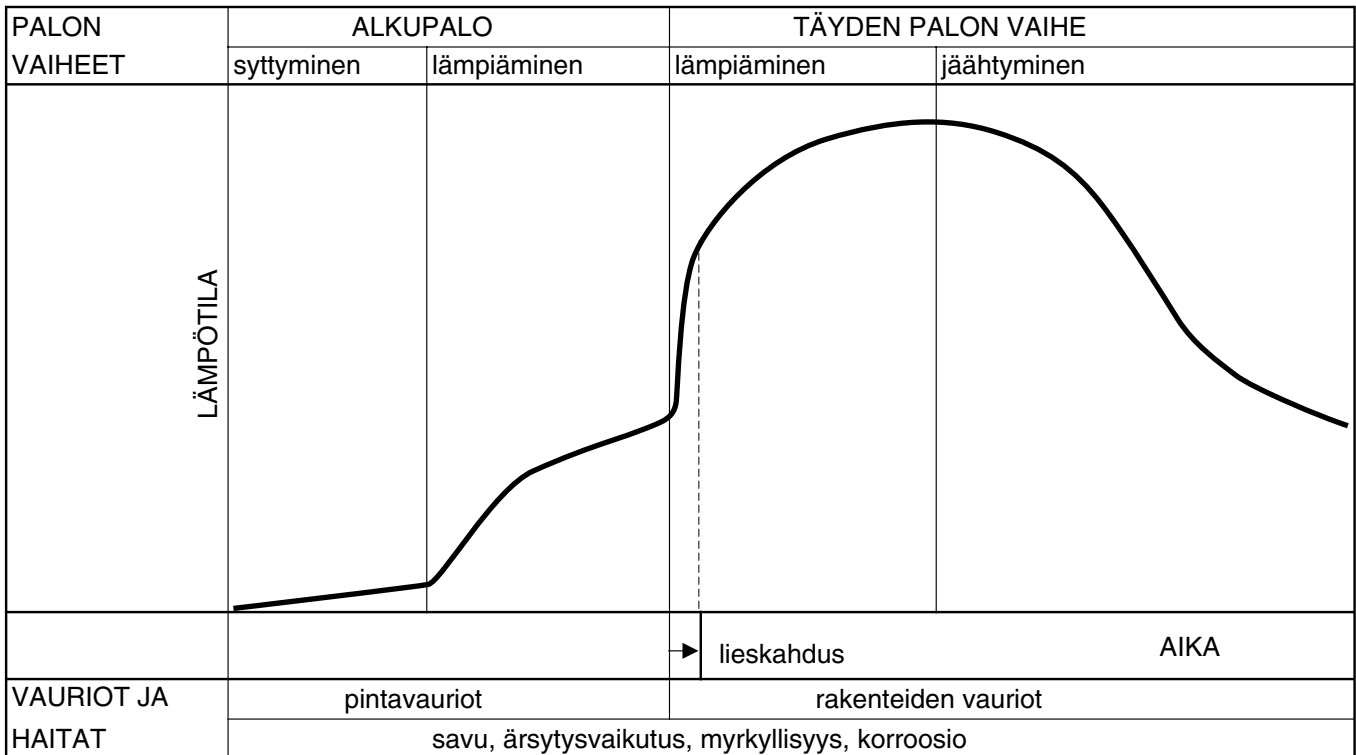


## 5. HITSATUN PROFIILIN PALOMITOITUS

### 5.1 Palotilan lämmönkehitys

Todellisen tulipalon lämpötilan muuttuminen voidaan esittää kuvan 5.1 mukaisesti, kun tulipalo saa kehittyä vapaasti. Palon vaiheiden pituudet eivät ole oikeassa suhteessa toisiinsa nähden, vaan ne voivat vaihdella huomattavasti. Palotilan palavat materiaalit syttyvät palamaan lieskahdusvaiheessa, kun palotilan lämpötila on n. 350-550 °C. Täyden palon aikana palotilan lämpötila voi olla yli 1000 °C [3].



**Kuva 5.1** Todellisen palon vaiheet ja palotilan lämpötilan muuttuminen [1]

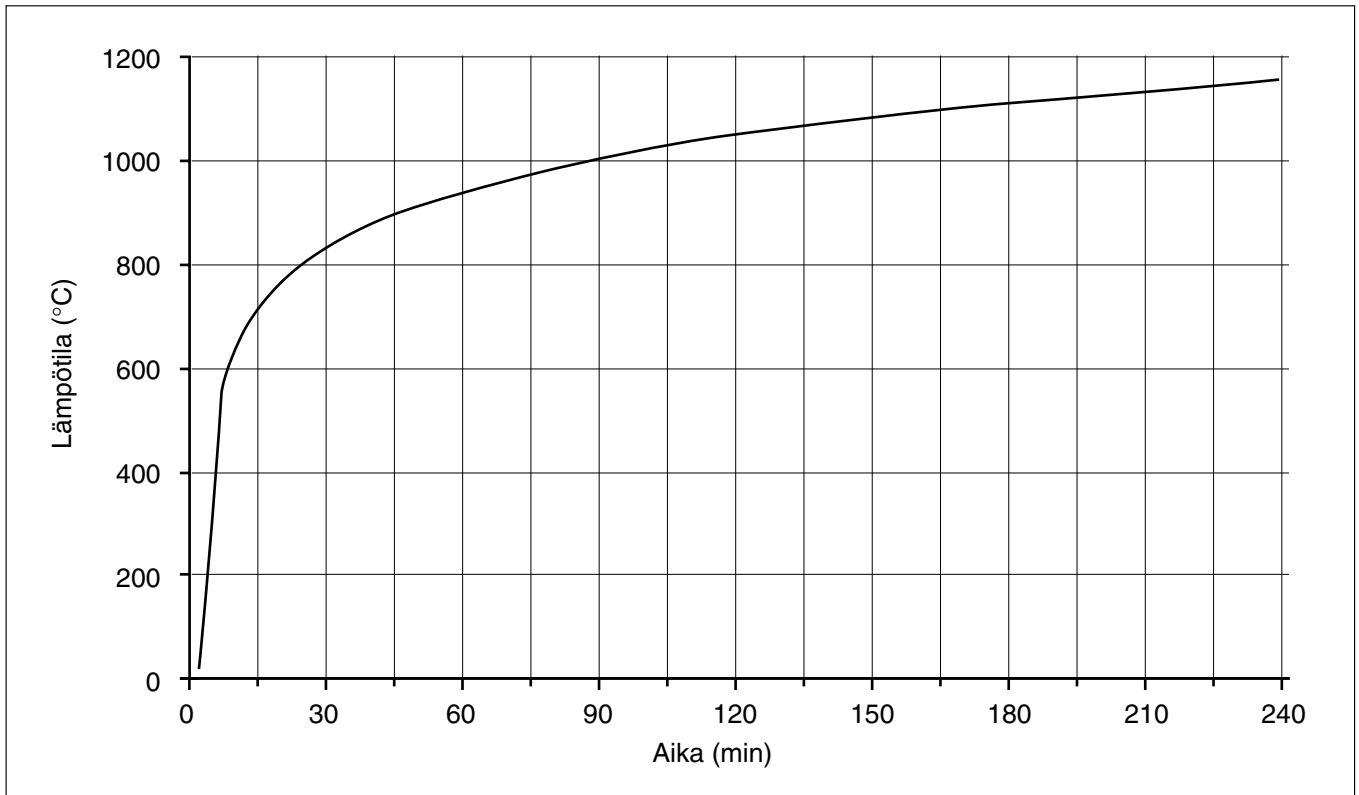
Palotilan lämmönkehitystä palomitoituksessa voidaan kuvata joko nimellisillä lämpötila-aikakäyrillä, jotka on määritelty tietyille ajanjaksoille tai parametrisilla lämpötila-aikakäyrillä, jotka laskeetaan fysikaalisten vakioiden perusteella [2].

#### 5.1.1 Standardipalo

Kuvassa 5.2 esitetään yleisesti käytetty standardi lämpötila-aikakäyrä. Siinä lämpötila muuttuu ISO-834 standardin mukaan seuraavasti [2]:

$$\theta_g = 20 + 345 \lg(8t + 1) \quad (5.1)$$

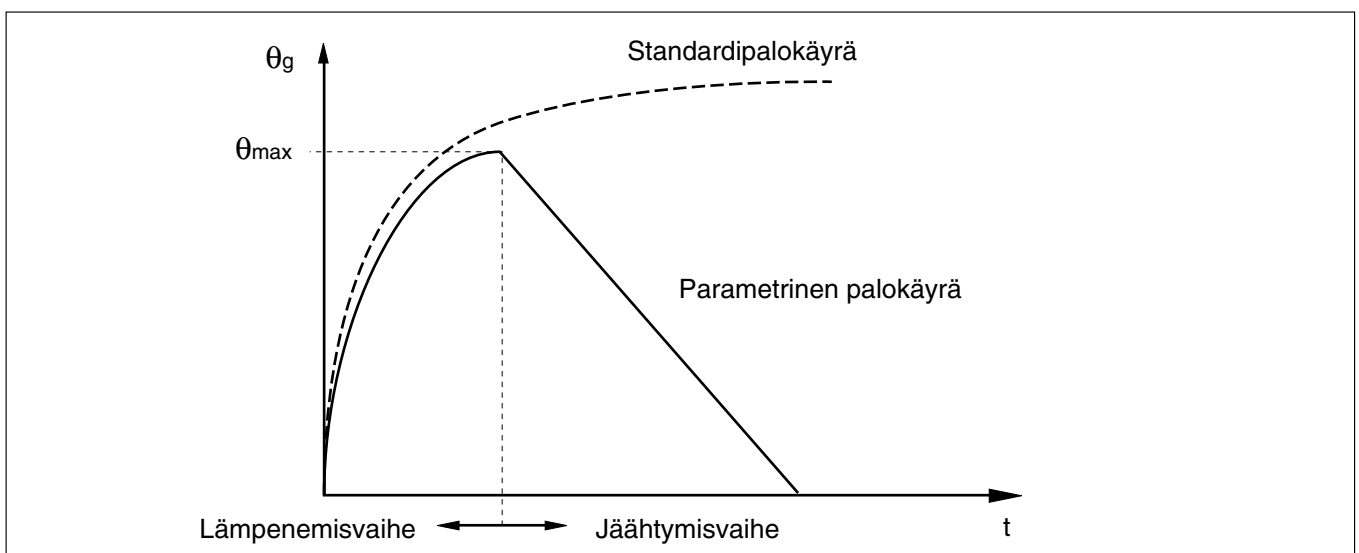
missä  $\theta_g$  on kaasun lämpötila palo-osastossa (°C)  
 $t$  on aika (min).



**Kuva 5.2** ISO-834 -standardin mukainen lämpötila-aikakäyrä

### 5.1.2 Parametrinen palomalli

Parametrinen palomalli voidaan käyttää lähteessä [2] esitetyllä tavalla kansallisten soveltamissuhteiden mukaan. Se soveltuu korkeintaan 100 m<sup>2</sup> kokoisiin palo-osastoihin, joiden katossa ei ole aukkoja ja joiden korkeus ei ole yli 4 m. Parametriseen lämpötila-aikakäyrään vaikuttavat ajan lisäksi palokuorma, palonaikaiset aukot ja ympäröivien rakenteiden termiset ominaisuudet (esim. seinien lämmönjohtavuus) [1]. Myös jäähtymisvaiheen lämpötilan aleneminen otetaan huomioon, jos vaadittu palonkestoaika on laskennallista palamisaikaa pitempi. Standardipalokäyrän ja parametrin palokäyrän välinen ero esitetään kuvassa 5.3.

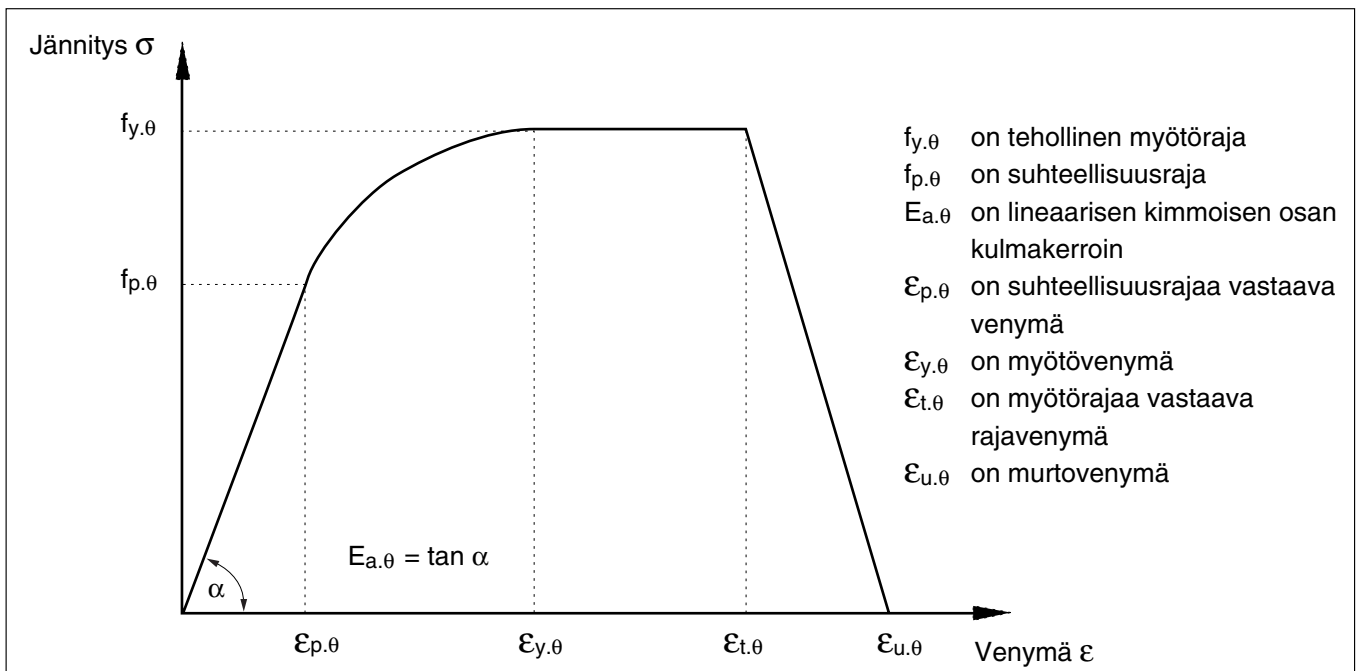


**Kuva 5.3** Standardipalon ja parametrin palon lämpötila-aikakäyrä

## 5.2 Teräksen lujuus ja kimmokerroin palotilanteessa

Teräksen lujuus ja kimmokerroin pienenevät, kun lämpötila nousee. Lisäksi teräksen koko poikileikkaus kuumenee palon aikana. Tavallisesti teräsrakenteet on suojattava tulipaloa vastaan tai on osoitettava laskennallisesti, että rakenteet kestävät vaaditun ajan suojaamatta.

Teräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa esitetään kuvassa 5.4. Teräkselle on määritelty kolme pienennyskerrointa suhteessa myötörajaan. Kertoimen  $k_{p,\theta}$  avulla saadaan määriteltyä suhteellisuusraja. Suhteellisuusrajaa suuremmilla jännityksen arvoilla teräkseen jää pysyvä muodonmuutos. Laskelmissa käytettävä tehollinen myötöraja saadaan kertoimen  $k_{y,\theta}$  avulla. Tehollinen myötöraja vastaa muodonmuutosta  $\epsilon_{y,\theta} = 0,02$ . Muunnettua pienennyskerrointa  $k_{x,\theta}$  käytetään laskelmissa silloin, kun tarkasteltavan rakenteen muodonmuutos on otettava huomioon. Kertoimen  $k_{E,\theta}$  avulla saadaan palonaikainen kimmokerroin.

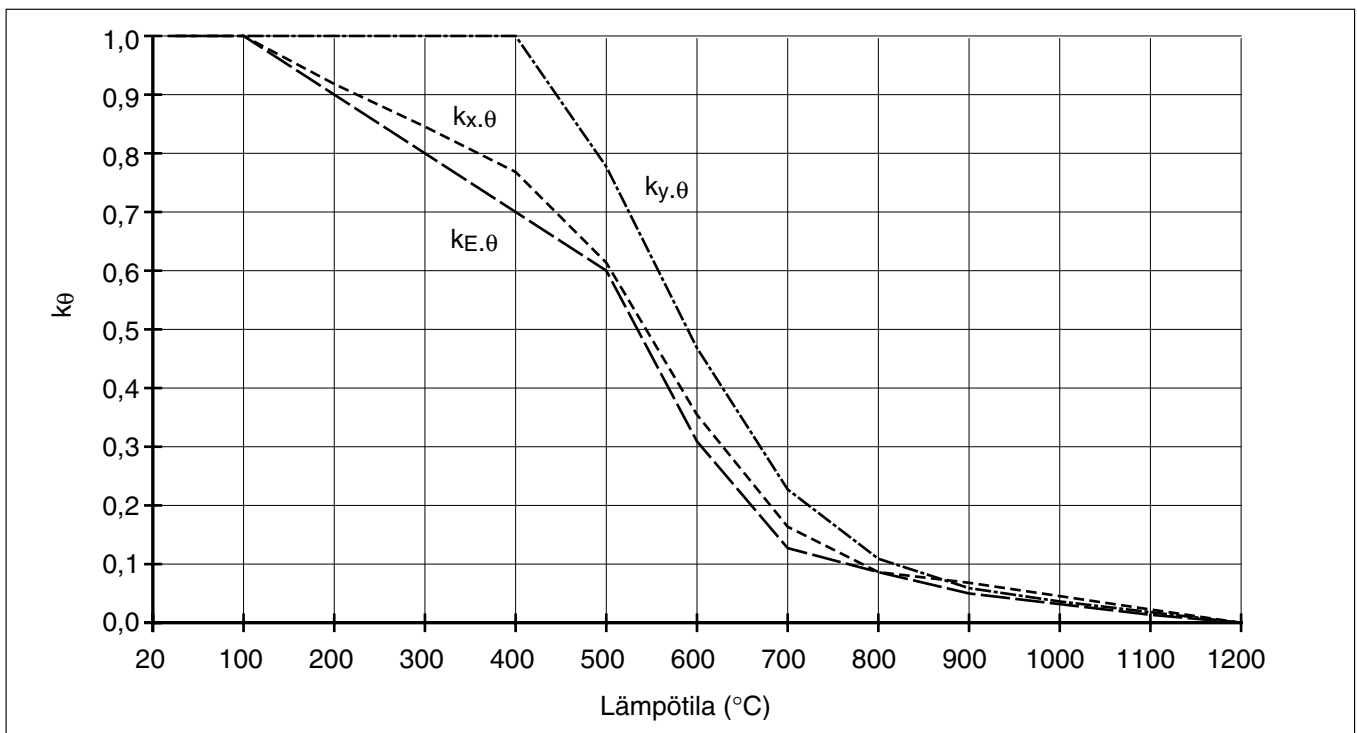


**Kuva 5.4** Teräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa [4]

Lämpötilan vaikutus pienennyskerroimiin esitetään taulukossa 5.1 ja kuvassa 5.5. Lämpötilojen väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti. Kuvasta 5.5 nähdään, että teräksen lujuus pienenee, kun lämpötila ylittää 400 °C. Sen sijaan teräksen kimmokerroin pienenee jo siinä vaiheessa, kun lämpötila ylittää 100 °C.

**Taulukko 5.1** Lämpötilan vaikutus teräksen lujuuteen ja kimmokertoimeen [4]

$\theta_a$ (°C)	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{x,\theta} = f_{x,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,922	0,900
300	1,000	0,845	0,800
400	1,000	0,770	0,700
500	0,780	0,615	0,600
600	0,470	0,354	0,310
700	0,230	0,167	0,130
800	0,110	0,087	0,090
900	0,060	0,051	0,0675
1000	0,040	0,034	0,0450
1100	0,020	0,017	0,0225
1200	0,000	0,000	0,000

**Kuva 5.5** Teräksen lujuuden ja kimmokertoimen pienennyskertoimet lämpötilan funktiona

### 5.3 Teräksen lämpötilan kehittyminen

Palon aikana lämpö voi siirtyä palotilasta teräsrakenteeseen säteilemällä, johtumalla tai kuljetumalla. Lämpötilannousuun vaikuttavat mm. palotilan lämpötilankehitys, teräsosan poikkileikkaustekijä (ks. 5.3.3) ja palosuojaus [1]. Myös poikkileikkauksen muoto vaikuttaa oleellisesti poikkileikkauksen lämmönkehitykseen. Ohutuumaisen palkin uuma voi lämmitä palotilanteessa huomattavasti nopeammin kuin laipat. Tällöin poikkileikkauksen taivutuskestävyys palotilanteessa voi olla riittävä, vaikka leikkauskestävyys ylittyisi. Eurocode 3:n osa 1-2 ei anna ohjeita kyseisen poikkileikkauksen lämpötilan kehityksen laskemiseksi.

### 5.3.1 Suojaamaton teräsrakenne

Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan muutos lasketaan seuraavasti [4]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a\rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (5.2)$$

- missä  $A_m/V$  on suojaamattoman terässauvan poikkileikkaustekijä ( $m^{-1}$ ), vähintään  $10 m^{-1}$   
 $A_m$  on sauvan palolle altis pinta-ala pituusyksikköä kohti ( $m^2/m$ )  
 $V$  on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti ( $m^3/m$ )  
 $c_a$  on teräksen ominaislämpö ( $J/kgK$ )  
 $\dot{h}_{net,d}$  on pinta-alayksikköä kohti laskettu nettolämpövuon laskenta-arvo ( $W/m^2$ )  
 $\Delta t$  on aikaväli (s), korkeintaan 5 s  
 $\rho_a$  on teräksen tiheys,  $\rho_a = 7850 kg/m^3$ .

Nettolämpövuon laskenta-arvo [2]:

$$\dot{h}_{net,d} = \gamma_{n,c} \dot{h}_{net,c} + \gamma_{n,r} \dot{h}_{net,r} \quad (5.3)$$

- missä  $\gamma_{n,c}$  on kerroin, joka ottaa huomioon eri maissa tehtävien kokeiden erot  
Eurocode 1, osa 2-2:  $\gamma_{n,c} = 1,0$   
 $\dot{h}_{net,c}$  on kuljettumisen nettolämpövirta ( $W/m^2$ )  
 $\gamma_{n,r}$  on kerroin, joka ottaa huomioon eri maissa tehtävien kokeiden erot  
Eurocode 1, osa 2-2:  $\gamma_{n,r} = 1,0$   
 $\dot{h}_{net,r}$  on säteilyn nettolämpövirta ( $W/m^2$ ).

Kuljettumisen nettolämpövirta [2]:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) \quad (5.4)$$

- missä  $\alpha_c$  on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin, Eurocode 1, osa 2-2:  
 $\alpha_c = 25 W/m^2 K$  standardipalossa  
 $\theta_g$  on palotilan kaasun lämpötila rakenneosan ympärillä ( $^{\circ}C$ )  
 $\theta_m$  on rakenneosan pintalämpötila ( $^{\circ}C$ ).

Säteilyn nettolämpövirta [2]:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \epsilon_{res} 5,67 \cdot 10^{-8} \left[ (\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad (5.5)$$

missä  $\Phi$  on näkyvyyskerroin, Eurocode 1, osa 2-2:  $\Phi = 1,0$   
 $\epsilon_{res}$  on resuloiva emissiokerroin, Eurocode 3, osa 1-2:  $\epsilon_{res} = 0,50$   
 $\theta_r$  on säteilylämpötila rakenneosan ympärillä ( $^{\circ}\text{C}$ ), lämpötilana voidaan käyttää kaasun lämpötilaa  $\theta_g$   
 $\theta_m$  on rakenneosan pintalämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $5,67 \cdot 10^{-8}$  Stefanin-Boltzmannin vakio ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$ ).

Teräksen ominaislämmön arvoksi voidaan ottaa  $c_a = 600 \text{ J/kgK}$ , tai se voidaan laskea tarkemmin seuraavasti [2]:

$$c_a = 425 + 0,773\theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}\theta_a^3, \quad (5.6)$$

kun  $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}, \quad (5.7)$$

kun  $600 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731}, \quad (5.8)$$

kun  $735 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$c_a = 650, \quad (5.9)$$

kun  $900 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

missä  $\theta_a$  on teräksen lämpötila.

### 5.3.2 Palosuojattu teräsrakenne

Suojatun teräsrakenteen lämpötilan muutos lasketaan seuraavasti [4]:

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p/d_p}{c_a\rho_a} \frac{A_p}{V} \frac{\theta_{g,t} - \theta_{a,t}}{1 + \phi/3} \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t}, \quad \text{mutta } \Delta\theta_{a,t} \geq 0 \quad (5.10)$$

$$\text{missä } \phi = \frac{c_p\rho_p}{c_a\rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (5.11)$$

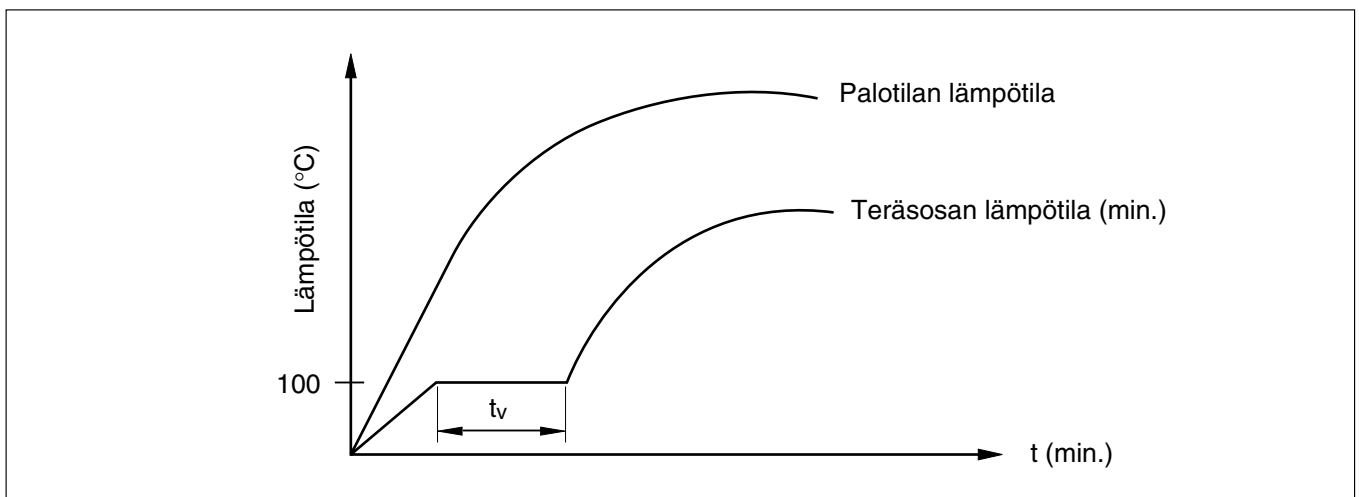
$\frac{A_p}{V}$  on palosuoja-aineella eristetyn terässauvan poikkileikkaustekijä ( $\text{m}^{-1}$ )  
 $A_p$  on palosuoja-aineen sisäpinnan pinta-ala sauvan pituusyksikköä kohti ( $\text{m}^2/\text{m}$ )  
 $V$  on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti ( $\text{m}^3/\text{m}$ )  
 $c_a$  on teräksen ominaislämpö ( $\text{J}/\text{kgK}$ )  
 $c_p$  on palosuoja-aineen ominaislämpö ( $\text{J}/\text{kgK}$ )

- $d_p$  on palosuoja-aineen paksuus (m)  
 $\Delta t$  on aikaväli (s), korkeintaan 30 s  
 $\theta_{a,t}$  on teräksen lämpötila (°C)  
 $\theta_{g,t}$  on palotilan lämpötila teräksen ympärillä (°C)  
 $\Delta\theta_{g,t}$  on palotilan lämpötilan nousu teräksen ympärillä (°C)  
 $\lambda_p$  on palosuoja-aineen lämmönjohtavuus (W/mK)  
 $\rho_a$  on teräksen tiheys (kg/m<sup>3</sup>)  
 $\rho_p$  on palosuoja-aineen tiheys (kg/m<sup>3</sup>).

Palosuoja-aineessa oleva kosteus hidastaa teräksen lämpiämistä, kunnes kosteus on haihtunut. Viiveaikana teräksen lämpötilan voidaan otaksua pysyvän 100 °C:ssa, koska palosuoja-aineessa oleva kosteus poistuu palon vastakkaisen pinnan kautta [1]. Viiveaika voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$t_v = \frac{p_p \rho_p d_p^2}{5 \lambda_p} \quad (5.12)$$

missä  $p_p$  on palosuoja-aineen kosteussisältö painoprosentteina. Viiveajan jälkeen teräksen lämpötilan otaksutaan kehittyvän kaavan (5.10) mukaan.



**Kuva 5.6** Periaatekuva palosuoja-aineen kosteuspitoisuuden vaikutuksesta teräksen lämpötilankehitykseen

### 5.3.3 Teräsosan poikkileikkaustekijä

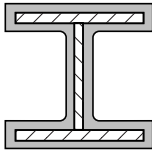
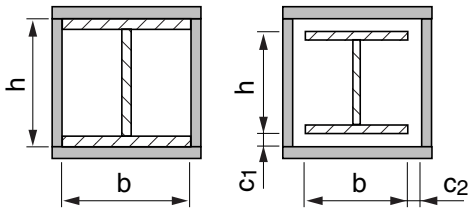
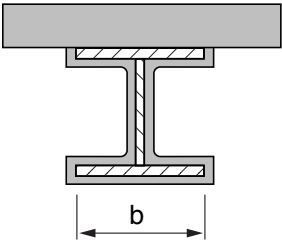
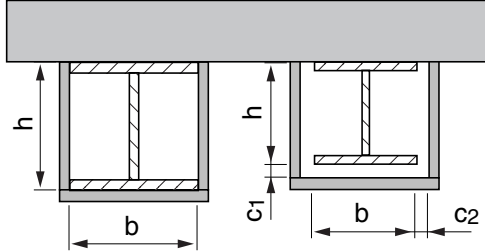
Suojaamattoman teräksen poikkileikkaustekijällä tarkoitetaan teräsosan palolle alttiin pinnan suhdetta osan tilavuuteen. Palosuojatun teräsosan tapauksessa käytetään palosuojauksen palolle vastakkaisen pinnan pinta-alaa. Jos poikkileikkaustekijä on vakio rakenteen eri poikkileikkauksissa, voidaan käyttää vaipan pinta-alan sijaan piiriä ja tilavuuden sijaan poikkileikkauksen pinta-alaa.

Joissakin tapauksissa voi olla tarpeen laskea poikkileikkaustekijä hitsatun profiilin uumalle ja laipoille erikseen taulukoiden 5.2 ja 5.3 periaatteiden mukaisesti. Tämä voi olla tarpeen erityisesti sellaisilla profiileilla, joissa uuma on hyvin hoikka kun taas laipat ovat paksuja. Tätä menetelmää ei esitetä normissa.

**Taulukko 5.2** Suojaamattoman hitsatun profiilin poikkileikkaustekijä [4]

Poikkileikkaus, johon palo kohdistuu kaikilta sivuilta	Poikkileikkaus, johon palo kohdistuu kolmelta sivulta
$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{piiri}}{\text{poikkileikkauksen pinta-ala}}$	$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{palolle alttis pinta}}{\text{poikkileikkauksen pinta-ala}}$
I-poikkileikkaus, jonka laippaan kohdistuu palo kolmelta sivulta	I-poikkileikkaus, joka on vahvistettu koteloksi ja johon kohdistuu palo kaikilta sivuilta
$\frac{A_m}{V} = \frac{b + 2t_f}{bt_f}$	$\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{poikkileikkauksen pinta-ala}}$

**Taulukko 5.3** Palosuojatun hitsatun profiilin poikkileikkaustekijä [4]

Vakiopaksuinen suojaus rakenteen pinnassa	Kotelomainen suojaus, jonka paksuus on vakio
 $\frac{A_p}{V} = \frac{\text{teräksen piiri}}{\text{teräksen poikkileikkauksen pinta-ala}}$	 $\frac{A_p}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{teräksen poikkileikkauksen pinta-ala}}$ $c_1 \leq h/4, c_2 \leq h/4$
Vakiopaksuinen suojaus rakenteen pinnassa, paloaltistus kolmelta sivulta	Kotelomainen suojaus, jonka paksuus on vakio, paloaltistus kolmelta sivulta
 $\frac{A_p}{V} = \frac{\text{teräksen piiri} - b}{\text{teräksen poikkileikkauksen pinta-ala}}$	 $\frac{A_p}{V} = \frac{2h + b}{\text{teräksen poikkileikkauksen pinta-ala}}$ $c_1 \leq h/4, c_2 \leq h/4$

## 5.4 Hitsatun profiilin kriittinen lämpötila

Teräksen kriittisellä lämpötilalla tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jossa teräksen myötölujuus on alentunut kuormitusten aiheuttaman jännityksen suuruiseksi [1]. Kriittinen lämpötila riippuu poikkileikkauksen hyväksikäyttöasteesta ja se voidaan laskea seuraavasti [4]:

$$\theta_{a.cr} = 39,19 \ln \left( \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 \quad (5.13)$$

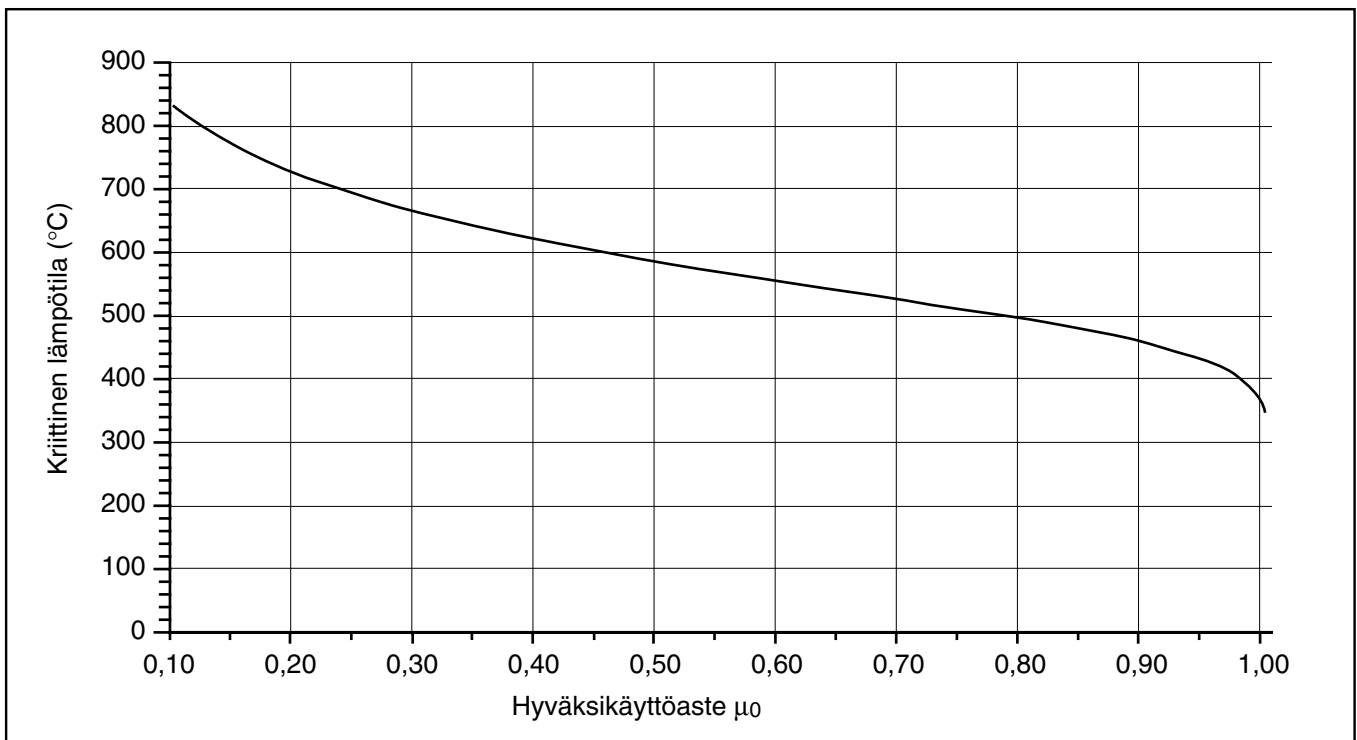
missä  $\mu_0 = \frac{E_{f.t.d}}{R_{f.t.d.0}}$  on poikkileikkausluokkaan 1, 2 tai 3 kuuluvien sauvojen ja kaikkien vedettyjen sauvojen hyväksikäyttöaste ajan hetkellä  $t = 0$  (5.14)

$E_{f.t.d}$  on teräsrakenneosaan vaikuttavien voimien laskenta-arvo palotilanteessa  
 $R_{f.t.d.0}$  on teräsrakenneosan kestävyuden laskenta-arvo palotilanteessa ajan hetkellä  $t = 0$ .

Poikkileikkausluokan 4 muiden kuin vedettyjen sauvojen kestävyys palotilanteessa on riittävä, jos tarkasteltavana ajan hetkenä teräksen lämpötila on enintään 350 °C [4]. Kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan Suomessa käytetään raja-arvona 450 °C [6].

**Taulukko 5.4** Poikkileikkauksen hyväksikäyttöasteen vaikutus teräksen kriittiseen lämpötilaan [4]

$\mu_0$	$\theta_{a.cr}$	$\mu_0$	$\theta_{a.cr}$	$\mu_0$	$\theta_{a.cr}$	$\mu_0$	$\theta_{a.cr}$
0,10	829	0,34	645	0,58	560	0,82	490
0,12	802	0,36	636	0,60	554	0,84	483
0,14	779	0,38	628	0,62	549	0,86	475
0,16	759	0,40	620	0,64	543	0,88	467
0,18	741	0,42	612	0,66	537	0,90	458
0,20	725	0,44	605	0,68	531	0,92	448
0,22	711	0,46	598	0,70	526	0,94	436
0,24	698	0,48	591	0,72	520	0,96	421
0,26	685	0,50	585	0,74	514	0,98	398
0,28	674	0,52	578	0,76	508	1,00	349
0,30	664	0,54	572	0,78	502		
0,32	654	0,56	566	0,80	496		



**Kuva 5.7** Teräksen kriittinen lämpötila poikkileikkauksen hyväksikäyttöasteen funktiona

## 5.5 Hitsatun profiilin kestävyys palotilanteessa

Poikkileikkauksen palotilanteen mitoitusehto on seuraavan kaavan mukainen [4]:

$$E_{fi.d} \leq R_{fi.d,t} \quad (5.15)$$

missä  $E_{fi.d}$  on teräsrakenneseosan vaikuttavien voimien laskenta-arvo palotilanteessa  
 $R_{fi.d,t}$  on teräsrakenneseosan kestävyuden laskenta-arvo palotilanteessa ajan hetkellä  $t$ .

### 5.5.1 Palotilanteen kuormitus ja osavarmuusluvut

Rakenneseosa voidaan mitoitaa palotilanteessa yksinkertaisella menetelmällä, jossa normaali-lämpötilan voimasuureita pienennetään. Lämpölaajenemisten ja muodonmuutosten vaikutusta ei tarvitse tällöin ottaa huomioon. Voimasuureen arvo palotilanteessa saadaan seuraavasta kaavasta [4]:

$$E_{fi.d} = \eta_{fi} E_d \quad (5.16)$$

missä  $E_d$  on teräsrakenneseosan vaikuttavien voimien laskenta-arvo normaalilämpötilassa,

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{1.1} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k.1}} \text{ on kuormituksen pienennyskerroin (kuva 5.8)} \quad (5.17)$$

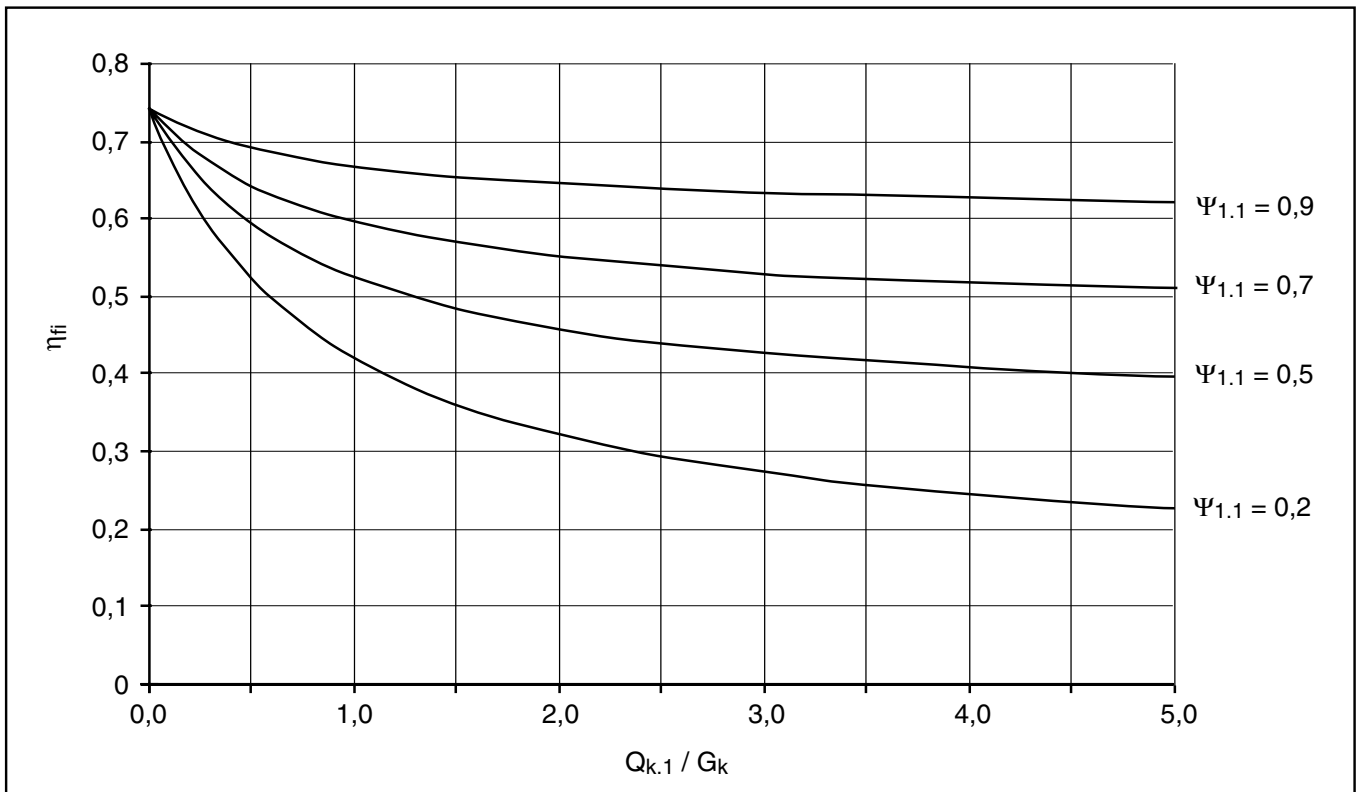
$\eta_{fi}$  lasketaan Suomessa kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan [6]

$Q_{k.1}$  on määräävä muuttuva kuorma

$\gamma_{GA}$  on pysyvien kuormien osavarmuusluku onnettomuuden mitoitustilanteessa

$\psi_{1.1}$  on kuorman yhdistelykerroin (EC 1, osa 1) [5].

Kuvan 5.8 pienennyskerroimet on laskettu osavarmuusluvuilla  $\gamma_{GA} = 1,0$ ,  $\gamma_G = 1,35$  ja  $\gamma_Q = 1,5$ . **Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan soveltamisasiakirjoista (= NAD, national application document).**



**Kuva 5.8** Kuormituksen pienennyskerroin palotilanteessa muuttuvan kuormituksen ja pysyvän kuormituksen suhteen funktiona [4]

### 5.5.2 Poikkileikkausluokitus palomitoituksessa

Puristettu sauva luokitellaan palotilanteessa kuten normaalilämpötilassa. Muiden sauvojen poikkileikkausluokituksessa käytetään muunnettua parametria  $\varepsilon$  [4]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235 k_{E,\theta}}{f_y k_{y,\theta}}} \quad (5.18)$$

Kohdissa 5.5.4-5.5.7 esitettävät laskentamenetelmät pätevät profiileille, jotka kuuluvat poikkileikkausluokkiin 1-3. Poikkileikkausluokka 4:n puristetut ja/tai taivutetut profiilit on palosuojattava siten, että niiden lämpötila ei ylitä 350 °C [4] tai kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan 450 °C [6] vaadittuna palonkestoaikana.

### 5.5.3 Hitsatun profiilin vetokestävyys palotilanteessa

Vedetyn profiilin kestävyys palotilanteessa lasketaan seuraavasta kaavasta kaikissa poikkileikkausluokissa [4]:

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} N_{Rd} \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M,fi}} \quad (5.19)$$

- missä  $k_{y,\theta}$  on teräksen myötölujuuden pienennyskerroin lämpötilassa  $\theta_a$   
 $N_{Rd}$  on poikkileikkauksen plastinen kestävyys  $N_{pl,Rd}$  normaalilämpötilassa  
 $\gamma_{M,fi}$  on teräksen osavarmuusluku palomitoituksessa  
Eurocode 3, osa 1-2:  $\gamma_{M,fi} = 1,0$ .

#### 5.5.4 Hitsatun profiilin nurjahduskestävyys palotilanteessa

Palotilanteen nurjahduskestävyys lasketaan seuraavasti poikkileikkausluokissa 1-3 [4]:

$$N_{b,fi,\theta,Rd} = \frac{(\chi_{fi}/1,2) A k_{y,\theta} f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (5.20)$$

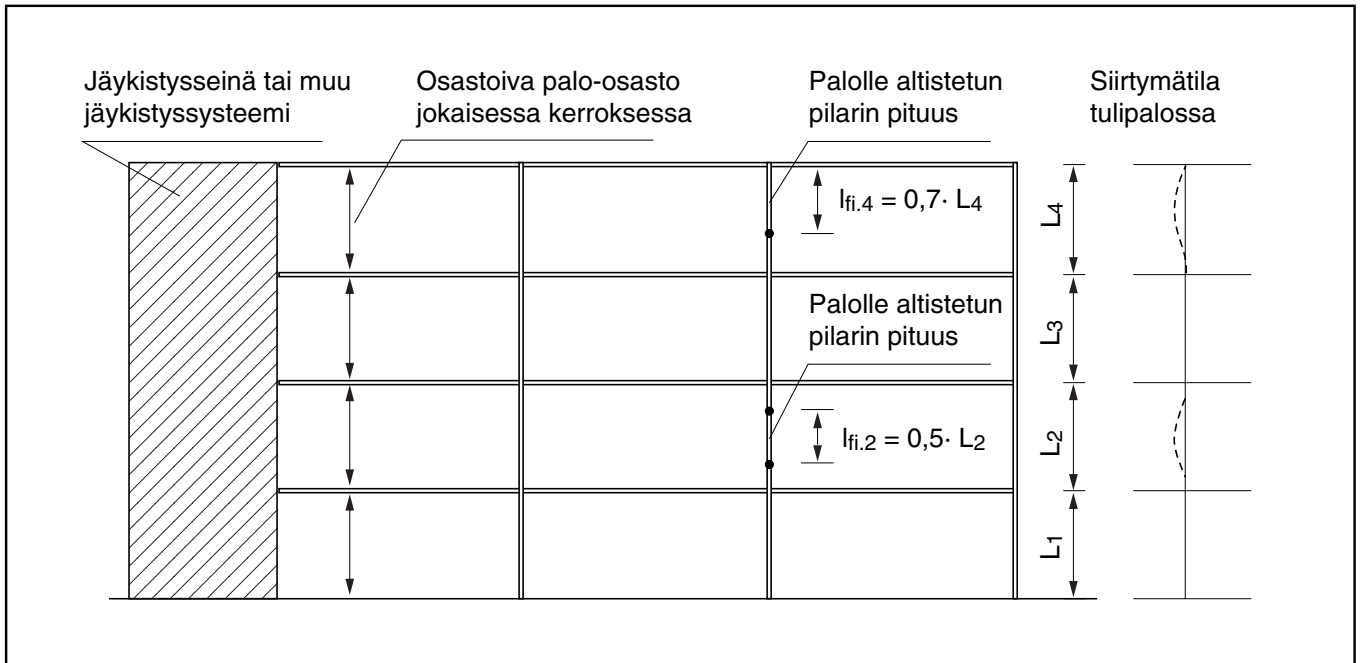
- missä  $\chi_{fi}$  on tasonurjahduksen pienennyskerroin palomitoituksessa  
 $A$  on poikkileikkauksen pinta-ala  
 $k_{y,\theta}$  on teräksen myötörajan pienennyskerroin lämpötilassa  $\theta_a$ .

Tasonurjahduksen pienennyskerroimen laskennassa käytetään nurjahdusluokkaa c ( $\alpha = 0,49$ ) riippumatta nurjahduksen suunnasta ja poikkileikkauksen tyypistä. Arvoksi valitaan pienempi arvoista  $\chi_{y,fi}$  ja  $\chi_{z,fi}$ . Pienennyskerroimen laskennassa tarvittava suhteellinen hoikkuus lasketaan seuraavasti [4]:

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \frac{l_{fi}}{\pi i} \sqrt{\frac{f_y k_{y,\theta}}{E k_{E,\theta}}} \quad (5.21)$$

- missä  $l_{fi}$  on sauvan nurjahduspituus palotilanteessa  
 $k_{y,\theta}$  on kuten edellä  
 $k_{E,\theta}$  on teräksen kimmokertoimen pienennyskerroin lämpötilassa  $\theta_a$ .

Pilarin palotilanteen nurjahduspituus määritetään yleensä kuten normaalilämpötilassa. Jäykistetyin kehän pilarin nurjahduspituus voidaan määrittää kuvan 5.9 mukaan, jos palo-osastot erotettavien nurjahtavien rakenneosien palonkestävyys on vähintään yhtä suuri kuin tarkasteltavan pilarin palonkestävyys.



Kuva 5.9 Pilarin nurjahduspituus jäykistetyssä kehässä

### 5.5.5 Hitsatun profiilin taivutuskestävyys palotilanteessa

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys palotilanteessa lasketaan seuraavasti poikkileikkausluokissa 1-3 [4]:

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} M_{Rd} \frac{\gamma_{M1}/\gamma_{M,fi}}{\kappa_1 \kappa_2} \quad (5.22)$$

missä  $M_{Rd}$  on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys  $M_{pl,Rd}$  poikkileikkausluokissa 1 ja 2 (tarvittaessa leikkausvoiman vaikutuksesta pienentynyt kestävyys)

$M_{Rd}$  on poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutuskestävyys  $M_{el,Rd}$  poikkileikkausluokassa 3 (tarvittaessa leikkausvoiman vaikutuksesta pienentynyt kestävyys)

$\kappa_1$  on adaptaatiokerroin, kun poikkileikkauksen lämpötila on epätasainen:

$\kappa_1 = 1,0$ , kun profiili on altistettu palolle neljältä sivulta

$\kappa_1 = 0,70$ , kun profiili on altistettu palolle kolmelta sivulta ja neljännellä sivulla on liittolaatta tai betonilaatta

$\kappa_2$  on adaptaatiokerroin, kun lämpötila on epätasainen palkin pituudella:

$\kappa_2 = 0,85$ , kun kyseessä on staattisesti määräämättömän palkin tuet

$\kappa_2 = 1,0$ , kaikissa muissa tapauksissa.

Profiilin kiepahduskestävyys palotilanteessa lasketaan seuraavasti poikkileikkausluokissa 1-3 (kun  $\bar{\lambda}_{LT,\theta} > 0,4$ ) [4]:

$$M_{b.fi.\theta.Rd} = \frac{\chi_{LT.fi}}{1,2} W_y k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M.fi}} \quad (5.23)$$

missä  $\chi_{LT.fi}$  on kiepahduksen pienennyskerroin palotilanteessa

$W_y$  on plastisuusteorian mukainen taivutusvastus  $W_{pl,y}$  poikkileikkausluokissa 1 ja 2

$W_y$  on kimmoteorian mukainen taivutusvastus  $W_{el,y}$  poikkileikkausluokassa 3.

Suhteellinen hoikkuus lasketaan seuraavasti [4]:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \sqrt{\frac{\beta_w W_{pl} f_y k_{y,\theta}}{M_{cr} k_{E,\theta}}} \quad (5.24)$$

missä  $k_{y,\theta}$  ja  $k_{E,\theta}$  lasketaan puristetun laipan suurimman lämpötilan perusteella tai vaihtoehtoisesti varmalla puolella olevana oletuksena koko poikkileikkauksen suurimman lämpötilan perusteella.

### 5.5.6 Hitsatun profiilin leikkauskestävyys palotilanteessa

Poikkileikkauksen leikkauskestävyys palotilanteessa lasketaan seuraavasti poikkileikkausluokissa 1-3, kun lämpötilan jakaantuminen on epätasainen [4]:

$$V_{fi.\theta.Rd} = k_{y,\theta} V_{Rd} \frac{\gamma_{M1}/\gamma_{M.fi}}{\kappa_1 \kappa_2} \quad (5.25)$$

missä  $V_{Rd}$  on leikkauskestävyys normaalilämpötilassa

$\kappa_1$  ja  $\kappa_2$  ovat kohdan 5.5.5 mukaisia adaptaatiokertoimia.

### 5.5.7 Taivutusmomentin ja puristavan normaalivoiman kuormittaman hitsatun profiilin kestävyys palotilanteessa

Taivutetun ja puristetun hitsatun profiilin kestävyys palotilanteessa tarkastetaan seuraavasti poikkileikkausluokissa 1-3 [4]:

$$\frac{N_{fi.Ed}}{N_{b.fi.\theta.Rd}} + \frac{k_y M_{y.fi.Ed}}{M_{y.fi.\theta.Rd}} + \frac{k_z M_{z.fi.Ed}}{M_{z.fi.\theta.Rd}} \leq 1,0 \quad (5.26)$$

$$\frac{N_{fi.Ed}}{N_{z.b.fi.\theta.Rd}} + \frac{k_{LT} M_{y.fi.Ed}}{M_{b.fi.\theta.Rd}} + \frac{k_z M_{z.fi.Ed}}{M_{z.fi.\theta.Rd}} \leq 1,0 \quad (\text{kun kiepahdus on mahdollinen murtumismuoto}) \quad (5.27)$$

missä  $N_{b.fi.\theta.Rd}$  on poikkileikkauksen nurjahduskestävyys palotilanteessa kohdan 5.5.4 mukaan

$N_{z.b.fi.\theta.Rd}$  on poikkileikkauksen nurjahduskestävyys palotilanteessa z-akselin suhteen

$M_{y.fi.\theta.Rd}$  on poikkileikkauksen taivutuskestävyys palotilanteessa y-akselin suhteen kohdan 5.5.5 mukaan

$M_{z.fi.\theta.Rd}$  on poikkileikkauksen taivutuskestävyys palotilanteessa z-akselin suhteen

$M_{b.fi.\theta.Rd}$  on profiilin kiepahduskestävyys palotilanteessa kohdan 5.5.5 mukaan

$N_{fi.Ed}$  on poikkileikkaukseen vaikuttava puristava normaalivoima palotilanteessa

$M_{y.fi.Ed}$  on poikkileikkaukseen vaikuttava taivutusmomentti palotilanteessa y-akselin suhteen

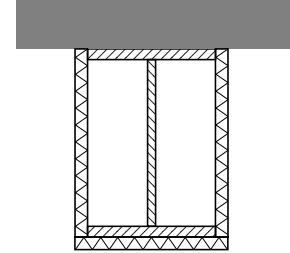
$M_{z.fi.Ed}$  on poikkileikkaukseen vaikuttava taivutusmomentti palotilanteessa z-akselin suhteen

$k_y$ ,  $k_z$  ja  $k_{LT}$  lasketaan kohdan 2.7.2 mukaan seuraavin muutoksin:

$$\begin{aligned} \chi_y &\Rightarrow \chi_{y.fi}/1,2 & \chi_z &\Rightarrow \chi_{z.fi}/1,2 \\ \bar{\lambda}_y &\Rightarrow \bar{\lambda}_{y.\theta} & \bar{\lambda}_z &\Rightarrow \bar{\lambda}_{z.\theta} \end{aligned}$$

**Esimerkki 5.1**

Lasketaan WI600-8-20×250 -profiilin taivutus- ja leikkauskestävyys palotilanteessa, kun vaadittu palonkesto-aika on 60 minuuttia. Profiilin kiepahdus on estetty. Poikkileikkauksen kuormituksena on pysyvä kuorma  $g_k = 35,0$  kN/m ja muuttuva kuorma  $q_k = 30,0$  kN/m. Jänneväli on 8,0 m. Poikkileikkaus on suojattu mineraalivillalevyillä ja siihen kohdistuu palo kolmelta sivulta oheisen kuvan mukaisesti. Teräslaji on S355J2G3.

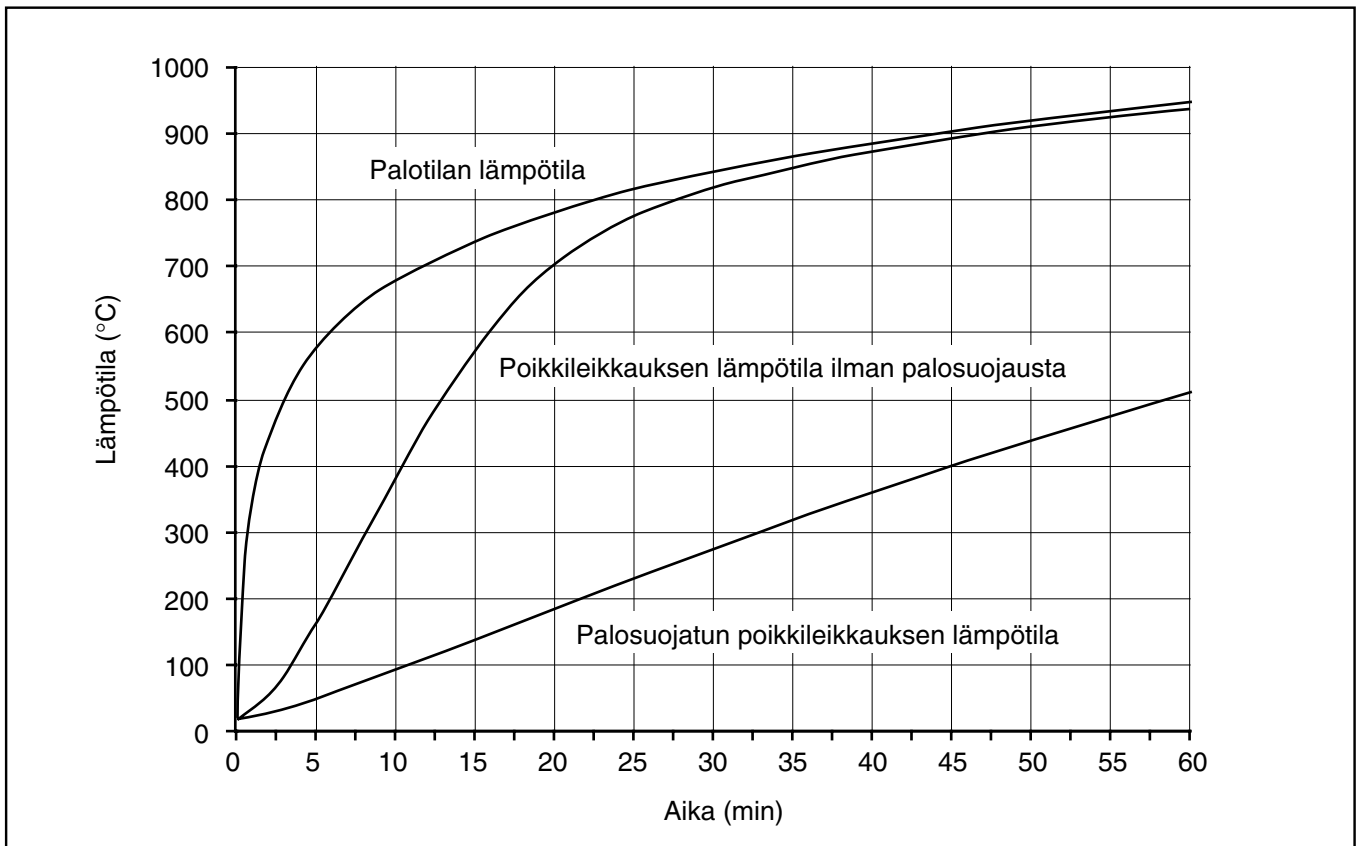


Seuraavassa kuvassa esitetään suojaamattoman ja palosuojatun profiilin sekä palotilan lämpötilan kehittyminen tunnin aikana standardipalossa. Suojaamattoman profiilin lämpötilan kehitys lasketaan kaavasta (5.2) ja palosuojatun profiilin kaavasta (5.10). Laskennassa käytetään seuraavia arvoja:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{3 \cdot 250 + 4 \cdot 20 + 2 \cdot 560 - 2 \cdot 8}{2 \cdot 250 \cdot 20 + 560 \cdot 8} \cdot 10^3 = 133,56 \text{ l/m} \quad \text{suojaamattoman poikkileikkauksen poikkileikkaustekijä}$$

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2 \cdot 600 + 250}{2 \cdot 250 \cdot 20 + 560 \cdot 8} \cdot 10^3 = 100,14 \text{ l/m} \quad \text{palosuojatun poikkileikkauksen poikkileikkaustekijä}$$

$c_a$	$= 600 \text{ J/kgK}$	teräksen ominaislämpö
$\alpha_c$	$= 25 \text{ W/m}^2\text{K}$	kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin
$\rho_a$	$= 7850 \text{ kg/m}^3$	teräksen tiheys
$\Phi$	$= 1,0$	näkyvyyskerroin
$\epsilon_{res}$	$= 0,50$	resultoiva emissiokerroin
$\Delta t$	$= 5 \text{ s}$	laskenta-aikaväli sekä palosuojattuna että palosuojaamattomana
$c_p$	$= 1000 \text{ J/kgK}$	palosuoja-aineen ominaislämpö
$d_p$	$= 0,020 \text{ m}$	palosuoja-aineen paksuus
$\lambda_p$	$= 0,25 \text{ W/mK}$	palosuoja-aineen lämmönjohtavuus, yksinkertaisuuden vuoksi arvo pidetään vakiona koko laskennan ajan
$\rho_p$	$= 140 \text{ kg/m}^3$	palosuoja-aineen tiheys
$\gamma_{n.c}$	$= 1,0$	kerroin, joka ottaa huomioon eri maissa tehdyt kokeet
$\gamma_{n.r}$	$= 1,0$	kerroin, joka ottaa huomioon eri maissa tehdyt kokeet



Tunnin palon jälkeen palosuojaamattoman profiilin lämpötila on 939 °C ja palosuojatun 510 °C. Palosuojatun poikkileikkauksen lujuuden ja kimmokertoimen pienennyskerroimet interpoloidaan lineaarisesti taulukosta 5.1 tai kuvasta 5.5 lämpötilojen 500 °C ja 600 °C välistä. Pienennyskerroimiksi saadaan  $k_{y,\theta} = 0,749$  ja  $k_{E,\theta} = 0,571$ . Tässä esimerkissä käytetään kerrointa  $k_{x,\theta}$  kertoimen  $k_{y,\theta}$  sijaan, jolloin rakenne täyttää muodonmuutosvaatimukset ilman eri tarkasteluja.

Seuraavaksi tarkastetaan poikkileikkauksen poikkileikkausluokitus:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235 k_{E,\theta}}{f_y k_{x,\theta}}} = \sqrt{\frac{235 \cdot 0,571}{355 \cdot 0,589}} = 0,80$$

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{560}{8} = 70,0 < 124\varepsilon = 124 \cdot 0,80 = 99,2 \quad \Rightarrow \text{poikkileikkausluokka 3}$$

Adaptaatiokerroimien arvoiksi otetaan kestävyyksien laskennassa  $\kappa_1 = 0,7$  ja  $\kappa_2 = 1,0$ .

Kimmeteorian mukaiseksi taivutuskestävyudeksi normaalilämpötilassa saadaan  $M_{Rd} = 1031,0 \text{ kNm}$ .

Laskentakuorman pienennyskerroin, kun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin  $\psi_{1,1} = 0,7$ :

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{1,1} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_Q Q_{k,1}} = \frac{1,0 \cdot 35,0 + 0,7 \cdot 30,0}{1,35 \cdot 35,0 + 1,5 \cdot 30,0} = 0,61$$

Edellä oleva pienennyskerroin on laskettu osavarmuusluvuilla  $\gamma_{GA} = 1,0$ ,  $\gamma_G = 1,35$  ja  $\gamma_Q = 1,5$ . **Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan soveltamisasiakirjoista (= NAD, national application document).**

Taivutusmomentti murtorajatilassa:

$$M_{Sd} = (1,35 \cdot 35,0 + 1,5 \cdot 30,0) \frac{8,0^2}{8} = 738,0 \text{ kNm}$$

Taivutusmomentti palotilanteessa:

$$M_{fi.Ed} = \eta_{fi} M_{Sd} = 0,61 \cdot 738,0 = 450,2 \text{ kNm}$$

Palotilanteen taivutuskestävyys:

$$\begin{aligned} M_{fi.\theta.Rd} &= k_{x,\theta} M_{Rd} \frac{\gamma_{M1}/\gamma_{M.fi}}{\kappa_1 \kappa_2} \\ &= 0,589 \cdot 1031,0 \cdot \frac{1,1/1,0}{0,7 \cdot 1,0} = 954,3 \text{ kNm} > 450,2 \text{ kNm} \quad \text{OK} \end{aligned}$$

Leikkauskestävyydeksi saadaan normaalilämpötilassa  $V_{Rd} = 834,7 \text{ kN}$ .

Leikkausvoima murtorajatilassa:

$$V_{Sd} = (1,35 \cdot 35,0 + 1,5 \cdot 30,0) \cdot \frac{8,0}{2} = 369,0 \text{ kN}$$

Leikkausvoima palotilanteessa:

$$V_{fi.Ed} = \eta_{fi} V_{Sd} = 0,61 \cdot 369,0 = 225,1 \text{ kN}$$

Palotilanteen leikkauskestävyys:

$$\begin{aligned} V_{fi.\theta.Rd} &= k_{x,\theta} V_{Rd} \frac{\gamma_{M1}/\gamma_{M.fi}}{\kappa_1 \kappa_2} \\ &= 0,589 \cdot 834,7 \cdot (1,1/1,0)/(0,7 \cdot 1,0) = 772,6 \text{ kN} > 225,1 \text{ kN} \quad \text{OK} \end{aligned}$$

Koska palotilanteen leikkauskestävyys on yli kaksi kertaa palotilanteen leikkausvoiman laskenta-arvo, momentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutusta ei tarvitse tutkia. Lisäksi momentin ja leikkausvoiman maksimi-arvot sijaitsevat eri kohdissa.

Lasketaan vielä poikkileikkauksen kriittinen lämpötila. Laskentaa varten tutkitaan poikkileikkauksen käyttöasteet palotilanteessa hetkellä  $t = 0$  sekä taivutusmomentin että leikkausvoiman suhteen.

$$M_{fi.0.Rd} = M_{Rd} \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M.fi}} = 1031,0 \cdot \frac{1,1}{1,0} = 1134,1 \text{ kNm}$$

$$\mu_{0.M} = \frac{M_{fi.Ed}}{M_{fi.0.Rd}} = \frac{450,2}{1134,1} = 0,40$$

$$V_{fi.0.Rd} = V_{Rd} \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M.fi}} = 834,7 \cdot \frac{1,1}{1,0} = 918,2 \text{ kN}$$

$$\mu_{0.V} = \frac{V_{fi.Ed}}{V_{fi.0.Rd}} = \frac{225,1}{918,2} = 0,25$$

Poikkileikkauksen kriittiseksi lämpötilaksi saadaan taivutuskestävyyden perusteella:

$$\theta_{a.cr} = 39,19 \ln \left( \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 39,19 \cdot \ln \left( \frac{1}{0,9674 \cdot 0,28^{3,833}} - 1 \right) + 482 = 620 \text{ } ^\circ\text{C}$$

## 5.6 Palosuojausmenetelmät

Teräsrakenne palosuojataan eristämällä se ja/tai parantamalla rakenteen kykyä vastaanottaa lämpöä siten, että se ei kuumene liikaa. Lisäksi kantavat profiilit voidaan sijoittaa mahdollisuuksien mukaan siten, että niihin kohdistuva palonaikainen palorasitus on mahdollisimman pieni. Eristykseen voidaan käyttää esimerkiksi palosuojalevyjä ja -maaleja. Rakenteen lämmön vastaanottokykyä voidaan parantaa täyttämällä koteloprofiili vedellä tai betonilla.

Suojauksen valintaan vaikuttavat asennus- ja käyttöolosuhteet sekä suojauksen kustannukset. Hankinta- ja asennuskustannuksien lisäksi on otettava huomioon myös suojauksen huoltokustannukset. Usein suojaustavan valintaan vaikuttavat arkkitehtoniset seikat.

Alaslaskettua kattoa voidaan käyttää välipohjarakenteen palosuojana. Palonkestävät levyt on asennettava niin tiiviisti, että palokaasut ja lämpö eivät pääse välipohjarakenteen puolelle. Alaslasketun katon ripustus määrää usein rakenteen palonkestoajan, joten sen toteutukseen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Yleensä alaslasketun katon rakennetyypin palonkesto aika ja suojausvaikutus on varmennettava polttokokeella [1,3].

Suojattavat rakenteet, kuten esimerkiksi pilarit, voidaan joissakin tapauksissa sijoittaa riittävän etäälle palotilasta, jolloin selvittää kevyemmällä palosuojauksella. Ne voidaan myös sijoittaa seinärakenteen sisään, jolloin erillistä palosuojausta ei välttämättä tarvita.

Palosuojausmenetelmät voidaan jakaa niiden toteutustavan perusteella kuiviin ja märkiin menetelmiin. Kuiviin menetelmiin kuuluvat tuotteet kiinnitetään yleensä mekaanisilla kiinnikkeillä suojattavan rakenteen ympärille. Kuivia menetelmiä ovat mm. [1]:

- mineraalivillalevyt
- vermikuliittilevyt
- kalsiumsilikaattilevyt
- kipsilevyt ja -elementit
- puukipsilevyt sekä
- sementti-selluloosalevyt.

Märkiä palosuojamenetelmiä ovat mm. [1]:

- mineraalikuituruiskutus
- vermikuliittiruiskutus
- palosuojamaali
- betoni ja
- vesi.

### **Mineraalivillalevyt**

Mineraalivillalevyt ovat tehokkaita lämmöneristeitä. Levyt soveltuvat palosuojaukseen, jos niiden sintraantumislämpötila on riittävän korkea, n. 800-1100 °C. Palosuojaukseen käytettävien mineraalivillalevyjen tiheys on 100-400 kg/m<sup>3</sup> ja niiden paksuus vaihtelee välillä 10-90 mm.

Levyt kiinnitetään mekaanisesti tai liimaamalla. Mekaanisia kiinnikkeitä ovat teräspiikit, jotka hitsataan suojattavaan profiiliin. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ammuttavia nauloja. Levyt painetaan piikkien tai naulojen läpi teräsprofiilin pintaan ja ne kiinnitetään lukituslevyillä. Asennuksen yhteydessä on kiinnitettävä huomiota saumojen tiivyyteen. Jos levyt kiinnitetään liimaamalla, teräspinnan on oltava kuiva ja se on puhdistettava liasta ja öljystä.

### **Vermikuliittilevyt**

Vermikuliittilevyjen perusaineena on paisutettu kille ja sideaineena silikaattipitoinen materiaali kuten sementti. Levyjen palosuojakestävyys perustuu niiden sisältämään suureen vesimäärään sekä hyvään lämmöneristävyyteen myös korkeissa lämpötiloissa. Tulipalon alkuvaiheessa lämpöenergiaa kuluu levyjen sisältämän veden höyrystämiseen kuten kipsilevyissä.

Vermikuliittilevyjen tiheys on 350-500 kg/m<sup>3</sup> ja paksuus on 16-80 mm. Levyt kiinnitetään suojattavan profiilin ympärille lämpöä kestävästä laastista ja naulojen tai ruuvien avulla. Levyt voidaan kiinnittää myös liimaamalla. Tällöin alustan on oltava kuiva ja se on puhdistettava. Lämpötilan on oltava yli 0 °C.

### **Kalsiumsilikaattilevyt**

Kalsiumsilikaattilevyt ovat kuituvahvistettuja ja niiden paksuus on 6-65 mm. Levyjen tiheys on 430-950 kg/m<sup>3</sup> ja niitä voidaan työstää tavallisilla puuntyöstövälineillä. Levyt kiinnitetään normaalisti koteloksi suojattavan teräsrakenteen ympärille joko itseporautuvien ruuvein tai hakasin. Kiinnityslistana voidaan tarvittaessa käyttää teräsohutlevyä.

## Kipsilevyt ja -elementit

Kipsilevyn palosuojaominaisuudet perustuvat sen sisältämään suureen kidevesimäärään. Kideveden höyrystymisen aikana teräksen lämpötila pysyy 100 °C:ssa. Kideveden haihduttua vahvistamaton kipsilevy rikkoutuu. Levyjä voidaan vahvistaa lisäämällä lasikuituja sideaineeksi.

Kipsilevyjen tiheys on 770-980 kg/m<sup>3</sup>. Suojauksessa käytetään normaalisti 13 mm:n levyjä, jotka voivat olla useampana kerroksena. Levyt kiinnitetään suojattavan profiilin ympärille koteloksi ohutlevyprofiilien avulla.

Kipsielementtejä valmistetaan kipsin, perliitin ja lasikuidun seoksesta. Elementtejä voidaan valmistaa esim. puoliympyrän muotoisina, jolloin niitä voidaan käyttää pyöreiden pilareiden palosuojaukseen. Elementit liimataan toisiinsa työmaalla.

## Puukipsilevyt

Puukipsilevyt valmistetaan puukuidun ja kipsin seoksesta. Levyn tiheys on n. 1200 kg/m<sup>3</sup> ja sen paksuus on 15 tai 22 mm. Levyt kiinnitetään ruuveilla tai nauloilla.

## Sementti-selluloosalevyt

Sementti-selluloosalevyn valmistuksessa käytetään sementin ja selluloosan lisäksi erilaisia mineraalisia aineosia. Levyn tiheys on n. 1100 kg/m<sup>3</sup>. Levyjä käytetään kevyissä osastoivissa seinissä. Ne kiinnitetään suoraan teräsrunkoon ruuveilla tai vaihtoehtoisesti kiinnityslistojen avulla.

## Mineraalikuituruiskutus

Mineraalivillakuidut ja sementti ruiskutetaan veden kanssa teräksen pinnalle. Kiinnitysalustana voidaan käyttää myös sinkittyä teräsverkkoa, joka toimii samalla tukirauoituksena. Valmiin kerroksen paksuus on yleensä 10-60 mm.

Mineraalikuituruiskutuksen tiheys on 220-500 kg/m<sup>3</sup>. Pinnoitteena voidaan käyttää esim. ruiskumaalusta tai rappausta. Koska palosuojauksen pinta on huokoinen, se on suojattava mekaanista kulutusta vastaan. Suojaukseen voidaan käyttää kovaa rappausta, lasikuitukangasta tai sopivaa levyrakennetta.

## Vermikuliittiruiskutus

Vermikuliittiruiskutuksen runkoaineena käytetään vermikuliittia ja sideaineena sementtiä, kalkkia tai kipsiä sekä vettä. Massa ruiskutetaan suoraan teräspinnalle tai tukiverkolle. Valmiin kerroksen paksuus on yleensä 10-60 mm. Jotkut massat voidaan levittää myös rappaamalla käsin. Ruiskutuksen tiheys on 300-800 kg/m<sup>3</sup>. Pinta voidaan suojata mekaaniselta kulutukselta samoilla menetelmillä kuin mineraalikuituruiskutus.

## Palosuojamaalit

Palosuojamaalit muuttuvat vaahdoksi, kun lämpötila ylittää n. 250-300 °C. Reaktiossa syntyvä paksu vaahtokerros hiiltyy palon aikana ja suojaa teräsrakennetta. Normaalissa käyttölämpötilassa palosuojamaali on kuten tavallinen maali. Kaikki maalityypit eivät kestä pitkäaikaista paloa, vaan hiiltynyt maalikerros voi alkaa kuoriutua teräsrakenteen pinnalta jo alle puolen tunnin kuluttua vaahtonmuodostuksesta [1]. Palosuojamaalia voidaan käyttää, kun palonkestovaatimus on korkeintaan yksi tunti.

Palosuojamaali levitetään teräksen pinnalle siveltimellä, telalla tai ruiskulla. Kuivakalvonpaksuus on yleensä 0,2-3 mm. Maalaus voidaan tehdä joko konepajassa tai asennustyömaalla. Suojattavat profiilit on helpompi maalata konepajassa, mutta ne on suojattava hyvin kuljetuksen ajaksi, koska palosuojamaali vaurioituu helposti.

Palosuojamaalauksen etuna on pieni suojapaksuus. Lisäksi rakenteen ulkonäkö on samanlainen kuin tavanomaisessa korroosionestomaalauksessa. Palosuojamaalaus on kuitenkin huomattavasti kalliimpi kuin tavanomainen korroosionestomaalaus.

## Betoni

Koteloprofiilit voidaan palosuojata täyttämällä ne betonilla. Rakenne toimii normaalilämpötilassa teräksen ja teräsbetonin muodostamana liittorakenteena, jolloin sekä teräs että teräsbetoni yhdessä kantavat kuormituksen. Sama tilanne saadaan aikaan myös silloin, kun I-profiilin laippojen väli valetaan betonilla, joka kiinnitetään uumaan leikkausliittimillä. Betonissa käytetään raudoitusta. Palotilanteessa teräs menettää nopeasti kantokykynsä ja teräsbetoni kantaa pääosan kuormituksesta. Liittorakenteen kantokykyyn vaikuttaa ratkaisevasti betonin raudoitus.

Betonia voidaan käyttää I-profiilien pelkkänä palosuojana siten, että teräsprofiili ja betoni eivät muodosta liittorakennetta. Profiili ympäröidään betonilla, jonka paksuus on 25-60 mm. Betoniraudoituksena käytetään teräsverkkoa.

## Vesi

Koteloprofiilit voidaan palosuojata myös vesitäytöllä. Suojauksen teho perustuu siihen, että suuri osa energiasta kuluu profiilin sisällä olevan veden lämmittämiseen. Kuumentunut vesi höyrystyy pilarin kuumentuneesta osasta ylöspäin. Höyrystyneen veden tilalle on järjestettävä korvausvesi yläpuolisesta vesisäiliöstä.

Sprinklaus on automaattinen palosuojausmenetelmä. Se alkaa toimia, kun lämpötila kohoaa palotilanteessa. Menetelmää käytetään esimerkiksi liike- ja toimistorakennusten sekä teollisuusrakennusten palosuojaukseen.

## 5.7 Lähdeluettelo

1. Inha, T., Iso-Mustajärvi, P. 1997. Teräsrakenteiden palosuojaus. Julkaisu 72. Tampere, Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. 71 s.
2. SFS-ENV 1991-2-2. 1995. Eurocode 1. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Osa 2-2: Rakenteiden kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden kuormat. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 43 s.
3. Inha, T., Kallioniemi, P. 1991. Teräsrakenteiden palosuunnittelu. Helsinki, Teräsrakenneyhdistys ry. 224 s.
4. SFS-ENV 1993-1-2. 1996. Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 77 s.
5. SFS-ENV 1991-1. 1995. Eurocode 1. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Osa 1: Suunnitteluperusteet. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 90 s.
6. Kansallinen soveltamisasiakirja esistandardille SFS-ENV 1993-1-2. 1999. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus. Helsinki, Ympäristöministeriö.