Palotekninen Insinööritoimisto Markku Kauriala Oy

Risto Ranua
risto.ranua@kauriala.fi

Timo Jokinen
timo.jokinen@kauriala.fi

Poikkileikkauksen lämpenemisen laskentakaavojen soveltaminen teräsrakenteiden toiminnallisessa palomitoituksessa

Markku Kauriala Ltd
Fire Engineering and Fire Safety Design Consultants ©

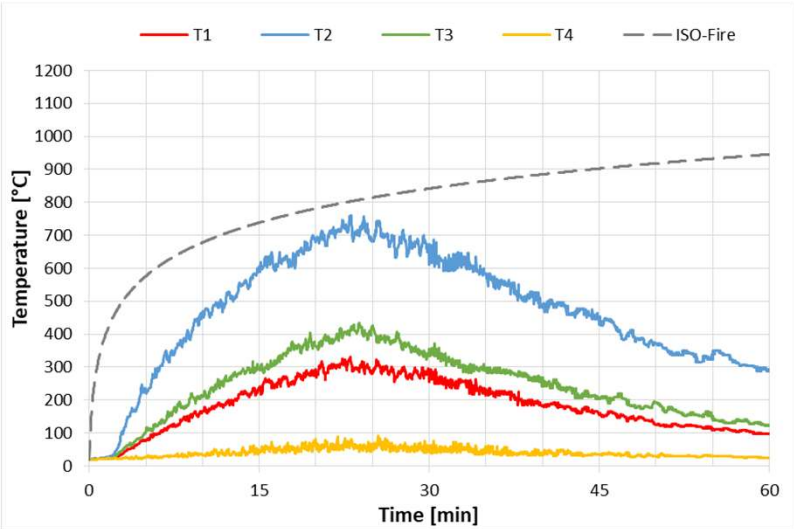
Teräsrakenteet palonkestävyyden todentaminen

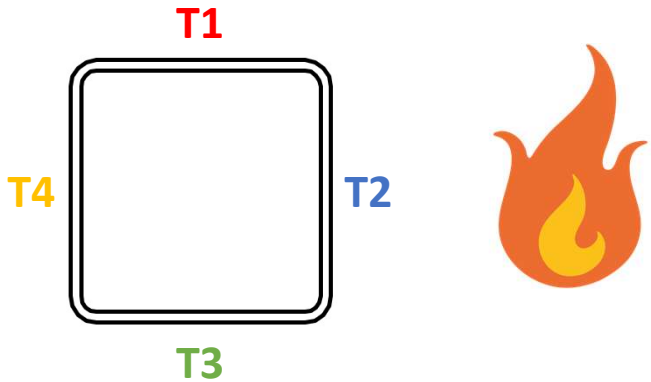
- SFS-EN 1993-1-2 kappale 4.2: Yksinkertaiset laskentamallit
  - Kriittinen lämpötila vs. poikkileikkauksen lämpötila
  - Nopeampi ja helpompi
  - Yleisesti tunnettu
  - Ei huomioi kaikkia palossa vaikuttavia ilmiöitä
  - Hyödyllinen kuitenkin ainakin kokonaiskuvan selvittämiseen ja pahimpien rakenneosien hakemiseen

- SFS-EN 1993-1-2 kappale 4.3: Kehittyneet laskentamenetelmät.
  - Esim. SAFIR
  - On mahdollista huomioida lämpölaajeneminen ja epätasaiset lämpötilakentät sekä näistä syntyvät johdannaisilmiöt
  - Työläämpi
  - Vähemmän tunnettu

Laskentaesimerkki: Teräspilari paikallisessa palossa

- Pilari, CFRHS200x200x8
- Paikallinen palo, palotehon maksimi 12,5 MW, lämpötilat palosimuloinnista
- Esitetyt lämpötilakäyrät (punainen, sininen, vihreä, keltainen) ovat adiabaattisia pintalämpötiloja (Adiabatic Surface Temperature = AST)
- Lämpötilakentät pilarin eri sivuilla hyvin eri suuruiset

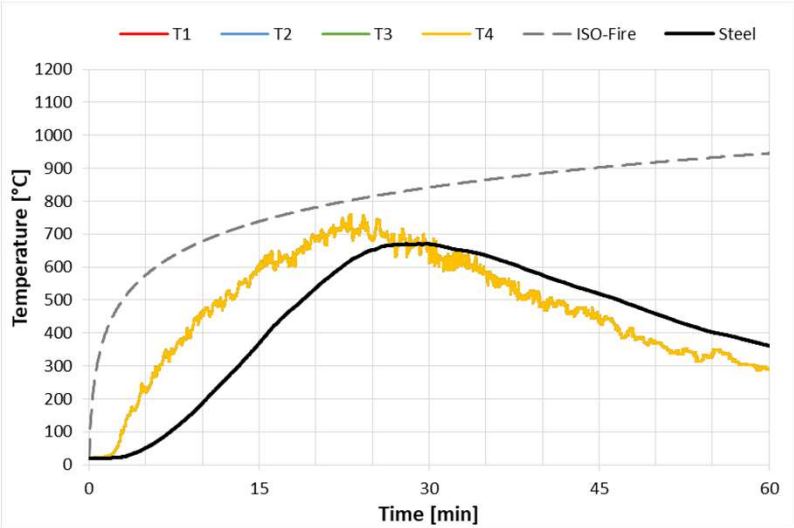


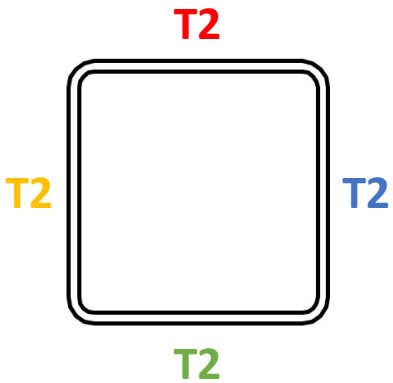


Miten lasketaan poikkileikkauksen lämpötilan kehittyminen?

Tapa 1: EC + maksimikäyrä

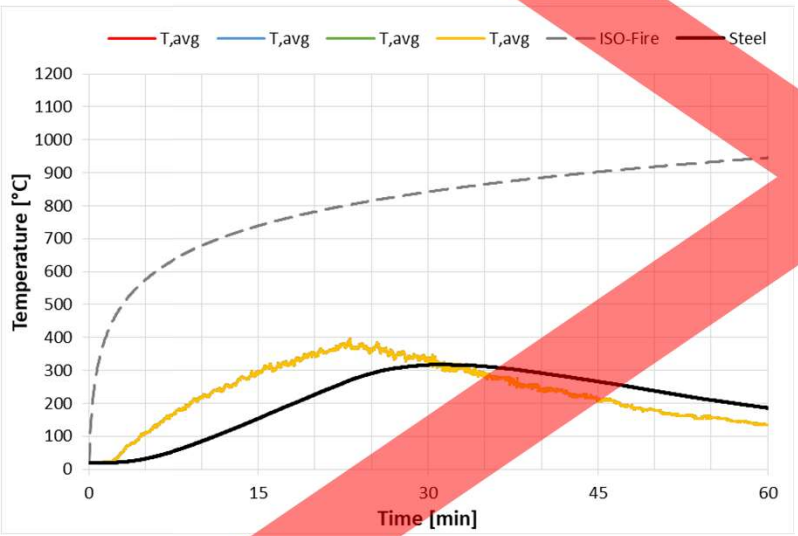
- Pilarin joka sivulle asetetaan maksimikäyrän mukainen lämpötila
- Muutoin EN 1993-1-2 mukaiset kaavat. Tulos: 670 °C
- Helppo, konservatiivinen, mutta usein liian konservatiivinen

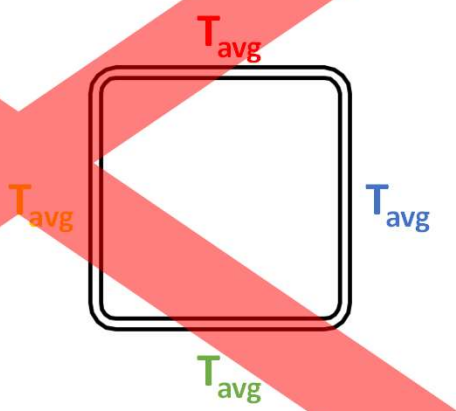




Tapa 2: EC + käyrien keskiarvo

- Lasketaan käyristä keskiarvo ja asetetaan se pilarin joka sivulle
- Esimerkin tulos: 317 °C
- Voi johtaa usein epäkonservatiivisiin tuloksiin!





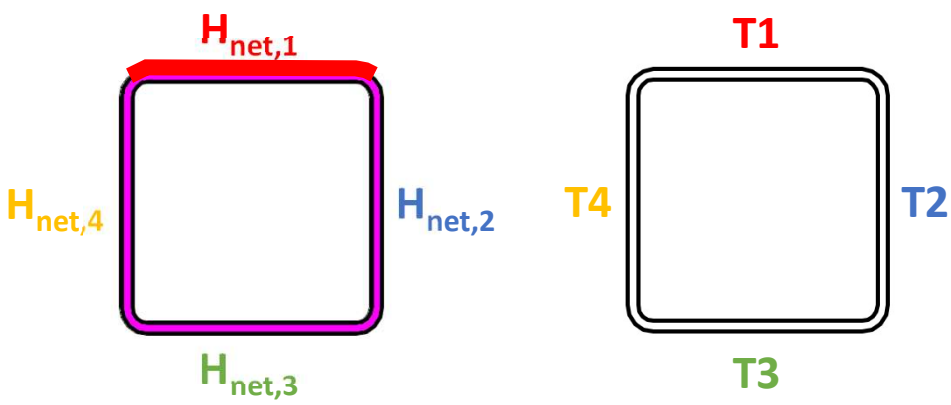
Tapa 3: EC kaavan jako poikkileikkaustekijöihin

- EN 1993-1-2 suojaamattoman teräksen lämpenemiskaavaa voidaan muokata:

$$\Delta\Theta_{a,t} = k_{sh}\frac{A_m/V}{c_a\rho_a}h_{net}\Delta t \quad \longrightarrow \quad \Delta\Theta_{a,t} = k_{sh}\frac{\Delta t}{c_a\rho_a}\sum_{k=1}^{4}\left(A_{m,k}/V\right)h_{net,k}$$

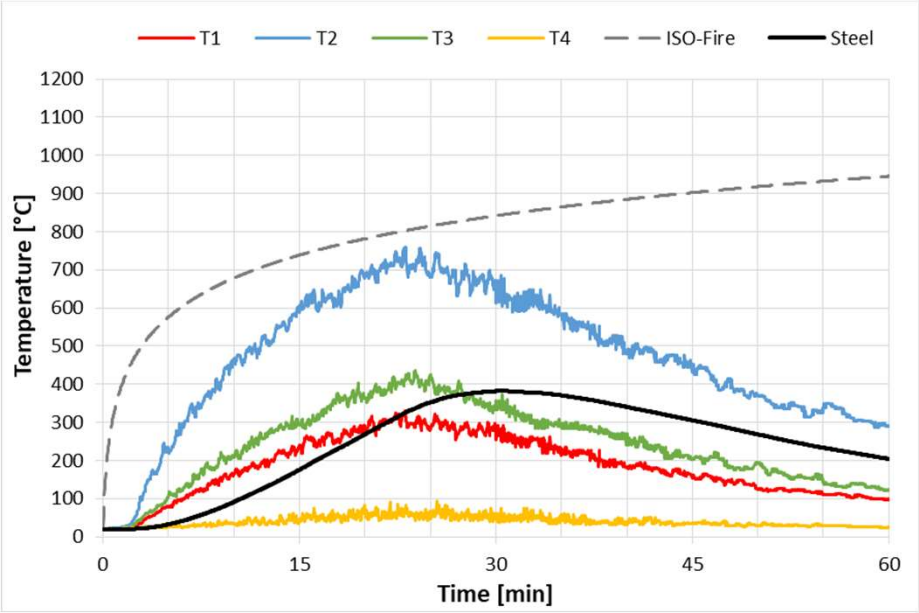
$$h_{net,k} = h_{net,c,k} + h_{net,r,k} = \alpha_c\left(\Theta_{T,k} - \Theta_m\right) + \varepsilon_m\varepsilon_f\sigma\left[\left(\Theta_{T,k} + 273°C\right)^4 - \left(\Theta_m + 273°C\right)^4\right]$$

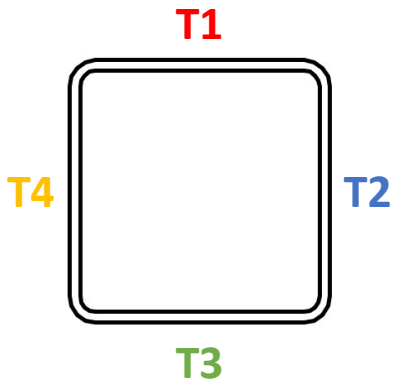
- Esim: T1:n vaikutus poikkileikkauslämpötilaan



Tapa 3: EC kaavan jako poikkileikkaustekijöihin

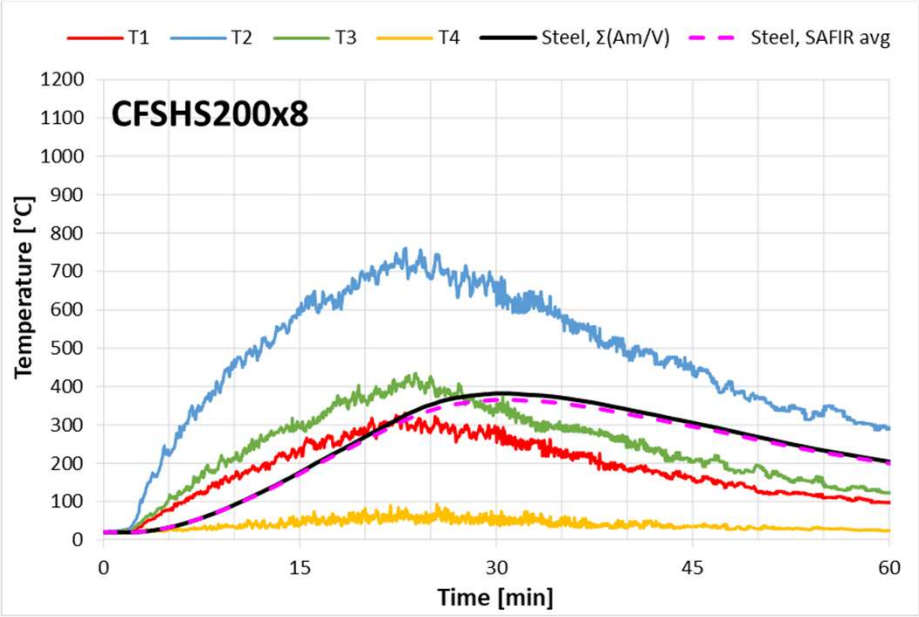
- Esimerkin tulos: 382 °C

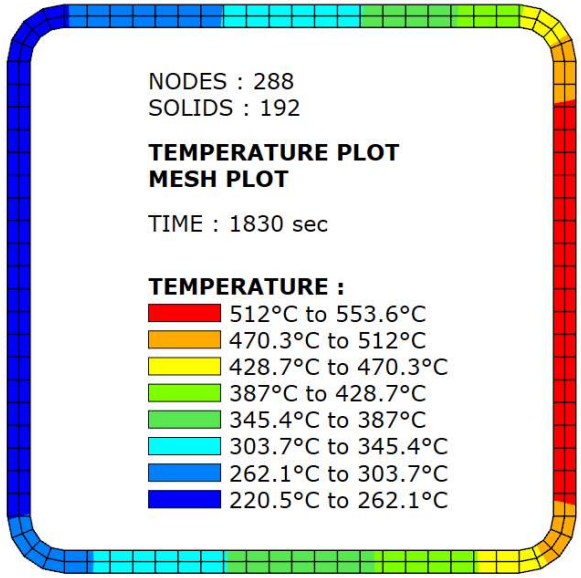




Markku Kauriala Ltd
Fire Engineering and Fire Safety Design Consultants ©

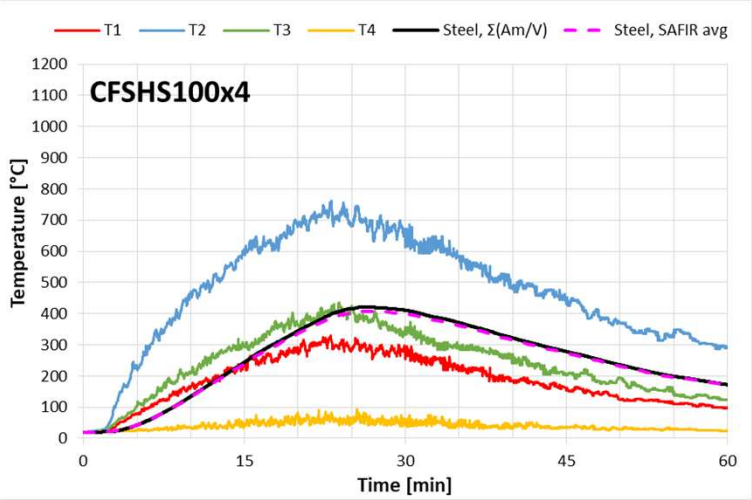
Laskentamenetelmän vertailu SAFIR mallin tuloksiin

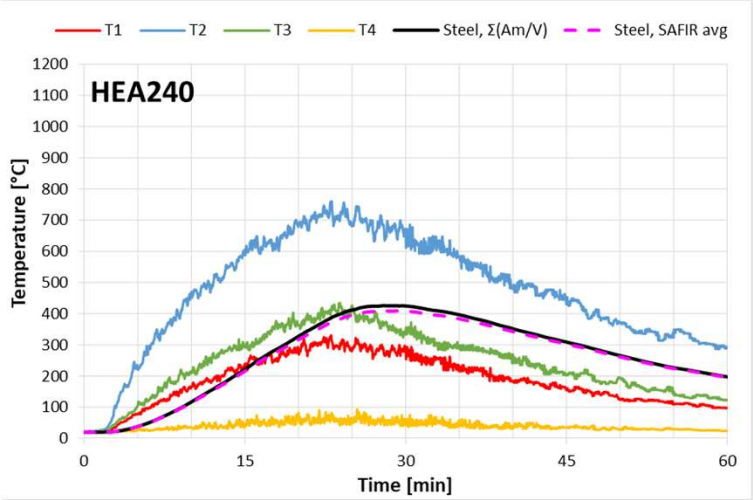


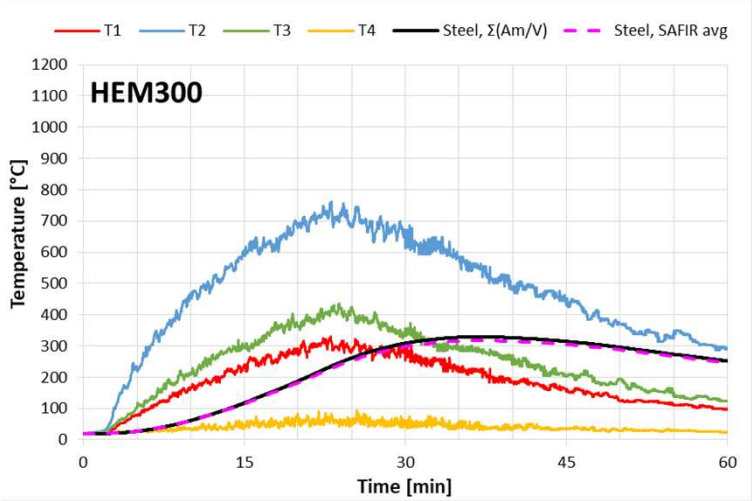


- Teräksen poikkileikkauslämpötila SAFIR-mallilla: 365 °C
- Teräksen poikkileikkauslämpötila em. laskentakaavoilla : 382 °C
- (Teräksen lämpötila laskemalla ensin neljän lämpötilan keskiarvo : 317 °C)

Laskentamenetelmän vertailu SAFIR mallin tuloksiin

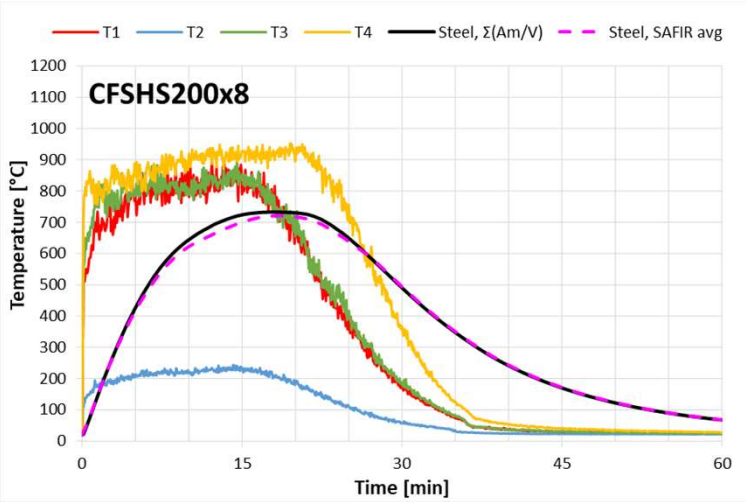


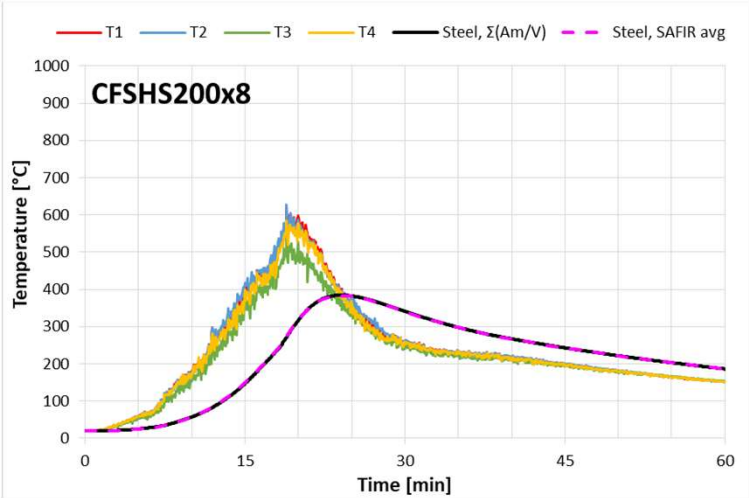


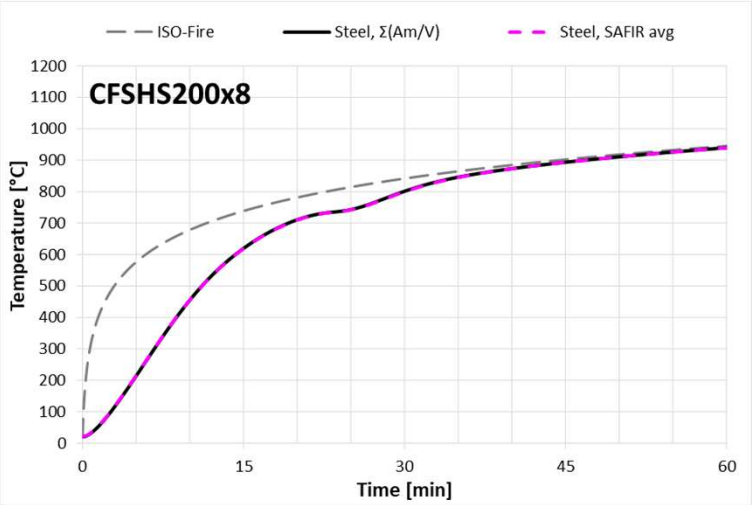


- Poikkileikkauksella ei ole merkittävää vaikutusta virheen suuruuteen

Laskentamenetelmän vertailu SAFIR mallin tuloksiin







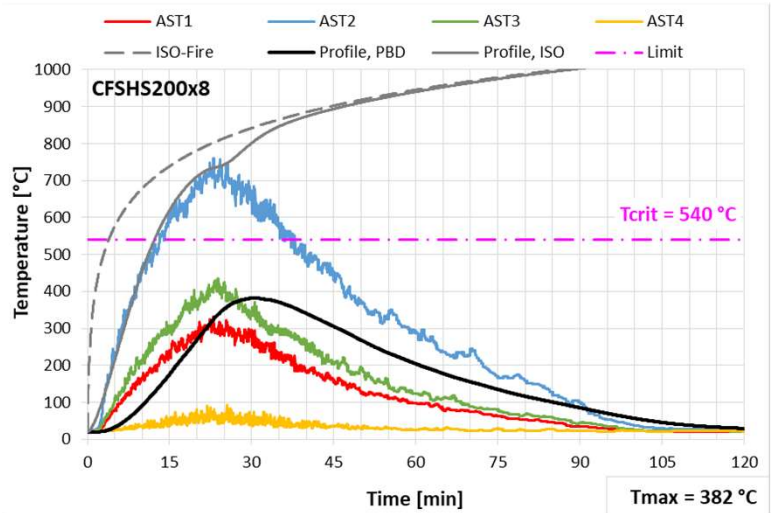
- Paloaltistuksen muodolla ei ole merkittävää vaikutusta virheen suuruuteen. Virhe on sitä pienempi, mitä lähempänä pintojen paloaltistukset ovat toisiaan

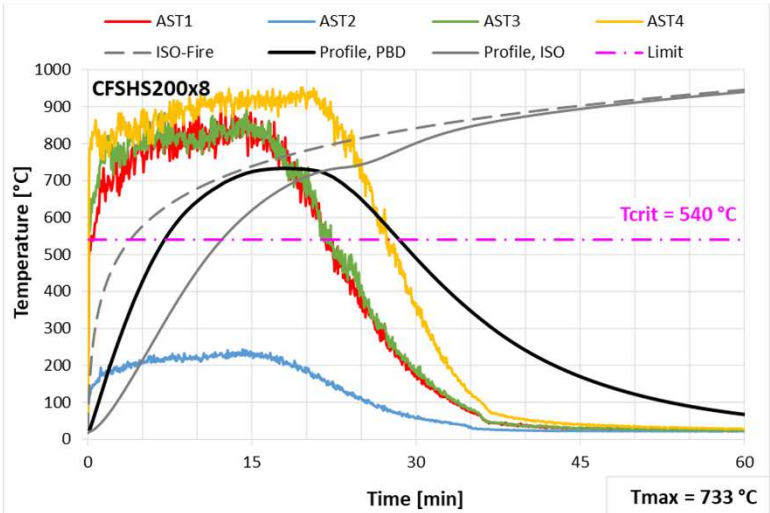
Laskentamenetelmän vertailu SAFIR mallin tuloksiin

- Esimerkkilaskelmissa muokatut laskentakaavat tuotti 0.1 - 17.1 °C kuumempia poikkileikkauslämpötiloja kuin SAFIR:lla → em. laskentakaavoilla päästään hyvin lähelle kehittyneillä menetelmiä laskettuja arvoja ja syntynyt virhe on konservatiivinen.

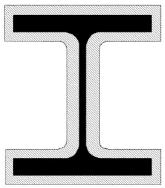
- **Jos profiilin pintoihin vaikuttavat lämpötilat eroavat toisistaan merkittävästi, olisi tilanne syytä tarkistaa joka tapauksessa kehittyneillä laskentamenetelmillä johdannaisilmiöiden vaikutuksen selvittämiseksi!**

Riittävän palosuojauksen määritys





- Kun kriittinen lämpötila ylitetään, miten voidaan määrittää riittävä palosuojauksen taso?
- Eurokoodissa on esitetty kaavat palosuojatun poikkileikkauksen lämpenemiselle:



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

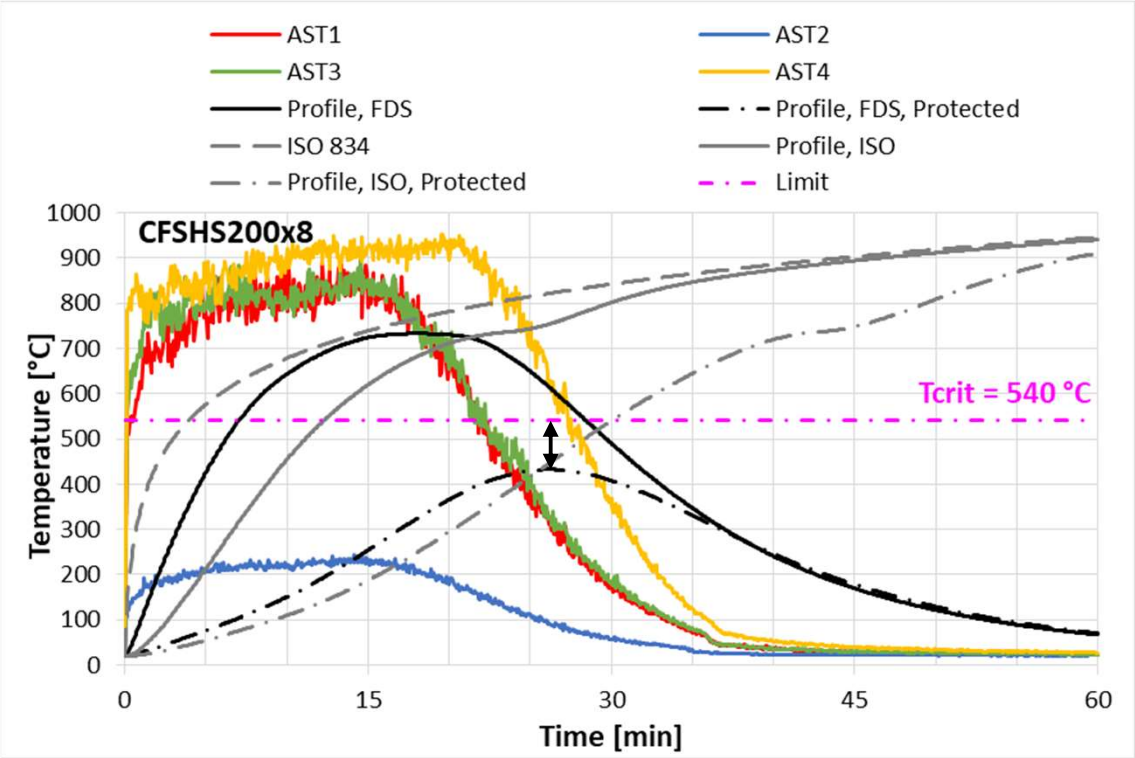
- Kaavat on tarkoitettu levy- / villasuojaukselle, mutta niillä voidaan tehdä suojausmenetelmästä riippumattomia arvioita palonkestoluokan riittävyydestä, jos tarkastelu tehdään suhteellisesti verrattuna standardipaloon

Riittävän palosuojauksen määritys

1. Lasketaan palosuojaamattoman profiilin lämpeneminen sekä mitoituspalossa, että standardipalossa.

2. Määritettään profiilin palosuojauspaksuus siten, että profiilin lämpötila standardipalossa palonkestoluokan ajanhetkellä = kriittinen lämpötila (esimerkissä R30).

3. Lasketaan profiilin lämpeneminen täysin samalla suojauksella mitoituspalon lämpötiloissa. Jos lämpötila jää alle kriittisen arvon, palonkestoluokka on riittävä.



Eli esimerkin mitoituspalo oli lievempi kuin 30 minuutin standardipalo

Riittävän palosuojauksen määritys

- Jos laskennassa halutaan huomioida eri suuruiset lämpötila-altistukset eri puolilla profiilia, tulisi kaavoja taas muokata summakaavoiksi.

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

- Muokkaaminen ei kuitenkaan ole yhtä yksikäsitteistä kuin palosuojaamattomalla profiililla.

- Menetelmä siis tuottaa vain approksimaation, mutta on käyttökelpoinen. Monia muitakin menetelmiä on olemassa vaaditun suojausluokan määrittämiseksi toiminnallisessa mitoituksessa (esim. energiakertymien vertailu integroimalla lämpövuot), mutta myös niissä on omat ongelmansa.

Kiitoksia!

Risto Ranua
risto.ranua@kauriala.fi

Timo Jokinen
timo.jokinen@kauriala.fi