



Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy

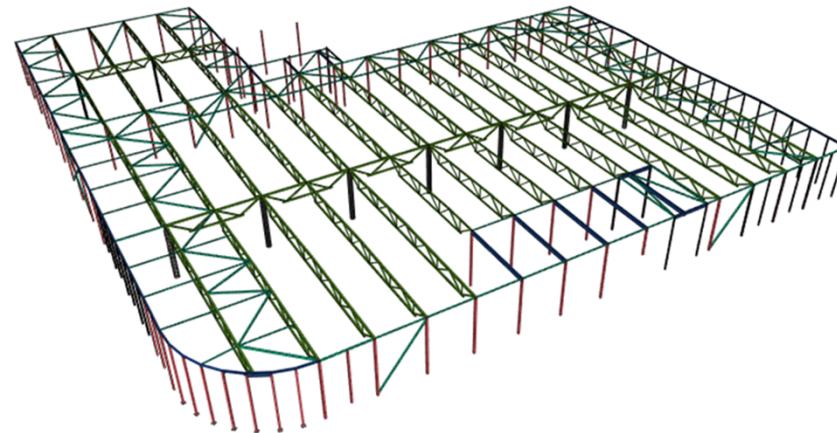
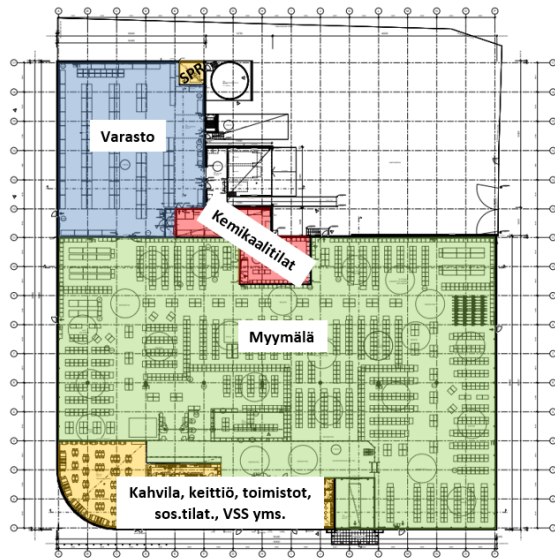
Risto Ranua

risto.ranua@kauriala.fi

Kantavien teräsrakenteiden kokonaisvaltainen toiminnallinen palomitoitus – viimeaikaiset kehitysaskeleet ja case-esimerkki

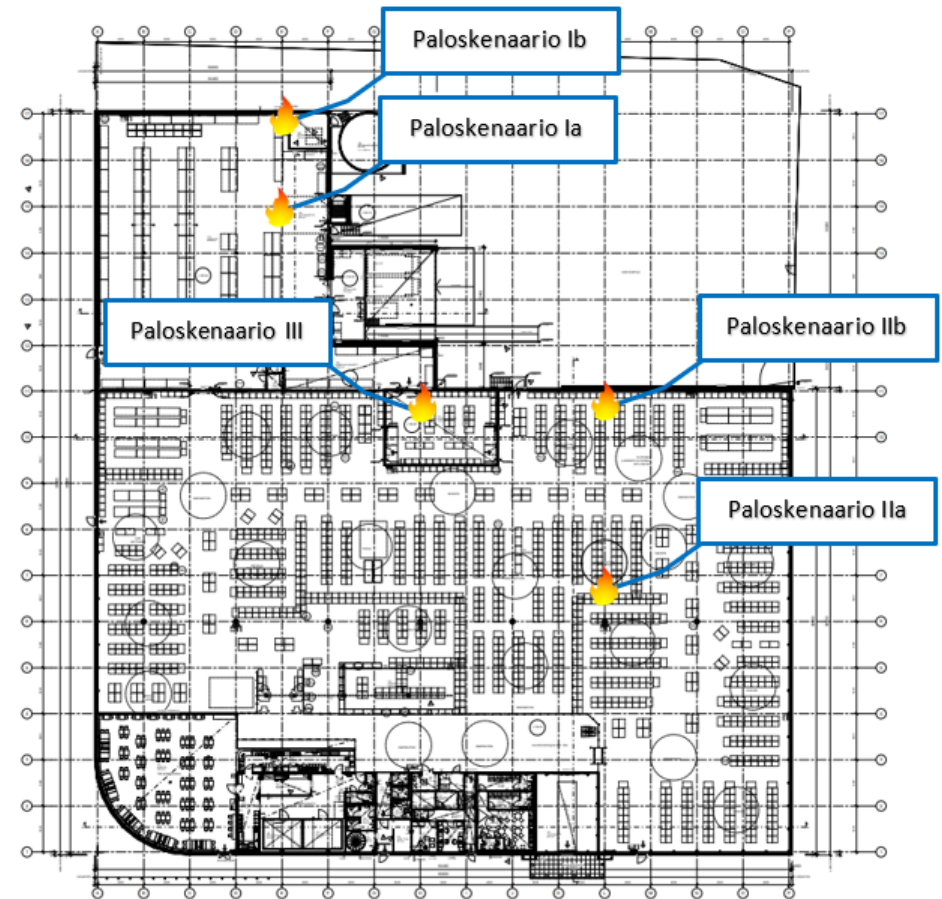
Case-esimerkki

- Biltema Kangasala
- Paloluokka: P0(P2)
- Kokonaiskerrosala: 6620 m²
- Suojaustaso: 2+3 (alkusammutuskalusto, automaattinen sammutuslaitteisto ja automaattinen paloilmoitin)
- Pääosin teräsrakenteinen (teräspilarit, -palkit ja -ristikot), betoniset keskipilarit
- Taulukkomitoituksen mukainen palonkestovaatimus R30



Mitoituspalot

- Paloskenaarioiden tulee kattaa kohteessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet (asetuksen 848/2017 3§:n vaatimus).
 - Paloskenaario I: Korkean varastohyllyn palo varastossa
 - Paloskenaario II: Yhdistetty myymälähyllyn ja palavan nesteen (100 l) palo myymälässä
 - Paloskenaario III: Palavan nesteen (500 l) palo kemikaalihuoneessa
- Paloskenaariot I ja II tutkittiin kahdella eri sijainnilla:
 - palo keskialueella (Paloskenaariot Ia ja IIa)
 - palo reuna-alueella (Paloskenaariot Ib ja IIb)

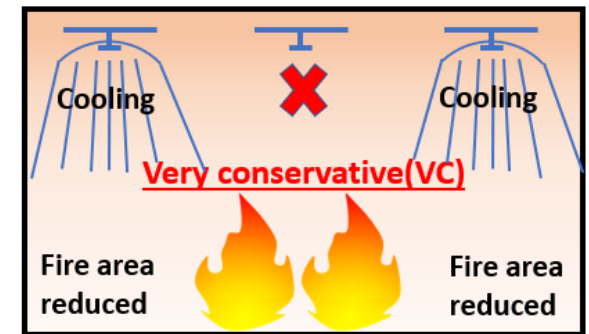


Sprinkler frameworkin^[1] soveltaminen

- Riskiluokka: Moderate
- Valittiin mitoitusperusteeksi Basis of design 1a (BOD 1a)
 - Palokuormana 80 %:n fraktiili (Yma 848/2017 ja 927/2020)
 - Rakenteiden kestettävä mitoituspaloa 60 min (Yma 848/2017 ja 927/2020)
 - Oletus sprinklerjärjestelmän toimivuudesta: Very conservative (VC)
- Kohde 1-kerroksinen ja lyhyet poistumismatkat: Basis of design 2 (BOD2) mukainen simulointi ei ole kohteessa tarpeen (katastrofiskenaario, sprinkler ei toimi lainkaan).

Table 5. Basis of Design (BOD) 1A and 1B (fractile of the fire load, the level of conservatism applied for sprinkler system and the acceptance criteria by risk category of the building).

	Risk Category of the Building					
	Low	Low+	Moderate	Moderate+	High	High+
BOD 1A	80 % C	80 % * VC	80 % VC	80 % * VC	80 % * VC	95 % ** VC
BOD 1B	50 % EC	50 % -	50 % -	50 % -	50 % -	90 % -
Acceptance Criteria 1 – Required fire resistance time	30 min	30 min	60 min	60 min	Full Fire	Full Fire



* At least 600 MJ/m²

** At least 900 MJ/m²

[1] Salminen, M., Malaska, M., Jokinen, T., Ranua, R. 2022. Framework to incorporate sprinkler system in structural fire engineering. In: Proceedings of 12th International Conference on Structures in Fire (SIF'22). 30 November - 2 December 2022. The Hong Kong Polytechnic University. ISBN: 978-962-367-869-8.

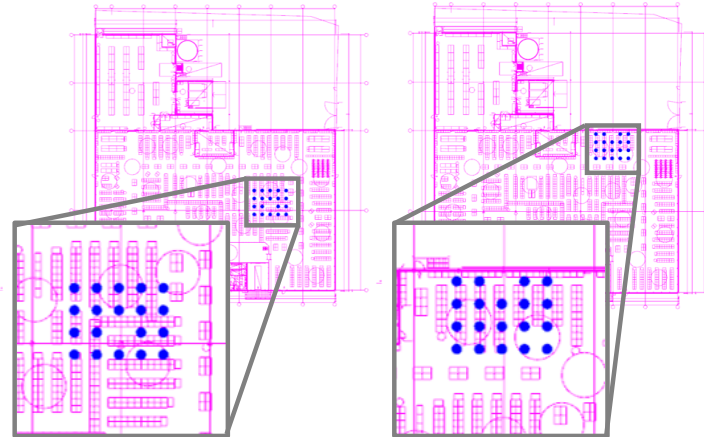
Sprinkelereiden mallintaminen

- Sprinklerjärjestelmä otettiin analyseissä huomioon konservatiivisin oletuksin siten, että järjestelmän oletettiin olevan osittain vikaantunut.
 - Simulointi kuvaa kutakuinkin tilannetta, jossa osa lattiapinnasta jää sprinklersuihkulta katveeseen esim. putkitukosten, viallisten suuttimien tai virheellisten asennusten seurauksena rakennuksen elinkaaren aikana.
- Varaston paloskenaarioissa kaikki hyllysuuttimet oli oletettu vialliseksi, mutta kaikkien kattosuuttimien oli oletettu toimivan. Muissa paloskenaarioissa yksi kattosuutin juuri mitoituspalon yläpuolella oli oletettu vialliseksi.

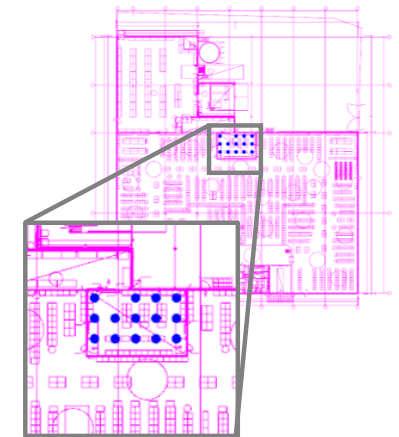
Varaston paloskenaariot



Myymän paloskenaariot



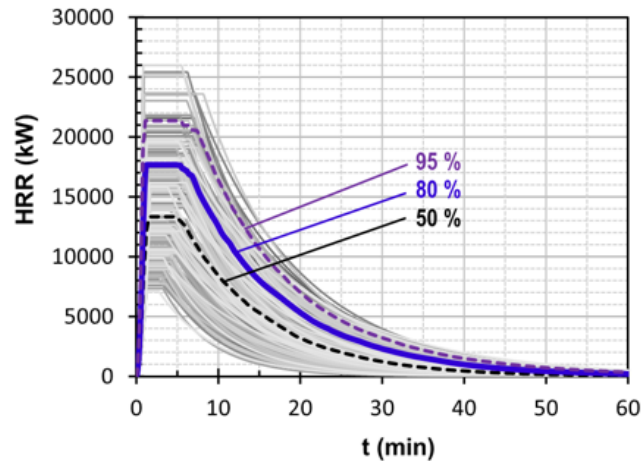
Kemikaalihuone



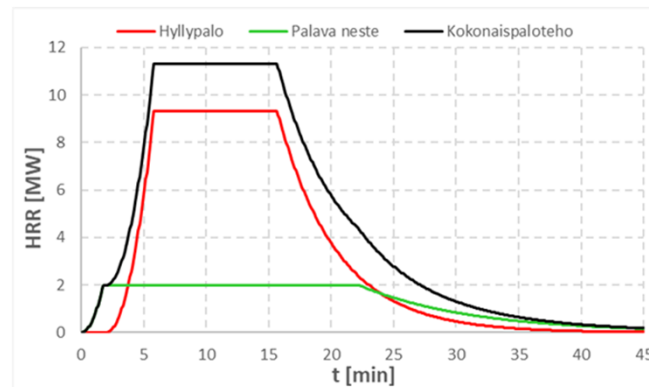
Sprinkelereiden vaikutus mitoituspaloihin

- Varastohyllyn mitoituspaloa määrittäessä palon lähellä olevien telineistösprinklersuuttimien ei katsota olevan toiminnassa. Tällöin ainoastaan kattosuuttimet voivat rajoittaa tulipaloa ja varastohyllyn paloteho voi kasvaa suhteellisen korkeaksi.
- Myymälähyllyn mitoituspalo määritettiin 12 m² pinta-alalla (esim. vikatilanteessa sprinkleriltä katveeseen jäävä alue).
- Kemikaalihuoneen mitoituspalossa sprinkleri huomioitiin vain paloon osallistuvan nesteen määrässä.

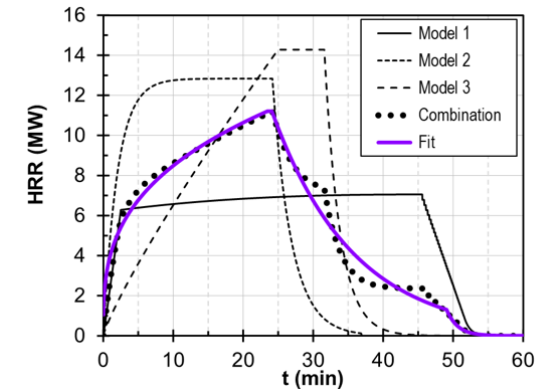
Varastohyllyn mitoituspalo



Myymälähyllyn ja palavan nesteen (100 l) mitoituspalo



Palavan nesteen (500 l) palo



Rakenteiden palonkesto yksinkertaisilla laskentamalleilla

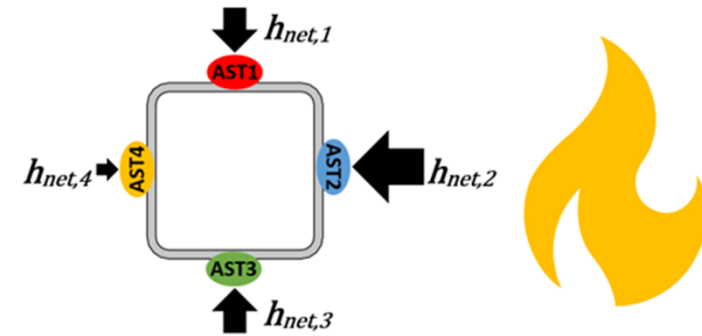
- Jokainen tarkasteltava kohta analysoitiin erikseen ja todellisella profiilikoolla käyttäen Eurokoodin EN 1993-1-2 / 4.2 muokattuja laskentakaavoja [2].

$$\theta_a(t + \Delta t) = \theta_a(t) + k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net} \Delta t$$

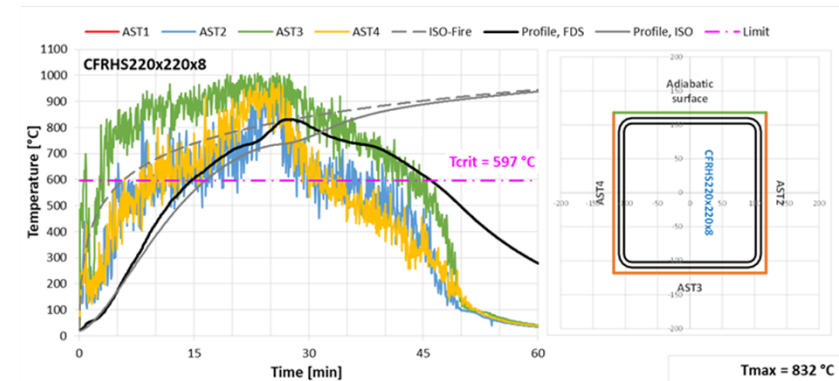
$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} = \alpha_c(\theta_g - \theta_a) + \Phi \varepsilon_m \varepsilon_f \sigma [(\theta_r + 273^\circ\text{C})^4 - (\theta_a + 273^\circ\text{C})^4]$$

$$k_{sh} = \begin{cases} 0.9 \cdot (A_m/V)_b / (A_m/V), & \text{for I-sections} \\ 1.0, & \text{for other sections} \end{cases}$$

- Tulokset saadaan:
 - kuvaajina jokaisesta tutkitusta kohdasta
 - kaikkien tutkittujen kohtien kattavana IFC-mallina



Pilarin teräsprofiilin lämpeneminen palosuojamattomana rakenneseosan kuumimmassa pisteessä



[2] Jokinen, T., Ranua, R., Salminen, M. 2022. Steel section equivalent uniform temperature distribution in performance-based fire design – EC3 calculation method generalized for non-uniform fire exposure. In: Proceedings of the 12th International Conference on Structures in Fire. pp 2 – 13.

IFC-malli

- Mallin luonnissa hyödynnettyjä ohjelmia:

Excel VBA



+

Python

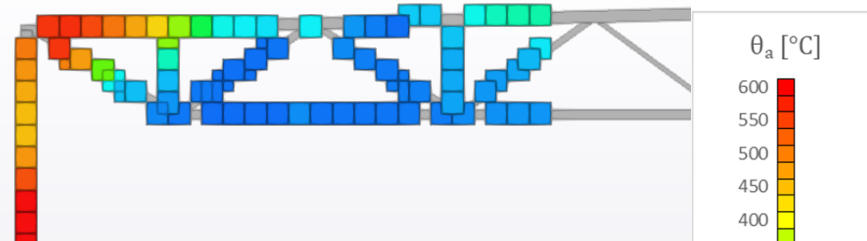


+

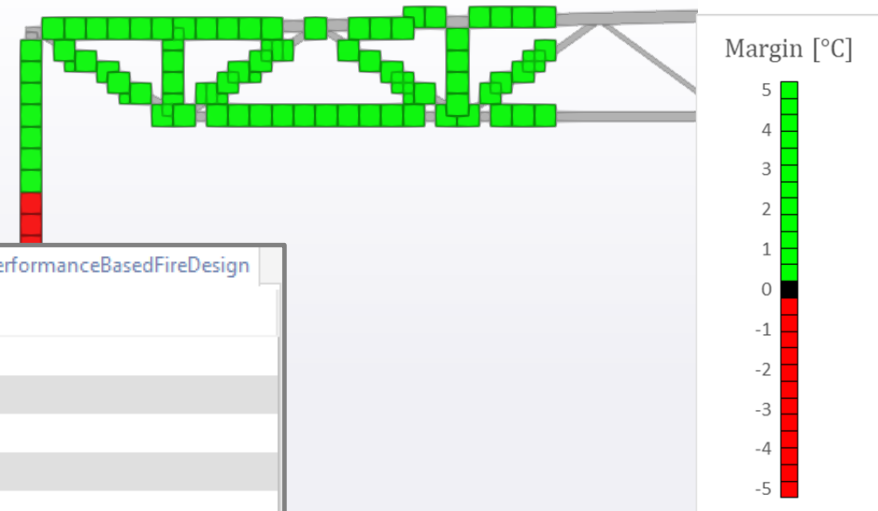
IfcOpenShell



Profiilien lämpötila



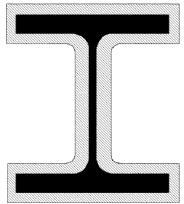
Marginaali kriittiseen lämpötilaan



Identiteetti	Sijainti	Määrä	Profiili	Relaatiot	Luokittelu	Hyperlinkit	PerformanceBasedFireDesign
Ominaisuus							Arvo
Associated Member							COLUMN
Critical Temperature Used							597 °C
DEVC name in FDS							AST_F3_C001_+00090
Fire Scenario							F3SP
Section Temperature							832 °C
Section Used							CFRHS220x220x8

Palosuojauksen määrittäminen 1/3

- Vaadittavaa palosuojausluokkaa määritettiin Eurokoodin SFS-EN 1993-1-2 kohdan 4.2.5.2 mukaisella palosuojattujen teräprofiilien laskentakaavojen perusteella.



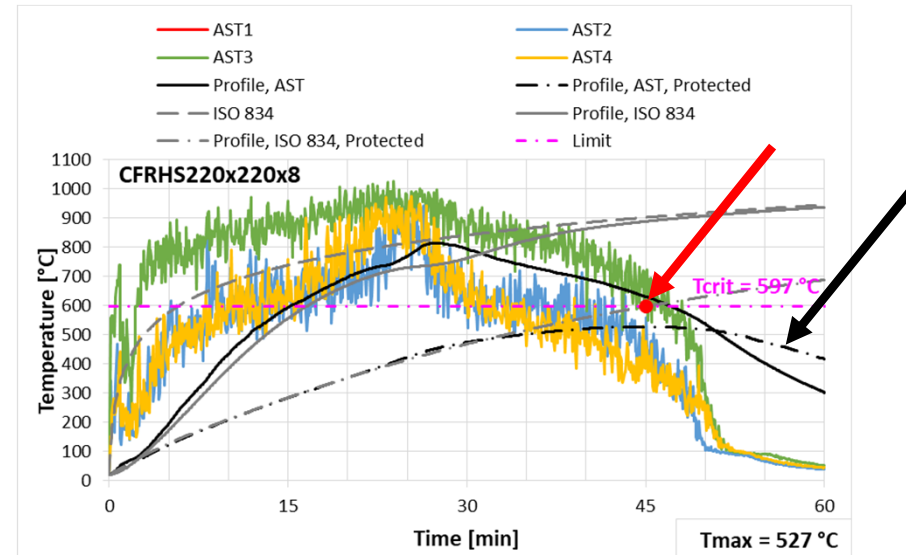
$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p A_p/V (\theta_{g,t} - \theta_{a,t})}{d_p c_a \rho_a (1 + \phi/3)} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad \phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p A_p/V$$

- Kaavat on tarkoitettu levy- / villasuojaukselle, mutta niillä voidaan tehdä suojausmenetelmästä riippumattomia arvioita palonkestoluokan riittävydestä, jos tarkastelu tehdään suhteellisesti verrattuna standardipaloon.

Palosuojauksen määrittäminen 2/3

1. Lasketaan palosuojaamattoman profiilin lämpeneminen sekä mitoituspaloissa, että standardipaloissa.
2. Määritetään profiilin palosuojauksen paksuus siten, että profiilin lämpötila standardipaloissa palonkestoluokan ajanhetkellä = kriittinen lämpötila (esimerkissä R45).
3. Lasketaan profiilin lämpeneminen täysin samalla suojauksella mitoituspalon lämpötiloissa. Jos lämpötila jää alle kriittisen arvon, palonkestoluokka on riittävä.

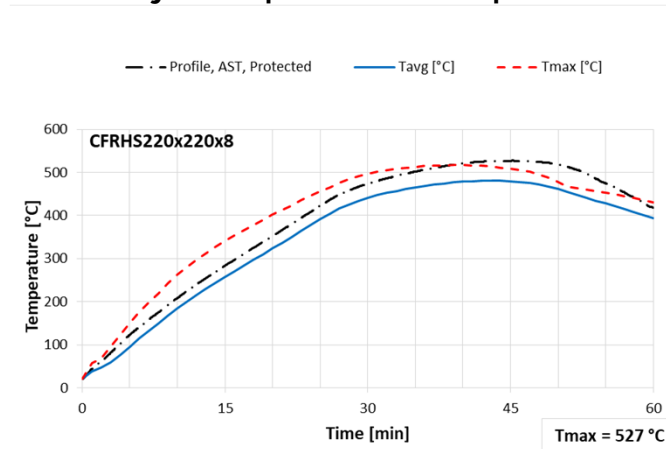
Pilarin teräsprofiilin lämpeneminen palosuojattuna luokkaan R45



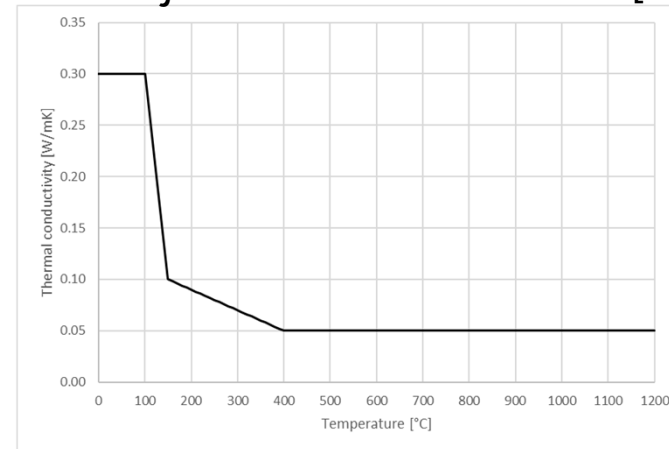
Palosuojauksen määrittäminen 3/3

- Kolmelta suunnalta palolle alttiina olevalle pilarille menetelmä ennusti liian korkeita (konservatiivisia) lämpötiloja verrattuna SAFIR-ohjelmalla saatuihin lämpötiloihin, koska laskentakaavat eivät huomioi esimerkiksi profiilin sisäistä lämmönsiirtoa.

Palosuojatun profiilin lämpeneminen

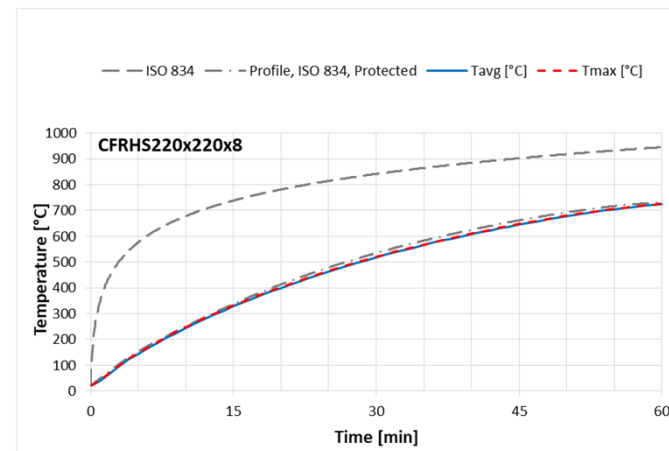


Palosuojamaalin materiaalimalli [3]



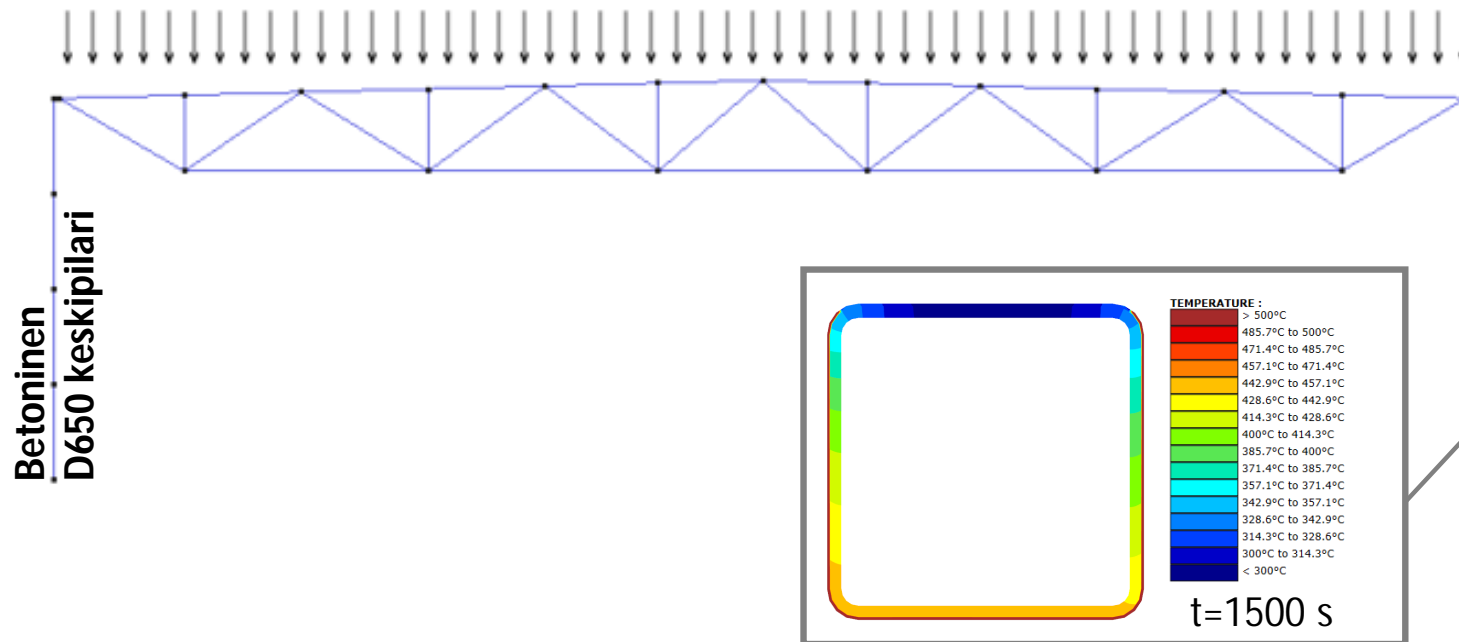
- Neljältä sivulta altistetuille rakenteille menetelmä ennustaa profiilin lämpötilan varsin tarkasti, varsinkin kun sisäinen lämmönsiirto on pieni.

[3] Lucherini A (2020) Fundamentals of thin intumescent coatings for the design of fire-safe structures. Dissertation, University of Queensland



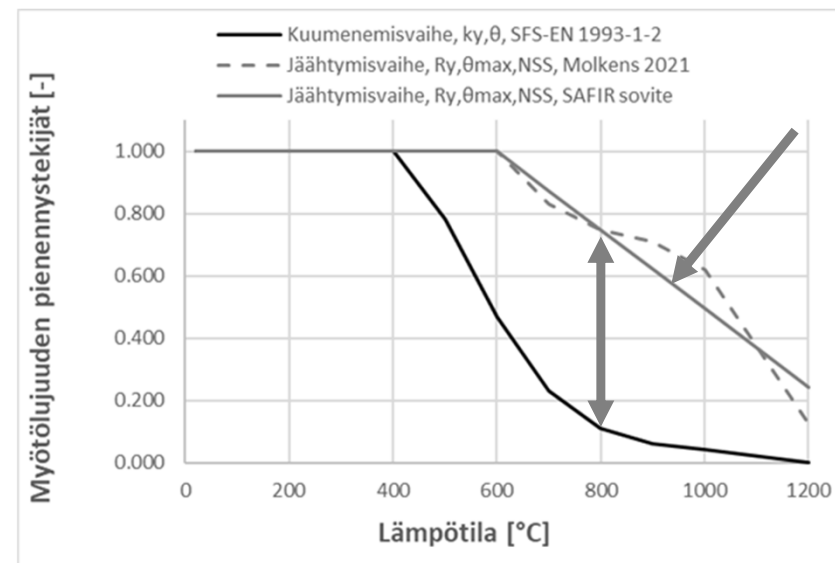
Rakenteiden palonkesto kehittyneillä laskentamalleilla 1/3

- Teräsprofiilien lämpötilat (palosuojatut ja palosuojaamattomat) laskettiin profiilin neljältä sivulta mitatuista AST lämpötiloista (profiilille epäsymmetrinen lämpötilakenttä).
- Lämmönsiirto myös profiilin sisällä olevassa ilmatilassa otettiin huomioon (VOID).
- Jokaiselle rakenneosalle käytettiin sen rakenneosan kuuminta poikkileikkauslämpötilaa (pidemmät rakenneosat kuten paarteet ja pilarit jaettiin lyhyempiin rakenneosiin).



Rakenteiden palonkesto kehittyneillä laskentamalleilla 2/3

- Teräseurokoodin materiaalmallit eivät tee eroa teräksen kuumenemis- ja jäähtymisvaiheiden välillä; todellisuudessa teräksen ominaisuudet eivät välttämättä kuumenemisen ja jäähtymisen jälkeen palaudu enää alkuperäiselle tasolle.
- Teräksen myötölujuuden lämpötilariippuvaista materiaalmallia täydennettiin lähteessä [4] esitetyn menetelmän mukaisesti, jonka mallit ovat koostettu satojen koetulosten perusteella teräksen jäähtymisvaiheen jälkeisistä ominaisuuksista.
 - Esimerkiksi 800 °C lämpötilasta teräksen lujuus palautuu vain noin 75 %:iin alkuperäisestä.
- SAFIR laskelmissa käytetyt kuumenemisvaiheen ja jäähtymisvaiheen pienennystekijät on yksinkertaistettu suoraksi sovitteeksi, koska SAFIR tukee vain bi-lineaarista jäähtymisvaiheen pienennystekijää.

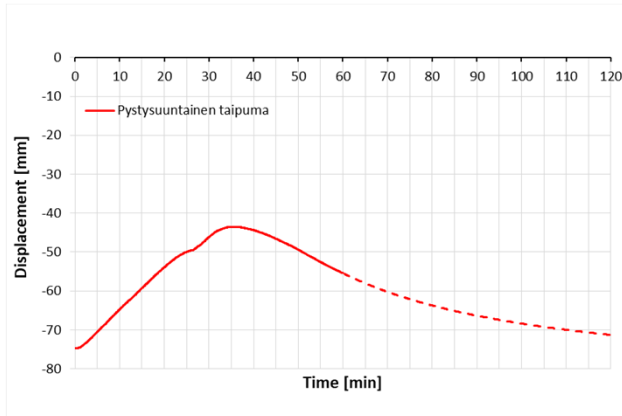


[4] Molkens, T., Cashell, K., Rossi, B. 2021. Post-fire mechanical properties of carbon steel and safety factors for the reinstatement of steel structures. Engineering Structures. 234. 111975. 10.1016/j.engstruct.2021.111975.

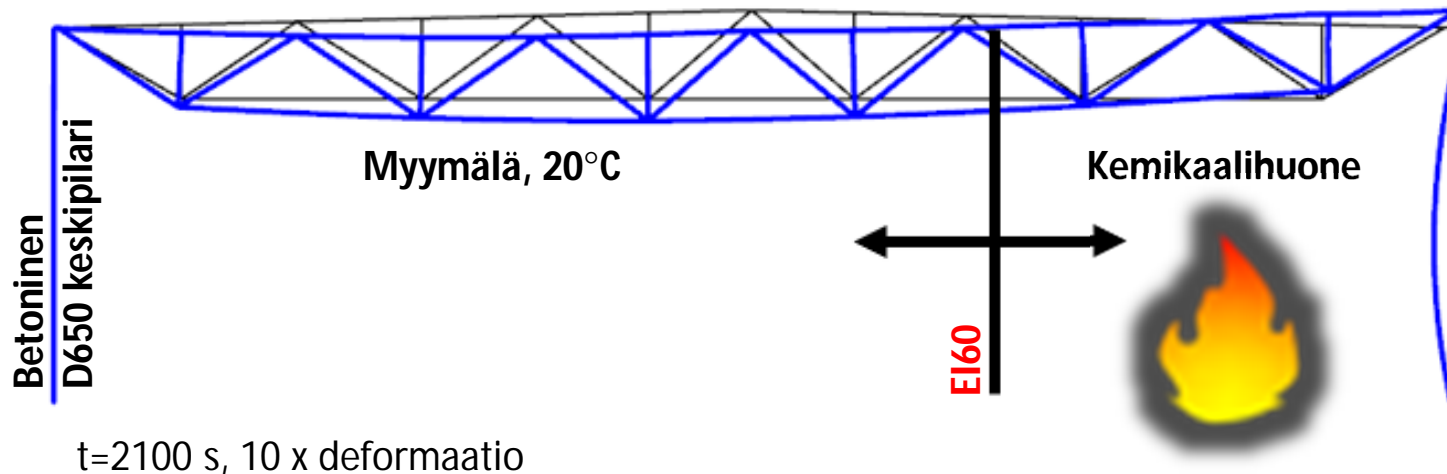
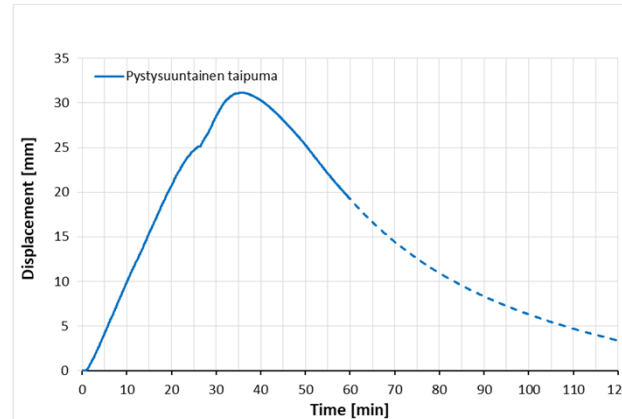
Rakenteiden palonkesto kehittyneillä laskentamalleilla 3/3

- SAFIR-mallissa kemikaalihuoneen pilari on palosuojattu em. periaatteiden mukaisesti luokkaan R45 ja muut rakenteet ovat palosuojaamattomia.

Ristikön suhteellinen taipuma

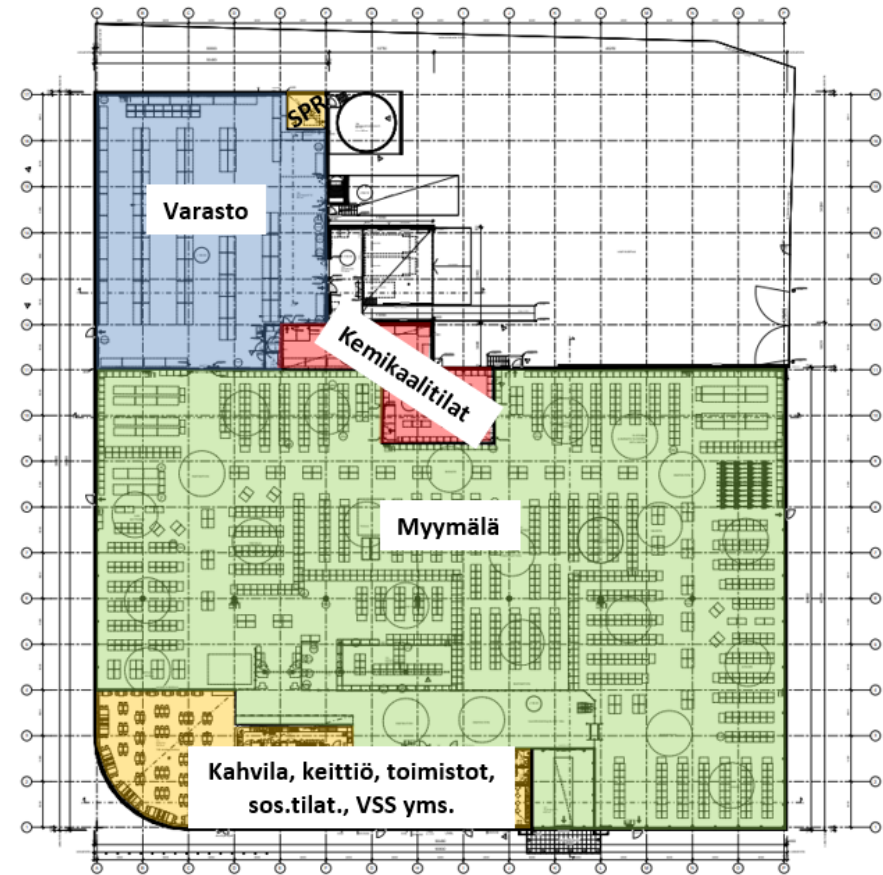


Ristikön absoluuttinen taipuma



Tulokset

- Rakenteet tuli palosuojata seuraavasti:
 - Myymälän teräspilarit tuli palosuojata luokkaan R30 neljän metrin korkeuteen saakka lattiatasosta.
 - Kemikaalihuoneen pilarit tuli palosuojata luokkaan R45.
 - Kemikaalivaraston pilarit tuli palosuojata luokkaan R45 ja kattorakenteet luokkaan R30.
- Muut rakenteet voitiin toteuttaa palosuojaamattomina.



Julkaisuja

- Julkaisuja toisesta toiminnallisen palomitoituksen case kohteesta:
 - Jokinen, T., Ranua, R., Salminen, M. (2022) Recent Developments in Holistic Performance-based Fire Design of Steel Structures - Case study: a padel-center. In: Proceedings of 12th International Conference on Structures in Fire (SiF'22). 30 November - 2 December 2022. The Hong Kong Polytechnic University. ISBN: 978-962-367-869-8.
<https://www.structuresinfire.com/corpo/conferences/SiF22.pdf>
 - Jokinen, T., Ranua, R., Salminen, M. (2023?) Holistic Performance-Based Fire Design of Steel Structures - Case Study: Sports Hall. Fire Technology **(vertaisarvioinnissa)**

Kiitoksia!



ASTORA-
RAKENNUS OY

**BILTEMA
REAL ESTATE**



Risto Ranua

risto.ranua@kauriala.fi