

- Ikkunoiden limitys kerroksittain (pl. parvekkeet ja porrashuone) :
 - Kuten alussa arveltiin, vaatimukset olisivat huomattavasti tiukemmat jos ikkunoiden limitystä ei oltaisi tehty.
- Parvekkeen pinnat **B-s2, d0**
 - Tarkastelujen perusteella näissä pinnoissa voi olla kuitenkin varaa optimoida pintaluokkavaatimusta alemmas.



East facade



South facade
- maximum amount of window openings

Johtopäätökset: tulosten laajentaminen

- Tulokset voidaan laajentaa 8 kerroksisiin (28 m korkeisiin) asuinrakennuksiin asti
 - Case rakennus oli 6-kerroksinen.
 - Taulukkomitoituksen vaatimukset kasvavat merkittävästi yli 28 m korkeissa rakennuksissa, joka täytyy huomioida myös toiminnallisissa tarkasteluissa.
- Tulokset voidaan laajentaa kerrosalaltaan n. 5000 m² asti
 - Case rakennuksen kerrosala oli n. 2300 m².
 - Taulukkomitoituksen maksimi oli 12 000 m² P2-paloluokan puukerrostaloissa
 - Jos 5000 m² halutaan ylittää, vaikuttaa se tuloksiin riskianalyysin kautta.
- Tulokset pätevät Pirkanmaan riskiluokkien I ja II alueilla; muualle analyysi palokunnan toimintavalmiudesta täytyy tehdä uudestaan.
- Tutkimuksessa kaikki suojaverhoukset on oletettu savi+hampunpäistäre levytyksiksi, mutta tulokset pätevät myös muihin suojaverhoustapoihin, kunhan K₂-luokka pysyy samana (ja suojaverhouksen pinta A2-s1, d0)
 - Periaatteessa käytettäessä kipsilevyjä voitaisiin päästä vielä aavistuksen parempiin tuloksiin, mutta tämä johtuu ainoastaan siitä, että kipsilevyt ovat niin tunnettu materiaali ja niiden palokäyttäytymiselle voi hyödyntää hieman vähemmän konservatiivisempia oletuksia.

Johtopäätökset: muuta

- **Oletettuun palonkehitykseen perustuva suunnittelu** (toiminnallinen paloturvallisuussuunnittelu, palosimuloinnit) **on aina kohdekohtainen**, eli tämän tutkimuksen tuloksia ei voi sellaisenaan käyttää oikean kohteen suunnitelmina
 - Tutkimuksessa hyödynnettyjä menettelytapoja voidaan kyllä soveltaa oikeaa kohdetta suunnitellessa.
 - Tarkasteluista kirjoitetaan simulointiraportti, jossa laskentamallit ja tulokset on kuvattu tarkemmin.
- Tässä esityksessä näytetyt tulokset ovat alustavia (mutta tuskin on enää tulossa ainakaan isompia muutoksia).

Kiitos!

Timo Jokinen

Johtava asiantuntija

timo.jokinen@kauriala.fi