

TERÄKSESTÄ VALMISTETTUJEN SUORAKAIDEPUTKI- JA I-PROFIILIEJEN PALOTEKNINEN MITOITUS

Reino Niemimaa

Rakenteiden Mekaniikka, Vol.28

No 2, 1995, s. 3-17

Tiivistelmä: Artikkelissa tehdään ehdotus nykyisin paloteknisessä mitoituksessa käytettävien kaavojen tarkentamiseksi siten, että myös lämmönsiirtyminen rakenteen pinnassa, erityisesti sen muodostuminen konvektio- ja säteilykomponenteista, tulee huomioonotetuiksi. Laskelmin osoitetaan profiilin muodon, erityisesti sen oman varjostuksen vaikutus palorasitetun profiilin kuumenemiseen. Näissä laskelmissa käytetään palolämpötilana niitä lämpötilakäyriä, joita CEN/TC 127 ehdottaa uusissa ENV-standardeissa. Artikkelissa kehitettyjen kaavojen avulla, joissa uutena tekijänä huomioidaan myös profiilin säteily- ja konvektiopintojen suhde l. varjostustekijä, voidaan tämän vaikutus ottaa huomioon. Tarkennus on merkittävä erityisesti silloin, kun profiilin oma varjostus on suuri, kuten esim. I-profiileilla, ja eristekerros joko puuttuu tai on ohut, esim. ruiskutettava kivilla tai palosuojamaali.

JOHDANTO

Nykyinen mitoituskäytäntö

Paloteknisessä mitoituksessa teräsprofiilin lämpötilan nousunopeus lasketaan yleisesti seuraavilla kaavoilla:

Suojaamaton teräsprofiili

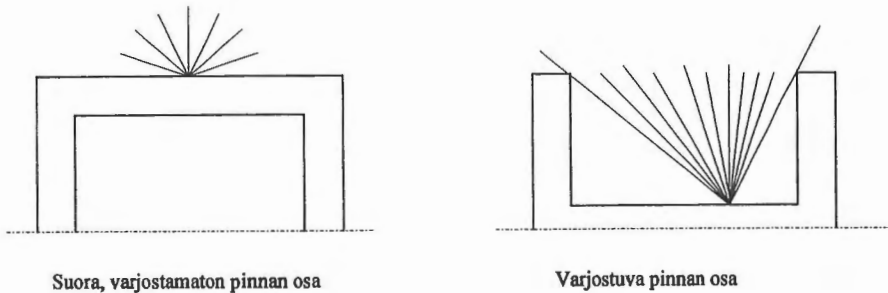
$$(1) \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{C_s \rho_s} (\alpha_c + \alpha_r) \frac{F}{V} (T_f - T_s)$$

Eristämällä suojattu teräsprofiili

$$(2a) \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_i F}{d_i V \rho_s C_s} \frac{1}{1 + \frac{\mu}{3}} (T_f - T_s) - (\varepsilon^{10} - 1) \frac{dT_f}{dt} \quad [2], [3]$$

$$(2b) \quad \frac{dT_s}{dt} = \frac{\lambda_i F}{d_i V \rho_s C_s} \frac{1}{1 + \xi} (T_f - T_s) \quad [1]$$

Kaavat (2a) ja (2b) eivät erikseen huomioi lämmön siirtymistä palotilasta eristeen pintaan, ja niiden kehittämisessä on oletettu pinnan lämmönvastus mitättömän pieneksi eristeen lämmönvastukseen verrattuna. Konvektio- ja säteilylämmön-siirtymisen suhteen voimakas muuttuminen kun siirrytään huonelämpötilasta palossa vallitseviin lämpötiloihin jää siten huomioimatta. Erityisesti profiilin varjostuminen, ja tämän mahdollinen vaikutus lopputulokseen, jää kokonaan tarkastelun ulkopuolelle. (kuva 1)



Kuva 1. Profiilin oman varjostuksen vaikutus siihen osuvaan lämpösäteilyyn

Oman varjostuksen vaikutus säteily- jakonvektiovuon suhteeseen

Säteilyn ja konvektion kautta siirtyvien lämpömäärien suhde voidaan arvioida seuraavasti:

Konvektion kautta siirtyvä lämpömäärä noudattaa kaavaa

$$(3) \quad q_c = \alpha_c (T_f - T_p)$$

ja säteilylämmönsiirtyminen yleisen säteilylain mukaisesti kaavaa

$$(4) \quad q_r = \varepsilon_r \sigma (T_{f^*} - T_{p^*})$$

Tässä on oletettu, että säteilylämpötila = palotilan kaasujen lämpötilä.

Näistä saadaan konvektio- ja säteilylämpövuon suhteeksi

$$(5) \quad \frac{q_r}{q_c} = \frac{\varepsilon_r \sigma (T_{f^*} - T_{p^*})}{\alpha_c (T_f - T_p)}$$

Merkitsemällä

$$(6) \quad T_p = T_f - \Delta T_{fp}$$

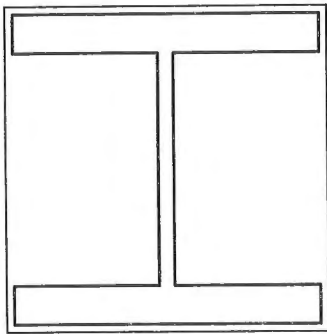
voidaan kaavaa (5) edelleen kehittää muotoon

$$(7) \quad \frac{q_r}{q_c} = \frac{\varepsilon_r \sigma}{\alpha_c} (4T_{f^*}^3 - 6T_{f^*}^2 \Delta T_{fp} + 4T_{f^*} \Delta T_{fp}^2 - \Delta T_{fp}^3)$$

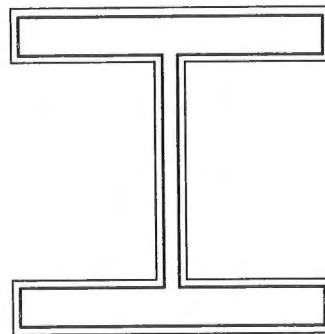
josta edelleen, jos ΔT_{fp} on pieni suhteessa T_{f^*} ään, likimääräisyhtälö

$$(8) \quad \frac{q_r}{q_c} \approx \frac{4\varepsilon_r \sigma T_{f^*}^3}{\alpha_c}$$

Säteilyn kautta profiiliin siirtyvä lämpömäärä voidaan katsoa olevan suoraan verrannollinen eristetyn profiilin ääripisteiden kautta piirretyn pinnan alaan (säteilypinta-ala, kuva 2a), ja konvektion kautta siirtyvä lämpömäärä sen palotilaa vastaan olevan pinnan alaan (konvektiopinta-ala, kuva 2b). Suurta virhettä tekemättä nämä pinta-alat voidaan korvata teräsprofiilista mitatuilla vastaavilla pinta-aloilla, ja jatkotarkasteluissa käyttää eristepaksuudesta riippumattomia profiilivakioita .



Kuva 2a. Säteilylämpenemisen
kannalta määräävä rajapinta



Kuva 2b. Konvektiolämpenemisen
kannalta määräävä rajapinta

Jos säteilylämmönsiirtyminen on huomattava konvektiolämmönsiirtymiseen verrattuna, on ilmeistä, että profiilin varjostuminen merkittävästi vaikuttaa sen kuumenemisnopeuteen, ja tulisi huomioida sekä palotestien tulosten käsittelyssä että varsinaisessa paloteknisessä mitoituksessa.

ESIMERKKILASKELMAT

Laskelmat

Säteily- ja konvektiolämmönsiirtymisen suhteen määrittämiseksi ja sen kautta profiilin varjostuksen mahdollisen merkityksen arvioimiseksi on suoritettu seuraavat laskelmat:

1. Elementtimenetelmällä laskettu pintalämpötila, kun niihin kohdistetaan ISO 834 mukainen palorasitus 30 min ajan, seuraaville profileille:

1.1 Suojaamaton profiili, $F/V = 50 \text{ l/m}$ (kuva 3)

1.2 " " $F/V = 200 \text{ l/m}$ (kuva 4)

1.3 Palosuojattu " $F/V = 50 \text{ l/m}$ (kuva 5)

Palosuojauksena 30 mm Limpet GP ruiskutettava paloeriste.

2. Näiden pintalämpötilojen avulla laskettu säteily- ja konvektiovuon suhde (kuvat 6...8)

3. Säteily- ja konvektiovuon suhde, laskettuna likimääräiskaavasta (8), kun palolämpötila noudattaa:

standardipalokäyriä

ISO 834 (kuva 9)

ENV YYY5-3, hydro-carbon curve (kuva 10)

ENV YYY5-3, external fire (kuva 11)

RakMK B7 mukaista parametristä paloa, parametrijhdistelmälle:

Palokuorma 400 MJ/m^2

k1 1

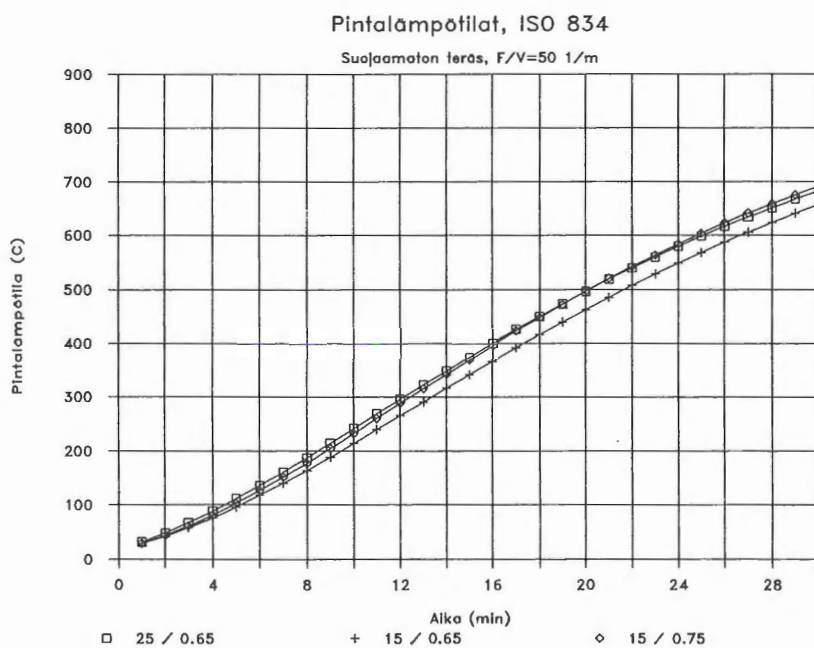
k2 1

(kuva 12)

Lämmönsiirtymiskertoimen (α_k) ja resultoivan säteilyemissiokertoimen (ε_r) mahdollisen vaikutuksen arvioimiseksi on kaikki laskelmat suoritettu α_k :n ja ε_r :n yhdistelmille

	α_k	ε_r
1	25	0.65
2	15	0.65
3	15	0.75

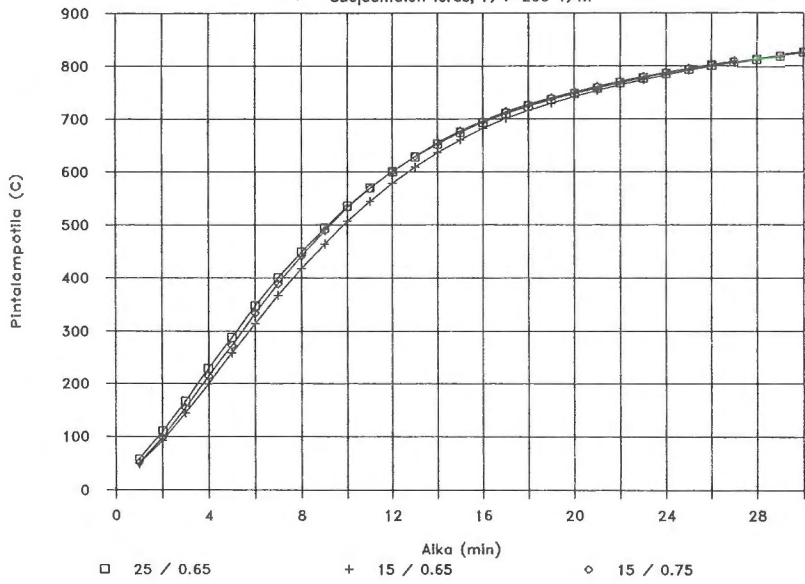
Tuloksista on tehtävissä johtopäätös, että varjostus on paloteknisissä laskelmissa huomioitava. Tulokset voivat antaa viitteen yhdelle selitykselle sille palotesteissä havaitulle ilmiölle, että palosuojamaalilla suojatut suorakaideputket kuumenevat nopeammin kuin vastaavan profiilisuhteen omaavat I-profiilit. I-profiilin oman varjostuksen takia niihin osuva säteilyteho on profiilisuhteen laskennassa käytettyä pinta-alayksikköä kohti 30...40 % pienempi kuin suorakaideputkilla.



Kuva 3

Pintalämpötilat, ISO 834

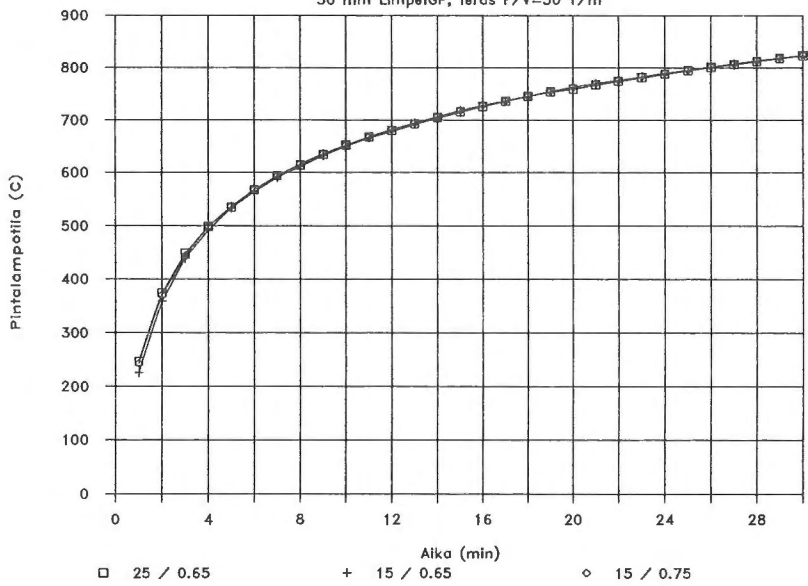
Suojaamaton teräs, F/V=200 1/m



Kuva 4

Pintalämpötilat, ISO 834

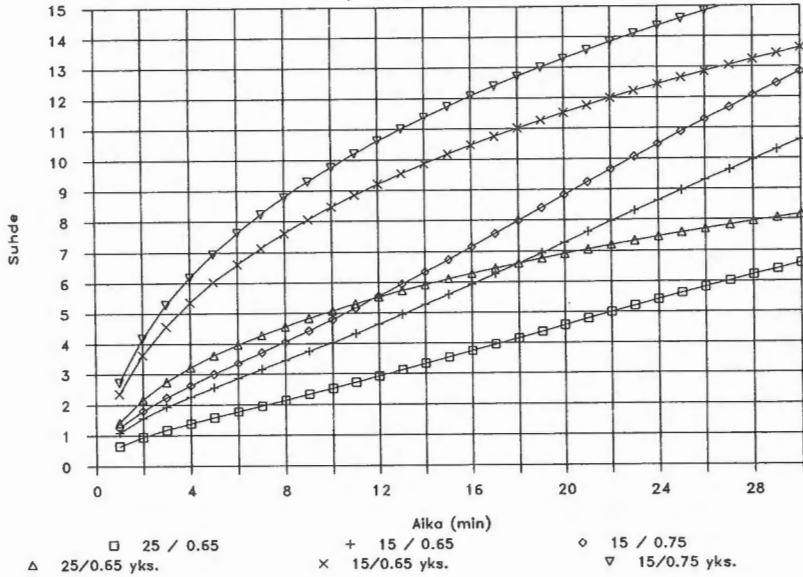
30 mm LimpelGP, teräs F/V=50 1/m



Kuva 5

Säteily- / konvektiovuo, ISO 834

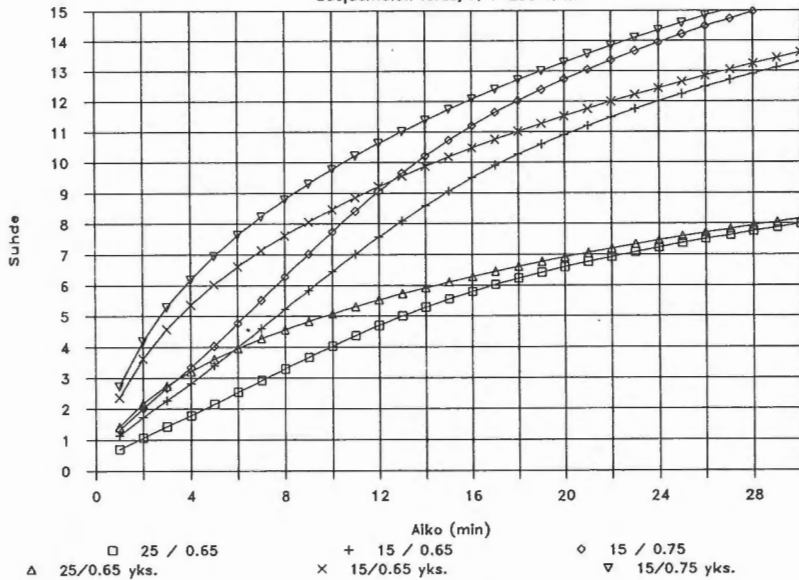
Suojaamaton teräs, $F/V=50$ l/m



Kuva 6

Säteily- / konvektiovuo, ISO 834

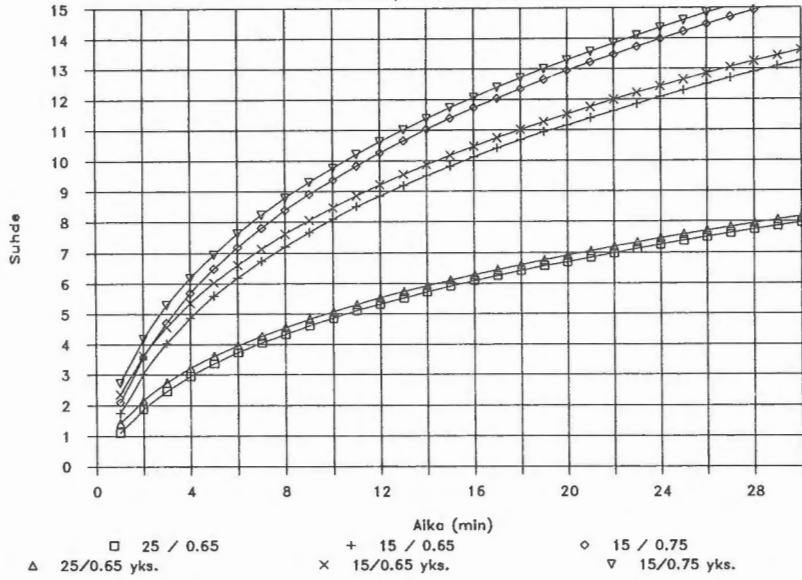
Suojaamaton teräs, $F/V=200$ l/m



Kuva 7

Säteily- / konvektiovo, ISO 834

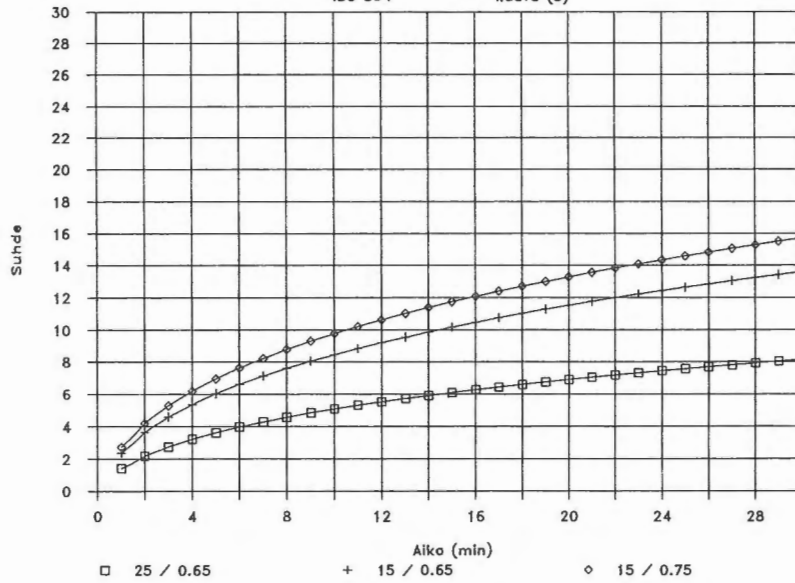
30 mm LimpelGP, Ieräs F/V=50 1/m



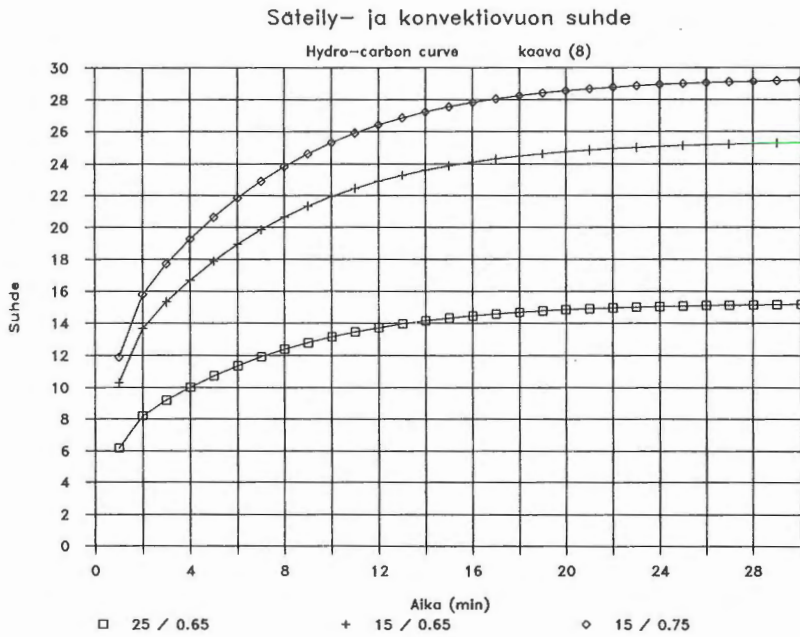
Kuva 8

Säteily- ja konvektiovo, ISO 834

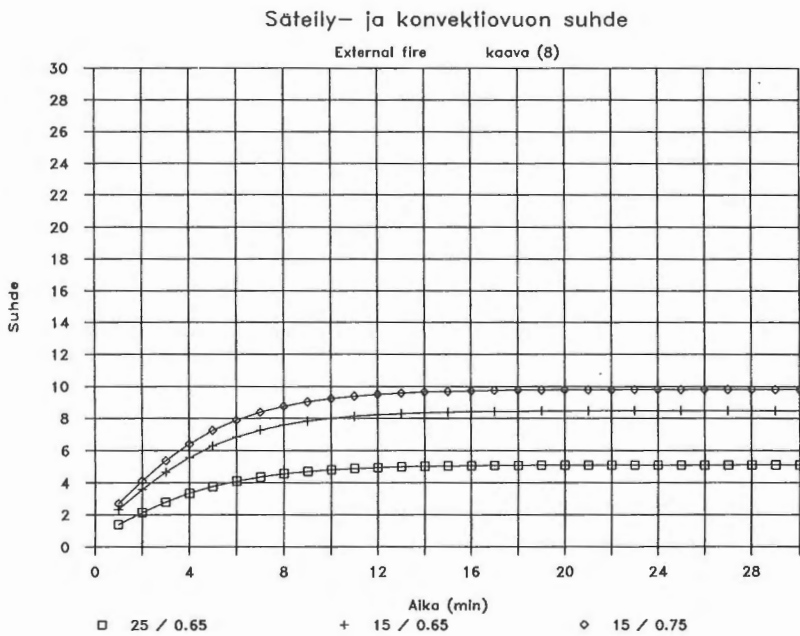
ISO 834 kaava (8)



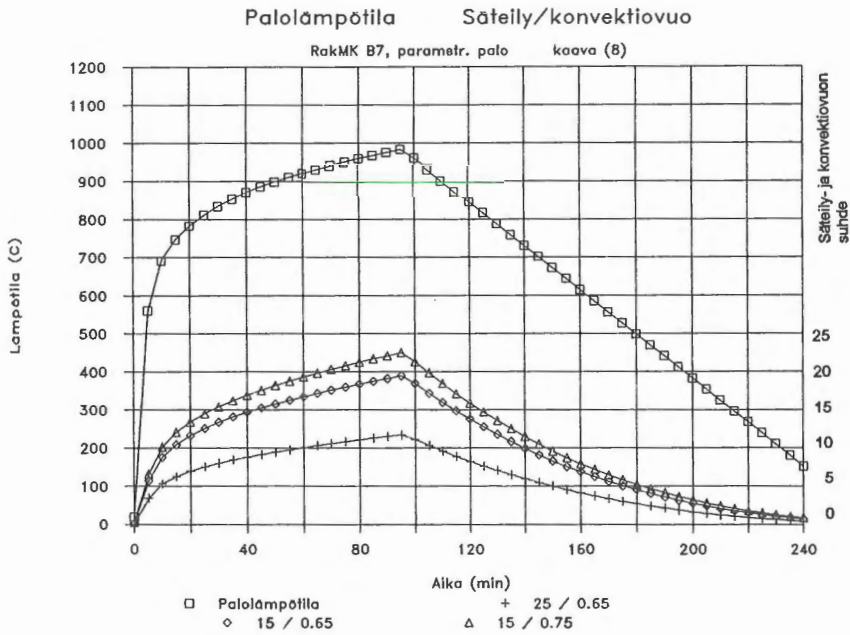
Kuva 9



Kuva 10



Kuva 11



Kuva 12

Kaavakehitys

Edelläesitetyt tulokset antavat aiheen seuraavaan kaavakehitelmään:

Rakenteen pinta-alayksikköä aikayksikössä säteilynä tulevaa energiaa kuvaa yhtälö

$$(9) \quad q_r F_r = \varepsilon_r \sigma (T_{f^4} - T_{p^4}) F_r \approx 4 \varepsilon_r \sigma T_{f^3} (T_f - T_p) F_r = F_r \alpha_r (T_f - T_p)$$

konvektiona tulevaa energiaa yhtälö

$$(10) \quad q_c F_c = F_c \alpha_c (T_f - T_p)$$

ja eristeen läpi kulkevaa energiaa yhtälö

$$(11) \quad q_i F_i = F_i \frac{\lambda_i}{d_i} (T_p - T_s)$$

Tasapainoehdosta

$$(12) \quad q_r F_r + q_c F_c = q_i F_i$$

saadaan, kun merkitään

$$(13) \quad F_i = F_c$$

$$(14) \quad \frac{F_r}{F_c} = m \quad \text{ja}$$

$$(15) \quad \frac{\lambda_i}{d_i} = U_i$$

$$(16) \quad (\alpha_c + m\alpha_r)(T_f - T_p) = U_i(T_p - T_s)$$

josta edelleen

$$(17) \quad T_p = \frac{(\alpha_c + m\alpha_r)T_f + U_i T_s}{\alpha_c + m\alpha_r + U_i} \quad \text{ja edelleen}$$

$$(18) \quad T_f - T_p = \frac{U_i}{\alpha_c + m\alpha_r + U_i} (T_f - T_s) T_f - T_s = \frac{U_i}{\alpha_c + m\alpha_r + U_i} (T_f - T_s)$$

$$(19) \quad T_p - T_s = \frac{\alpha_c + m\alpha_r}{\alpha_c + m\alpha_r + U_i} (T_f - T_s)$$

Teräksen lämpötilan nousu ajassa t voidaan laskea tasapainoehdosta

$$(20) \quad (q_r F_r + q_c F_c) \Delta t = q_i F_i \Delta t = c_s \sigma_s V \Delta T_s$$

Sijoittamalla $q_r F_r$ ja $q_c F_c$ kaavoista (9) ja (10), tai $q_i F_i$ kaavasta (11), ja ratkaisemalla ΔT_s :n suhteen, saadaan

$$(21a) \quad \Delta T_s = \frac{U_i F}{c_s \rho_s V} \frac{\alpha_c + m\alpha_r}{\alpha_c + m\alpha_r + U_i} (T_f - T_s) \Delta t$$

$$(21b) \quad \Delta T_s = \frac{\lambda_i F}{c_s \rho_s d_i V} \frac{\alpha_c + m\alpha_r}{\alpha_c + m\alpha_r + U_i} (T_f - T_s) \Delta t$$

Jos näihin sijoitetaan $d_i=0$ (suojaamaton teräs), kaavat pelkistyvät muotoon

$$(22) \quad \Delta T_s = \frac{1}{c_s \rho_s V} F (\alpha_c + m\alpha_r) (T_f - T_p) \Delta t$$

ja jos niihin sijoitetaan $(\alpha_c + m\alpha_r) = \infty$ ääretön, i. pintavastus eristeen palonpuoleisessa pinnassa jätetään huomioimatta, muotoon

$$(23a) \quad \Delta T_s = \frac{U_i F}{c_s \rho_s V} (T_f - T_p) \Delta t$$

$$(23b) \quad \Delta T_s = \frac{\lambda_i F}{c_s \rho_s d_i V} (T_f - T_p) \Delta t$$

Kaavoissa esiintyvälle säteilylämmönsiirtymiskertoimelle α_r voidaan kehittää lauseet

$$(24) \quad \alpha_r = \varepsilon_r \sigma \frac{(T_f^4 - T_p^4)}{(T_f - T_p)} \quad (\text{tarkka lauseke})$$

tai

$$(25) \quad \alpha_r \approx 4\varepsilon_r \sigma T_f^3 \quad (\text{liikarvolauseke, kun } T_p \sim T_f)$$

Kaava (22) on identtinen yleisesti käytetyn suojaamatonta terästä koskevan lämpötilan nousun laskentakaavan kanssa, kun $m=1$ l. profiilin omaa varjostusta ei huomioida, ja kaavat (23a) ja (23b) identtiset lämmöneristeellä suojatun teräksen vastaavan kaavan kanssa, kun (ilmeisen turha) korjaustekijä $(\varepsilon^{m/10} - 1)(dT/dt)$ jätetään huomioimatta.

Eristeen lämpökapasiteetti on kaavoissa (21a) ja (21b) jätetty huomioonottamatta. Tästä syntyvä virhe on, kun eriste on ohut tai suojaus tehdään maalilla, kuitenkin vähäinen. Paksujen tai suuren lämpökapasiteetin omaavien eristeiden mitoituksessa luonnollinen tapa huomioida tämä lämpökapasiteetti on lisätä sauvan lämpökapasiteettia huomioivaan tekijään $(c_s \rho_s V)$ eristeen lämpökapasiteetti $c_i \rho_i A_i d_i$, mahdollisesti korjauskertoimella korjattuna, eli sijoittaa kaavoihin (21a) ja (21b) lauseen $(c_s \rho_s V)$ tilalle lause $(c_s \rho_s V + k c_i \rho_i A_i d_i)$

Lähteet:

- [1] Suomen Rakentamismääräyskokoelma, osa B7, Teräsrakenteet. Ohjeet 1988
- [2] NT Fire 021, Insulation of steel structures: Fire protection. 1985
- [3] doc CEN/TC 127N 738: Draft ENV YYY4 Part 3: 1994. Fire tests on elements of building construction. Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural elements: By applied protection to steel structural elements.
- [4] ISO 834, Fire resistance tests - elements of building construction
- [5] doc CEN/TC 127 N 437: prEN YYY1-2. Fire tests for building element and components - Fire resistance testning. Part 2, Alternative heating conditions and qualifying procedures to be adopted under special circumstances.

Käytetyt symbolit:

c_i	eristeen ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
c_s	teräksen ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
d_i	palosuojauseristeen paksuus	[m]
F	profiilin ulkopinnan ala pituusyksikköä kohti	[m ²]
F_c	profiilin konvektiopinta-ala	[m ²]
F_r	profiilin säteilypinta-ala	[m ²]
m	profiilin varjostuskerroin	[]
q_c	konvektiolämpövuoto palotilasta rakenteen pintaan	[W/m ²]
q_r	säteilylämpövuoto palotilasta rakenteen pintaan	[W/m ²]
T_f	palotilan lämpötila	[K]
T_p	rakenteen palotilaa vastaan olevan pinnan lämpötila	[K]
T_s	teräksen lämpötila	[K]
t	aika	[s]
ΔT_f	palotilan lämpötilan muutos	[K]
ΔT_s	teräksen lämpötilan muutos	[K]
ΔT_{fp}	lämpötilaero palotilan ja rakenteen pinnan välillä	[K]
t	aika-askeleen pituus	[s]
U_i	palosuojauskerroin	[W/m ² K]
V	profiilin tilavuus pituusyksikköä kohti	[m]
α_c	konvektiolämmönsiirtymiskerroin	[W/m ² K]
α_r	säteilylämmönsiirtymiskerroin	[W/m ² K]
ε_r	resultoiva säteilyemissio	[]
λ_i	palosuojauskerroin	[W/mK]
μ	eristeen ja teräksen ominaislämpökapasiteetin suhde	
ρ_i	eristeen tilavuuspaino	[kg/m ³]
ρ_s	teräksen tilavuuspaino	[kg/m ³]
ξ	eristeen lämpökapasiteetin huomioiva tekijä	[]
σ	Stefan-Boltzmanin vakio,	5,67*10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴

Reino Niemimaa, DI
Ins.tsto Reino Niemimaa
Consulting Engineers
FIN-03100 Nummela