

**HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY**

Department of Civil and Environmental Engineering

Laboratory of Steel Structures

**TEKNILLINEN KORKEAKOULU**

Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto

Teräsrakennetekniikka

**Jarno Junnonen**

**SUOJAAMATON TERÄSPUTKIRISTIKKO PAIKALLISESSA PALOSSA**

Diplomityö on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 28.10.2003.

Työn valvoja                      Professori TkT Pentti Mäkeläinen

Työn ohjaaja                      DI Kristian Witting

## **ESIPUHE**

Tutkimus tehtiin diplomityönä Teknillisen korkeakoulun rakennus- ja ympäristötekniikan osastolla teräsrakennetekniikan oppituoliin.

Tutkimuksen valvojana toimi teräsrakennetekniikan oppituolin professori TkT Pentti Mäkeläinen. Tutkimustyötä ohjasi DI Kristian Witting Rautaruukki Oyj:n rakennustuoteryhmästä.

Kiitokset Pentti Mäkeläiselle työn valvonnasta ja työtilan järjestämisestä. Kiitokset Kristian Wittingille asiantuntija-avusta ja mielenkiintoisista tutkimusaiheista opintojeni aikana. Kiitokset Rautaruukki Oyj:lle ja Teräsrakenneyhdistykselle mitoitushjelmiston tarjoamisesta ja diplomityön taloudellisesta tuesta.

Erityinen kiitos vaimolleni Marille sekä vanhemmilleni kaikesta saamastani tuesta.

Helsingissä 28.10.2003

Jarno Junnonen

Tekijä:	<b>Jarno Junnonen</b>	
Työn nimi:	<b>Suojaamaton teräsputkiristikko paikallisessa palossa</b>	
Päivämäärä:	28.10.2003	Sivumäärä: 117
Osasto:	<b>Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto</b>	
Professori:	<b>Teräsrakennetekniikka</b>	
Työn valvoja:	<b>Professori TkT Pentti Mäkeläinen</b>	
Työn ohjaaja:	<b>DI Kristian Witting</b>	
<p>Teräsrakenteiden palomitoitus suuntautuu kohti todellisia palo-olosuhteita, jolloin tarvittava palosuojaus voidaan kohdistaa siihen osaan rakennetta, jossa sitä tarvitaan. Toisaalta palosuojaus voidaan jättää pois niistä osista, joissa se voidaan osoittaa tarpeettomaksi. Tämä kuitenkin edellyttää, että suojaamaton teräsrakenne on riittävän paloturvallinen ilman erillistä palosuojausta. Toistaiseksi tätä menettelyä on sovellettu lähinnä korkeisiin teollisuuden tuotantohalleihin ja urheilun harjoitteluhalleihin, joissa on suuri vapaa korkeus ja vähän palokuormaa, jolloin voidaan otaksua, ettei paikallisesti syttynyt palo lieskahda. Aihetta on viime aikoina tutkittu paljon ja tutkimuksista saadut tulokset ovat olleet lupaavia. Tässä työssä käsitellään paikallisen palon mallintamista ja suojaamattoman teräsputkiristikon toimintaa korkeissa lämpötiloissa.</p> <p>Esimerkkinä tarkasteltiin teollisuuden tuotantohallin teräsputkiristikkoa, jota rasitti paikallinen mitoituspalo, jonka sijaintia vaihdeltiin ristikon suuntaisesti. Paikallisen palon aiheuttamat rasitukset suojaamattomaan teräsputkiristiksoon olivat erittäin paikallisia. Kun palopatsaan kohdalla terässauvojen lämpötilat ja käyttöasteet kohosivat, niin siirryttäessä vain hieman sivuun palopatsaasta terässauvojen lämpötilat ja käyttöasteet jäivät erittäin alhaiseksi. Esimerkin suojaamaton teräsputkiristikko kesti valitun mitoituspalon ilman palosuojausta. Laskelmat osoittivat myös, että teräsputkiristikon kapasiteettia paikallisessa palossa voitaisiin parantaa merkittävästi palosuojamaalaamalla vain alapaarre.</p>		

Author:	<b>Jarno Junnonen</b>	
Title of the thesis:	<b>Unprotected Structural Steel Hollow Section Truss Subjected to Local Fire</b>	
Date:	28.10.2003	Number of pages: 117
Faculty:	<b>Department of Civil and Environmental Engineering</b>	
Chair:	<b>Laboratory of Steel Structures</b>	
Supervisor:	<b>Professor Dr.Tech. Pentti Mäkeläinen</b>	
Instructor:	<b>Mr Kristian Witting, M.Sc. (Civ. Eng.)</b>	
<p>Nowadays the trend of the structural steel fire design is towards to natural fire modelling in order to install the necessary fire protection material accordingly. On the other hand if it can be shown that the steel structure fulfil its required functions without any external fire protection, it can be built as unprotected. So far this method has been used only in large space industrial and sports halls, which do not have much fire load and where flash-over is unlikely to occur. Lately this method has been studied a lot, and the results of these studies have been promising. The modelling of local fire and the simple calculation models of the unprotected steel structures have been studied in this thesis.</p> <p>An unprotected structural steel hollow section truss of the industrial hall was studied as an example. The truss was subjected to a local fire and the fire plume was moved horizontally parallel to the truss. The thermal actions of the local fire in the steel truss where considerably local. The temperature and degree of utilisation of the steel parts increased immediately under the fire plume, but they decreased rapidly when examining steel parts away from the fire plume. The studied structural steel truss fulfilled its load-bearing function in the local fire without any external fire protection. According to calculations the load-bearing capacity of the unprotected structural steel hollow section truss could be easily improved by installing the fire protection material only to the lower chord of the truss.</p>		

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>10</b>
1.1	ONGELMA.....	10
1.2	TUTKIMUKSEN TAUSTAA .....	10
1.3	TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA KÄYTETYT NORMIT .....	11
<b>2</b>	<b>HALLIRAKENNUSTEN TULIPALOT .....</b>	<b>12</b>
2.1	HALLIRAKENNUSTEN PALOTURVALLISUUS.....	12
2.2	HALLIRAKENNUSPALOJEN OMINAISPIIRTEITÄ.....	13
2.3	HALLIRAKENNUSTEN PALOKUORMAT .....	14
<b>3</b>	<b>OLETETTU PALONKEHITYS .....</b>	<b>15</b>
3.1	OLETETUN PALONKEHITYKSEN PERIAATTEITA .....	15
3.2	RISKI JA TAPAHTUMAPUU .....	16
3.3	MITOITUSPALO .....	17
<b>4</b>	<b>PALAMISEN FYSIKAALISTA KEMIAA .....</b>	<b>19</b>
4.1	TULIPALO JA PALAMINEN .....	19
4.2	PALON KEHITTYMINEN .....	20
4.3	SAVUN TUOTTO TULIPALOSSA .....	23
4.4	PALAMISNOPEUS JA PALOTEHO.....	24
4.5	PALOKUORMA .....	30
4.6	PALOA KUVAAVAT YLEISET MUUTTUJAT .....	33
<b>5</b>	<b>VYÖHYKEMALLIT .....</b>	<b>36</b>
5.1	DETERMINISTISET MALLIT .....	36
5.2	KAKSIVYÖHYKEMALLI .....	37
5.3	CFAST –VYÖHYKEMALLIOHJELMISTO.....	39
<b>6</b>	<b>PALOPATSASMALLIT.....</b>	<b>40</b>
6.1	PALOPATSAS.....	40
6.2	LUONNOLLISTEN PALOJEN LIESKAT .....	41
6.3	HASEMIN KATTOSUIHKUMALLI.....	43
6.4	ALPERTIN KATTOSUIHKUMALLI.....	46
<b>7</b>	<b>NIMELLISET AIKA-LÄMPÖTILAKÄYRÄT .....</b>	<b>48</b>
7.1	EN 1363-1 –STANDARDIN AIKA-LÄMPÖTILAKÄYRÄ.....	48

	7.2	RAKENNUSOSAN PALOLUOKKA .....	49
<b>8</b>		<b>LÄMMÖNSIIRTYMISMEKANISMIT.....</b>	<b>51</b>
	8.1	JOHTUMINEN .....	51
	8.2	KULJETTUMINEN .....	52
	8.3	SÄTEILY .....	53
<b>9</b>		<b>TERÄKSEN OMINAISUUDET KORKEISSA LÄMPÖTILOISSA... 56</b>	
	9.1	VIRUMINEN .....	56
	9.2	LÄMPÖPITENEMINEN .....	58
	9.3	TERÄKSEN JÄNNITYS-VENYMÄYHTEYS .....	60
	9.4	TERÄKSEN MUUT TERMISET OMINAISUUDET.....	65
<b>10</b>		<b>SUOJAAMATON TERÄS TULIPALOSSA .....</b>	<b>67</b>
	10.1	SUOJAAMATTOMAN TERÄSOSAN LÄMPIÄMINEN .....	67
	10.2	TERÄSPUTKIRISTIKON LÄMPÖTILAJAKAUMA.....	72
	10.3	ANALYYTTINEN PALOMALLI.....	73
	10.4	TERÄSOSAN LÄMPIÄMINEN PAIKALLISESSA PALOSSA.....	75
<b>11</b>		<b>KYLMÄMUOVATUT TERÄSPUTKET .....</b>	<b>82</b>
	11.1	RAUTARUUKIN EN 10219 -PUTKIPALKIT .....	82
	11.2	MUOKKAUSLUJITTUMINEN .....	82
<b>12</b>		<b>TERÄSPUTKIRISTIKON PALOMITOITUS.....</b>	<b>84</b>
	12.1	PALOMITOITUSRUTIINI .....	84
	12.2	TERÄSOSAN KRIITTINEN LÄMPÖTILA .....	86
	12.3	STAATTISEN SYSTEEMIN VAIKUTUS .....	90
	12.4	PALOTILANTEEN RAJATILAT .....	92
	12.5	TERÄSPUTKIRISTIKON PALONKESTÄVYYDEN PARANTAMINEN .....	94
	12.6	WINRAMI –TERÄSRAKENTEIDEN MITOITUSOHJELMISTO .....	96
<b>13</b>		<b>LIITOSTEN PALOMITOITUS.....</b>	<b>97</b>
	13.1	LIITOSALUEEN LÄMPENEMINEN TULIPALOSSA.....	97
	13.2	LIITOSTEN GEOMETRISET EHDOT JA KESTÄVYYSEHDOT .....	98
	13.3	HITSI- JA RUUVILIITOSTEN PALOMITOITUS.....	100
<b>14</b>		<b>ESIMERKKI.....</b>	<b>101</b>
<b>15</b>		<b>JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>109</b>
<b>16</b>		<b>LÄHDELUETTELO .....</b>	<b>111</b>

## KÄYTETTYJEN LATINALAISTEN SYMBOLIEN MERKITYS

$a$	on lämpötilanjohtavuus; parametri
$b$	on poikkileikkauksen leveys; parametri
$c$	on parametri
$c_p$	on ominaislämpökapasiteetti
$c_\theta$	on kerroin $0,0275 \text{ m}^{5/3} \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}^{2/3}$
$e$	on liitoksen epäkeskisyys
$f_{p,\theta}$	on teräksen suhteellisuusraja
$f_y$	on teräksen myötöraja
$f_{y,\theta}$	on teräksen tehollinen myötöraja
$g$	on maan vetovoiman kiihtyvyys $9,81 \text{ m/s}^2$
$h$	on poikkileikkauksen korkeus
$\dot{h}$	on lämpövuoto
$h_{\text{eq}}$	on palotilan pystysuuntaisten aukkojen keskikorkeus
$\dot{h}_{\text{net,c}}$	on kuljettumisen nettolämpövuoto
$\dot{h}_{\text{net,d}}$	on nettolämpövuon mitoitusarvo
$\dot{h}_{\text{net,r}}$	on säteilyn nettolämpövuoto
$k$	on teräsosan kiinnitysaste
$k_{E,\theta}$	on kimmokerroin suhteessa $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilan arvoon
$k_{p,\theta}$	on suhteellisuusraja suhteessa myötörajaan $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa
$k_{\text{shadow}}$	on varjostusvaikutuksen korjaustekijä
$k_{y,\theta}$	on tehollinen myötöraja suhteessa myötörajaan $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa
$k_1$	on parametri
$l$	on teräsosan pituus $20 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötilassa
$\Delta l$	on lämpötilan aiheuttama lämpöpiteneminen
$m$	on massa; konvektiopotenssi
$\dot{m}$	on palamisnopeus

$\dot{m}''$	on palamisnopeus pinta-alayksikköä kohti
$\dot{m}_{\text{air}}$	on palotilaan tuleva ilmavirta
$\dot{m}_e$	on ympäröivästä ilmasta palopatsaaseen kulkeutuva massavirta
$\dot{m}_L$	on savupatjan massan muutosnopeus
$\dot{m}_p$	on massavirta palopatsaasta savupatjaan
$\dot{m}_u$	on savupatjasta huoneen aukkojen kautta poistuva massavirta
$q_{f,k}$	on palokuorman tiheyden ominaisarvo lattiapinta-alaa kohti, [ $q_{f,k}$ ] = MJ/m <sup>2</sup>
$q_{t,k}$	on palokuorman tiheyden ominaisarvo sisävaipan pinta-alaa kohti, [ $q_{t,k}$ ] = MJ/m <sup>2</sup>
$r$	on koordinaatti
$r_0$	on teräsputken nurkan ulkopyöristyssäde
$r_1$	on teräsputken nurkan sisäpyöristyssäde
$t$	on aika; ainevahvuus
$t_{\text{cr}}$	on kriittinen aika
$t_{\text{fi,d}}$	on rakennusosan palonkesto-aika
$t_{\text{fi,requ}}$	on rakennusosalta vaadittu palonkesto-aika
$t_g$	on referenssipalotehon saavuttamiseen tarvittava ominaiskasvu-aika
$t_1$	on täyden palon vaiheen alkamiseen kuluva aika
$t_2$	on palon hiipumisen alkamiseen kuluva aika
$u$	on muuttuja
$x$	on normalisoitu etäisyys; koordinaatti
$y$	on koordinaatti
$z$	on koordinaatti
$z'$	on palolähteen virtuaalisen origon määrittävä koordinaatti
$A$	on pinta-ala; lyhennysmerkintä
$A_f$	on polttoaineen pinta-ala; palotilan lattiapinta-ala



$A_m$	on suojaamattoman teräsosan palolle altis vaipan pinta-ala
$A_t$	on palotilan sisävaipan pinta-ala
$A_v$	on palotilan pystysuuntaisten aukkojen pinta-ala
$Bi$	on Biotin luku
$C$	on lyhennysmerkintä
$D$	on palopatsaan karakteristinen mitta
$E$	on säteilyvoimakkuus
$E_a$	on teräksen kimmokerroin
$E_{a,\theta}$	on lineaarisen kimmoisen alueen alkukimmokerroin
$\dot{E}_c$	on kaasusta seiniin ja kattoon konvektiivisesti siirtyvä lämpöenergiavuo
$E_d$	on normaalilämpötilan rasitus
$E_{fi,d}$	on palotilanteen rasitus
$\dot{E}_L$	on savupatjan energian muutosnopeus
$\dot{E}_{LR}$	on savupatjan säteilyteho
$\dot{E}_p$	on palopatsaan lämpöenergiavuo
$\dot{E}_u$	on lämpöenergiavuo huoneen aukoista ulos
$Fr$	on Frouden luku
$G_k$	on pysyvän kuorman ominaisarvo
$H$	on korkeus, myös $H_B$ , $H_C$ ja $H_W$
$\Delta H_c$	on kaasun alempi palamislämpö
$H_u$	on tehollinen lämpöarvo, $[H_u] = \text{MJ/kg}$
$H_{u,0}$	on kuivan materiaalin lämpöarvo, $[H_{u,0}] = \text{MJ/kg}$
$L$	on jänneväli
$L_f$	on lieskan korkeus
$L_{HB}$ , $L_{HC}$	on taipuvien lieskojen vaakasuora pituus
$L_v$	on pyrolysoitumislämpö
$M$	on materiaalin kosteuspitoisuus
$N$	on dimensioton parametri

$Q$	on kokonaislämpöenergiämäärä; lämmöntuotto
$Q_{fi,k}$	on palokuorman ominaisarvo
$Q_{k,1}$	on määrävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
$\dot{Q}$	on paloteho
$\dot{Q}^*$	on laaduton paloteho, myös $\dot{Q}_D^*$ , $\dot{Q}_{HB}^*$ ja $\dot{Q}_{HC}^*$
$\dot{Q}_c$	on konvektiivinen paloteho
$\dot{Q}_F''$	on liekistä tuleva lämpövuoto
$\dot{Q}_L''$	on polttoaineen pinnasta lähtevä lämpövuoto
$\dot{Q}_0$	on referenssipaloteho, joka Eurocoden 1991 osassa 1-2 on 1 MW
$R_d$	on kestävyys normaalilämpötilassa
$R_{fi,d,0}$	on kestävyys palotilanteen alussa
$S$	on piiri; ilman ja polttoaineen massan suhde stokiometrisessä reaktiossa
$V$	on tilavuus

## KÄYTETTYJEN KREIKKALAISTEN SYMBOLIEN MERKITYS

$\alpha$	on kokonaislämmönsiirtokerroin
$\alpha_a$	on teräksen pituuden lämpölaajenemiskerroin
$\alpha_c$	on kuljettumisen lämmönsiirtokerroin
$\alpha_r$	on säteilyn lämmönsiirtokerroin
$\chi$	on palamisen tehokkuuskerroin; nurjahduskestävyyden pienennystekijä
$\chi_{fi}$	on nurjahduskestävyyden pienennystekijä palotilanteessa
$\chi_r$	on palotehon säteilevä osuus
$\dot{\delta}$	on taipumanopeus, [ $\dot{\delta}$ ] = mm/min
$\varepsilon$	on emissiivisyys; venymä
$\varepsilon_f$	on tulipalon emissiivisyys
$\varepsilon_m$	on kappaleen pinnan emissiivisyys
$\varepsilon_{p,\theta}$	on suhteellisuusrajaa vastaava venymä

$\varepsilon_{\text{res}}$	on resultoiva emissiivisyys
$\varepsilon_{t,\theta}$	on myötörajaa vastaava rajavenymä
$\varepsilon_{u,\theta}$	on murtovenymä
$\varepsilon_{y,\theta}$	on myötövenymä
$\gamma_G$	on pysyvän kuorman osavarmuuskerroin
$\gamma_{GA}$	on pysyvän kuorman palotilanteen osavarmuuskerroin
$\gamma_{M,fi}$	on teräksen materiaalin palotilanteen osavarmuuskerroin
$\gamma_{Q,1}$	on määrävän muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin
$\eta_{fi}$	on palotilanteen kuormitussuhde
$\eta_p$	on kuormalavapinon ilmarakojen osuuden huomioiva kerroin 0,33
$\lambda$	on lämmönjohtavuus
$\mu$	on teräsosan käyttöaste
$\mu_0$	on teräsosan palotilanteen käyttöaste palon alussa
$\mu_{\text{max}}$	on teräsosan palotilanteen maksimikäyttöaste
$\theta$	on lämpötila
$\rho$	on tiheys
$\sigma$	on Stefan-Boltzmannin vakio $5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
$\sigma_a$	on teräksen jännitys
$\tau$	on hiipumisaikavakio; lyhennysmerkintä
$\xi$	on määrävän muuttuvan kuorman ja pysyvän kuorman suhde
$\psi_{fi}$	on palotilanteen hyötykuormien yhdistelykerroin
$\psi_i$	on palokuorman suojauksen huomioiva kerroin
$\Phi$	on näkyvyyskerroin

# **1 JOHDANTO**

## **1.1 Ongelma**

Teräsrakentamisessa kohdataan usein ennakkoluuloja teräksen palonkestävyyden suhteen. Teräksen toimintaa ja kestävyyttä palotilanteessa on viime aikoina tutkittu melko paljon ja varsinkin Teräsrakenne todellisessa palossa –projekti tuotti lupaavia tuloksia. Myös oletettuun palonkehitykseen perustuva palotekninen mitoitus on ollut tutkimuksen kohteena, mihin liittyy Toiminnallisten palosäädösten tekniset perusteet –projekti. Paloteknisiä mitoitusmenetelmiä on kehitetty yhä enemmän todelliset palo-olosuhteet huomivaa mitoitusta kohti, jolloin kaikkia rakennuksia ei enää mitoiteta samalla palorasituksella. Tutkimustulosten pohjalta on kehitetty suunnitteluohjeita, joiden mukaisesti tuotettu teräsrakennusosa toteuttaa halutun turvallisuustason palotilanteessa. Tästäkin huolimatta erilaisten hallirakennusten kuten teollisuuden tuotantohallien sekä urheilu- ja monitoimihallien suojaamattomien teräsosien palonkestävyyteen suhtaudutaan konservatiivisesti ja teräsosiin vaaditaan erillinen palosuojaus. Tämä heikentää oleellisesti teräksen kilpailukykyä betonia ja puuta vastaan, koska teräksen palosuojauskustannukset muodostavat merkittävän osan tuotteen kokonaiskustannuksista.

## **1.2 Tutkimuksen taustaa**

Suomen rakentamismääräyskokoelman (SRMK) rakennusten paloturvallisuutta käsittelevän osan E1 uudistuksessa vuonna 1995 rakennusosien paloluokat muutettiin yleiseurooppalaisen käytännön mukaisiksi korvaamalla 10 minuutin palonkesto aika 15 minuutilla. Teräsputkiristikoiden tämä oli merkittävä muutos, koska niiden katsottiin kestävän ISO-834 –standardin aika-lämpötilakäyrän mukaisessa tulipalossa 10 minuuttia ilman paloteknistä tarkastelua. Tämä otaksutaan ei kuitenkaan enää päde 15 minuuttiin asti, vaan paloluokan R15 teräsputkiristikot joko ylimitoitettiin tai palosuojattiin. SRMK:n osan E1 uudistuksessa vuonna 1997 sallittiin osoittaa rakennusten paloturvallisuus taulukkomitoituksen ohella myös laskennallisesti oletettuun palonkehitykseen perustuen. Oletettuun palonkehitykseen perustuvassa palomitoituksessa osoitetaan laskennallisesti, että rakennus täyttää sille asetetut

vaatimukset koko tulipalon ajan aina palon syttymisestä jäähtymisvaiheen loppuun saakka. Tällä hetkellä oletettu palonkehitys esitetään vaihtoehtoisena ja tasavertaisena menetelmänä ISO-834 –standardin aika-lämpötilakäyrään perustuvan laskennallisen palomitoituksen rinnalla rakennusten sekä kantavien rakennusosien paloteknisessä mitoituksessa.

### **1.3 Tutkimuksen tavoitteet ja käytetyt normit**

Työn tavoitteena on selvittää suojaamattoman teräsputkiristikon palonkestävyyttä paikallisessa palossa oletettuun palonkehitykseen perustuen. Suomessa on tällä hetkellä voimassa kaksi rinnakkaista teräsrakenteiden suunnittelunormia: SRMK:n osa B7-1996 ja Eurocode 1993. Tässä työssä käytetään suunnittelunormina Eurocodea. Eurocode on kokonaisuudessaan yleiseurooppalainen suunnittelunormi, joka jossain vaiheessa syrjäyttää maakohtaiset suunnittelunormit Euroopassa. Jotkut Eurocoden osat ovat vielä esistandardivaiheessa, jolloin niitä merkitään tunnuksilla ENV tai prEN. Eurocodessa maakohtainen suunnittelun varmuustaso huomioidaan kansallisella liitteellä. Esistandardien kanssa käytetään kuitenkin esistandardien maakohtaisia soveltamisasiakirjoja. Käytännössä tulee usein tarve vertailla rinnakkaisia suunnittelunormeja keskenään, kun kysytään kumpi normi tuottaa edullisemmän rakenteen tai kumpi normi tuottaa paremman turvallisuustason. Vertailussa normeja pitää aina tarkastella kokonaisuutena, koska ne perustuvat erilaisiin suunnittelu- ja varmuusfilosofioihin. Vaikka normien mitoitusrutiinin välivaiheet tuottavat usein hyvinkin erilaisia välituloksia, niin laskennan lopputulokset ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan. Tässä työssä käsitellään pääasiassa poikkileikkausluokan 1 ja 2 kylmämuovattuja poikkileikkaukseltaan neliön- ja suorakaiteenmuotoisia teräsputkia, vaikka useimmat esitetyt asiat pätevät myös poikkileikkausluokan 3 teräsputkille sekä poikkileikkaukseltaan pyöreille teräsputkille.

## 2 HALLIRAKENNUSTEN TULIPALOT

### 2.1 Hallirakennusten paloturvallisuus

Paloturvallisuus tarkoittaa ensisijaisesti henkilöturvallisuutta, jolla pyritään turvaamaan rakennuksessa olevien henkilöiden ja pelastushenkilöstön turvallisuus palotilanteessa. Hallirakennuspaloissa poistumisturvallisuus riippuu useista tekijöistä, jotka liittyvät rakennukseen, tulipaloon, poistuviin henkilöihin ja pelastushenkilökuntaan. Väkilukuun suhteutettuna palokuoleman riski Suomessa on yksi teollisuusmaiden korkeimpia ja suurin osa kohtalokkaista tulipaloissa on rakennuspaloja. Suomessa ei kuitenkaan ole sattunut kuolemaan johtaneita hallirakennuspaloja viimeisten vuosikymmenten aikana (24,45). Palon syttyessä urheilu- ja monitoimihalleissa voi oleskella paljon ihmisiä, joista osa ei tunne rakennusta. Urheiluhallissa oleskelevien ihmisten voisi kuitenkin olettaa olevan liikuntakykyisiä, mutta urheiluhallit toimivat usein myös monitoimihalleina, jolloin siellä saattaa olla tapahtumasta riippuen huonokuntoisiakin ihmisiä. Teollisuuden tuotantohalleissa työskentelee rakennuksen kerrosalaan nähden melko vähän ihmisiä, jotka ovat työikäisiä ja liikuntakykyisiä sekä he tuntevat rakennuksen. Työntekijät usein myös koulutetaan palohälytyksen antamiseen, alkusammutukseen ja rakennuksesta poistumiseen. Ongelmia saattaa kuitenkin ilmetä palohälytyksen välittymisessä työntekijöille, koska tuotantohalleissa on usein kova melutaso ja työntekijät eivät välttämättä ole näköyhteydessä toisiinsa. Hakanen (15) tutki diplomityössään työntekijöiden poistumisturvallisuutta hallirakennuspaloissa. Työssä laskettujen poistumisaikojen perusteella kaikissa tutkituissa hallirakennuksissa poistuminen onnistui 15 minuutissa. Paloturvallisuus tarkoittaa toissijaisesti omaisuuden suojelua. Tulipalojen omaisuusvahingot jaetaan suoriin ja välillisiin omaisuusvahinkoihin. Suoriin omaisuusvahinkoihin kuuluvat rakennukselle ja irtaimistolle aiheutuvat vahingot ja välillisiin esimerkiksi toiminnan keskeytyksestä aiheutuvat kustannukset (46). Varsinkin teollisuuden tuotantohalleissa välillisten vahinkojen osuus taloudellisista kokonaisvahingoista on merkittävä. Rakennuspalojen taloudellisten vahinkojen on todettu kasvavan palo-osastojen koon mukana. Hallirakennusten palo-osastot ovat suuria, joten niiden paloissa on myös odotettavissa huomattavat taloudelliset vahingot (72). Omaisuusvahinkojen lisäksi

tulipaloista aiheutuu palontorjuntakustannuksia, joihin kuuluvat esimerkiksi palokuntien ylläpito. Palontorjuntakustannukset ovat samaa suuruusluokkaa kuin suorat omaisuusvahingot. Rakennuspalojen vaikutusten ulottuvuus on erittäin laaja. Teollisuusrakennusten paloturvallisuuden eräs motiivi onkin työllisyys, koska rakennuspaloissa aiheutuu usein keskeytyksiä tuotantoon tai tuotanto voidaan joutua jopa lopettamaan kokonaan, jolloin ihmisiä jää työttömiksi (46).

## **2.2 Hallirakennuspalojen ominaispiirteitä**

Hallirakennuksille on tyypillistä suuri kerrosala ja suuri vapaa korkeus, jolloin niiden palo-osastot ovat pinta-alaltaan ja tilavuudeltaan suuria. Hallirakennuspalo kehittyykin yleensä eri tavoin kuin huonepalo. Suuressa palo-osastossa palotilan lämpötila kehittyy hitaammin kuin pienessä, koska jäähdyttävää ilmaa on paljon saatavilla ja rakennuksen irtaimiston sekä pintamateriaalien lämpenemiseen kuluu paljon lämpöenergiaa. Pienen palokuorman omaavissa halleissa palo tyypillisesti palaakin paikallisena palona leviämättä koko palo-osastoon. Suuren palokuorman omaavissa halleissa palo voi suuresta palo-osastosta huolimatta lieskahtaa, jolloin palo etenee kuten huonepalossa. Urheiluhallit rakennetaan harjoittelu- sekä myös kilpailukäyttöön, joten ne ovat tilaohjelmaltaan selkeitä. Monitoimihallit taas rakennetaan näyttely- ja kokouskäyttöön, joten ne voivat olla tilaohjelmaltaan sokkeloisia. Siten paloturvallisuuden kannalta urheilu- ja monitoimihallit poikkeavat toisistaan. Urheiluhallit ovat yleensä kaarihalleja, joissa vapaa korkeus on kaaren keskellä suuri ja reunoilla pieni. Urheiluhallien suuri avara tila on paloturvallisuuden suhteen turvallisempi kuin sokkeloinen rakennus. Avarassa tilassa palo havaitaan nopeasti ja rakennuksesta poistuminen on helpompaa. Kuitenkin suuren ihmismäärän poistuminen mahdollisista katsomoista voi kestää kauan. Avaraan ja korkeaan tilaan mahtuu myös paljon savua ilman, että savu haittaa oleellisesti poistumista, jolloin poistumiseen on myös käytettävissä enemmän aikaa (36). Teollisuuden tuotanto- ja varastohallit ovat pääasiassa yksikerroksisia, jolloin palotilanteessa kattorakenteiden sortuminen ei aiheuta vaaraa ylemmille kerroksille. Teollisuuden tuotanto- ja varastohalleissa suurin osa omaisuudesta on sidottu tuotantolaitteisiin tai varastoitavaan tavarahan, jolloin itse rakennuksen osuus uhatusta omaisuudesta on pieni. Jos kaikki tuotantolaitteisto ja varastoitu materiaali on palanut ei rakenteiden

sortuminen enää aiheuta kohtuuttomasti lisää omaisuusvahinkoa. Tilastoista on havaittu rakennuspalojen syttymistodennäköisyyden olevan suoraan verrannollinen rakennuksen kerrosalaan rakennusmateriaaleista riippumatta. Suomessa syttyy joka vuosi noin 12000 tulipaloa, joista neljännes on rakennuspaloja. Taulukkoon 1 on poimittu rakennuspalojen lukumääriä vuosilta 1996-1999 (38,44,46,71).

**Taulukko 1**

OTOS KELVOLLISISTA RAKENNUSPALOHAVAINNOISTA VUOSILTA 1996-1999 (71)

Käyttötaluokka	1996	1997	1998	1999
Teollisuusrakennukset	315	230	253	240
Varastorakennukset	126	110	91	78

### 2.3 Hallirakennusten palokuormat

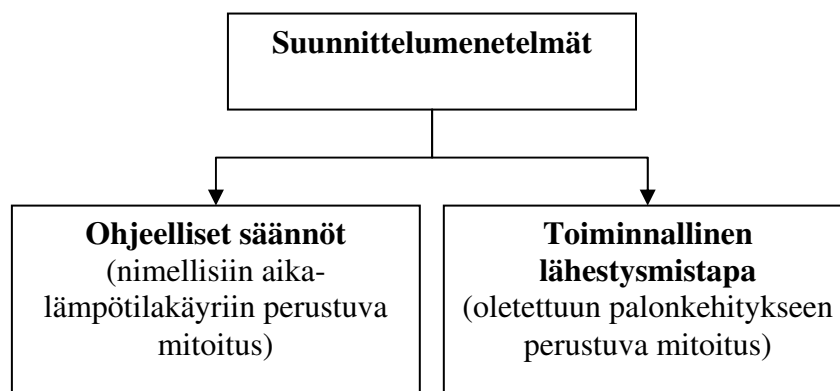
Thorin ja Sedinin vuonna 1979 julkaisemassa tutkimuksessa esitettiin palotilan sisävaipan mukaan laskettujen palokuorman tiheyden ohjearvoja palon etenemiselle. Jos palokuorman tiheys on alle 50 MJ/m<sup>2</sup>, niin pääosa rakennuksen palovaurioista aiheutuu savusta. Jos palokuorman tiheys on välillä 50...400 MJ/m<sup>2</sup>, niin palon kehitys on hidasta, jolloin palokunta ehtii paikalle ennen lieskahtamista. Jos palokuorman tiheys on yli 500 MJ/m<sup>2</sup>, niin palotila lieskahtaa ennen kuin palokunta ehtii paikalle (38). Urheiluhallin palokuorma on yleensä melko pieni ja se sijaitsee pääosin rakenteissa sekä paikallisesti varasto-, sosiaali- ja muissa aputiloissa, jotka muodostavat omat palo-osastot (36). Juhola (23) on diplomityössään tutkinut teollisuushallien palokuormia. Tutkituista tuotantohalleista 73 %:ssa palokuorman tiheys oli korkeintaan keskisuuri, jolloin palokuormaa oli niin vähän, että paikallisesti syttynyt tulipalo pääsee leviämään vain rajalliselle alueelle ennen kuin se joko sammuu itsekseen tai se saadaan sammutettua ennen lieskahdusta. Tutkituista varastohalleista 75 %:ssa palokuorman tiheys oli suuri, jolloin palokuormaa oli niin paljon, että tulipalo voidaan otaksua paikalliseksi vain varastoissa, joissa varastoidaan pääosin palamattomia materiaaleja.



### 3 OLETETTU PALONKEHITYS

#### 3.1 Oletetun palonkehityksen periaatteita

Eurocodessa rakenteiden palotekniset suunnittelumenetelmät jaetaan kahteen rinnakkaiseen ja tasavertaiseen ryhmään: ohjeellisiin sääntöihin ja toiminnalliseen lähestymistapaan. Ohjeelliset säännöt perustuvat nimellisiin aika-lämpötilakäyriin ja toiminnallinen lähestymistapa oletettuun palonkehitykseen. Jakoa havainnollistetaan kuvassa 1. Oletettuun palonkehitykseen perustuvalla suunnittelulla tarkoitetaan tässä työssä paloteknistä suunnittelua, joka perustuu polttokokeilla hankittuun tietoon palonkehityksestä. Tältä osin termit eivät ole vielä vakiintyneet, vaan kirjallisuudessa esiintyy useita eri käsitteitä, joilla tarkoitetaan tätä samaa asiaa. Toiminnallisessa lähestymistavassa kaikki oletukset ja laskelmat perustuvat samaan teoriataustaan ja yhtenäiseen logiikkaan (35).



**Kuva 1. Eurocoden paloteknisten suunnittelumenetelmien jako.**

Paloteknisen erityissuunnittelun ohjeissa lähteessä (35) esitetään, että käytettäessä rakennuksen paloteknisessä suunnittelussa toiminnallista lähestymistapaa, niin:

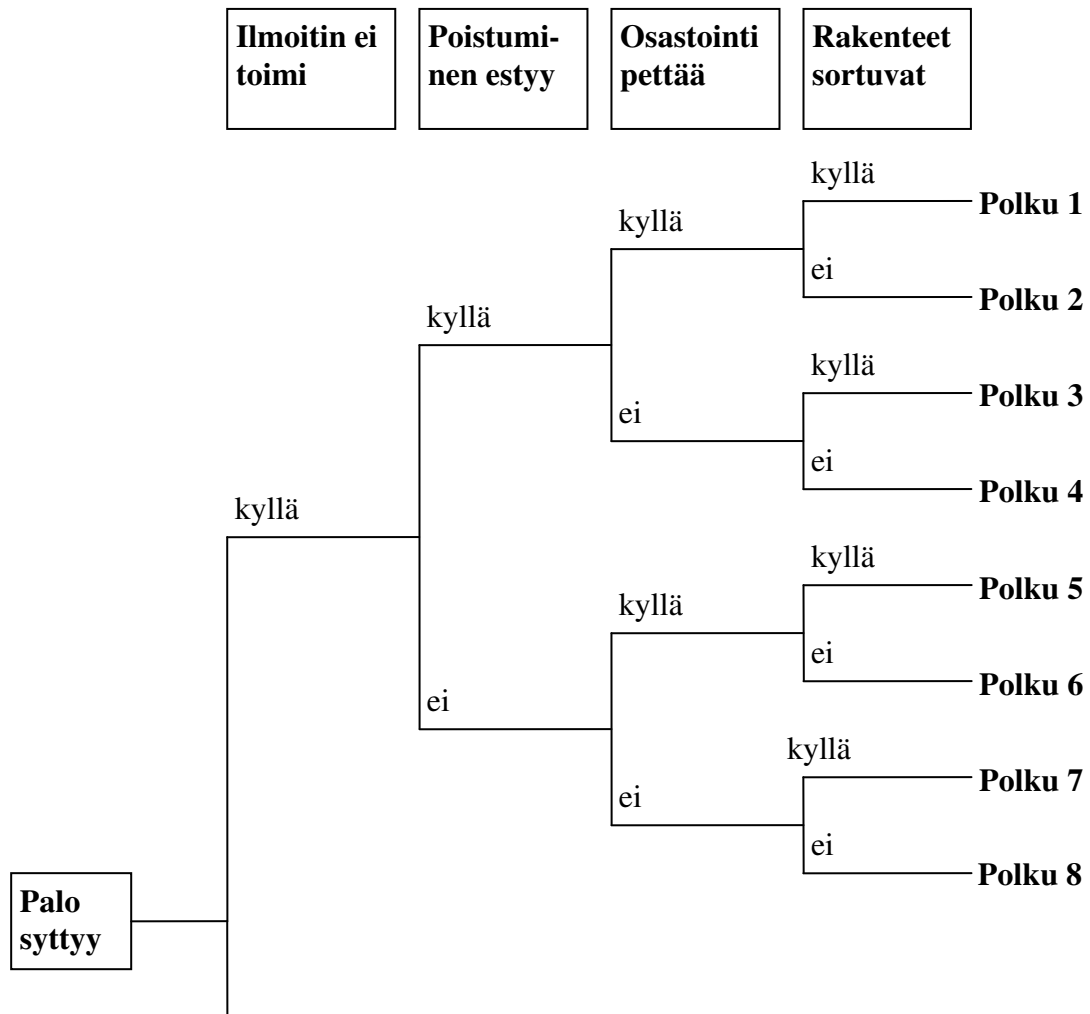
- P1-luokan rakennuksen kantavien rakenteiden tulee kestää koko palokuorman palaminen ilman sammuttamista.
- P2-luokan rakennusten tulee kestää vähintään 30 minuuttia sortumatta.
- P3-luokan rakennuksissa palonkesto aika määräytyy sammutus- ja pelastustoimintaan tarvittavasta ajasta.

SRMK:n osan E1-2002 mukaan rakennus tai sen rakennusosat eivät palon vaikutuksesta saa sortumalla aiheuttaa vaaraa määrättyä aikana palon alkamisesta. Lisäksi jos henkilöturvallisuuden tai vahinkojen suuruuden suhteen on tarpeellista, niin rakennuksen on kestettävä sortumatta koko palokuorman palaminen ja jäähtyminen. Kun kantavien rakenteiden mitoitus perustuu toiminnalliseen lähestymistapaan, niin rakennusta pidetään niiden osalta riittävän turvallisena, jos yli kaksikerroksinen rakennus ei sorru palon eikä jäähtymisvaiheen aikana tai jos korkeintaan kaksikerroksinen rakennus ei sorru poistumiseen, pelastustoimintaan ja palon hallintaan saamiseen tarvittavana aikana (66).

SRMK:n osan E1-2002 mukaan kantavien rakenteiden tulee palotilanteessa kestää niille asetetun vähimmäisajan (66). Oletettuun palonkehitykseen perustuva kantavien rakenteiden palomitoitus on melko uusi menetelmä, joten siitä ei ole pitkäaikaisia käytännön kokemuksia. Paloteknisen erityissuunnittelun ohjeissa lähteessä (35) esitetäänkin, että oletettuun palonkehitykseen perustuva kantavien rakenteiden palomitoitus rajoitettaisiin suuriin tiloihin, joissa palokuorma on pieni suhteessa palo-osaston tilavuuteen. Lisäksi ohjeissa todetaan, että puolen tunnin paloajan jälkeen saatuihin lämpötiloihin tulee suhtautua suurella varauksella.

### **3.2 Riski ja tapahtumapu**

Riski on tapahtuman todennäköisyyden ja vahinkoarvon tulo, jolloin kokonaisriski arvioidaan summaamalla yksittäisten tapahtumien riskit (30). Riskianalyysissä tunnetaan yleensä yksittäisten tapahtumien vahinkoarvot, mutta tapahtumien todennäköisyyksien arvioiminen on vaikeaa. Tulipaloon johtavien tapahtumien kulkua sekä tulipalon etenemistä sen syttyessä kuvataan tapahtumapuulla. Tapahtumapuun syötteeseen kerätään kaikki oletetut tapahtumapolut sekä yksittäisten tapahtumien todennäköisyydet ja niiden vahinkoarvot. Tapahtumapuun tulosteena saadaan eri polkujen tai niiden osien riskit (30). Kuvassa 2 on esimerkki tapahtumapuusta, jossa edetään vasemmalta oikealle lähtien liikkeelle palon syttymisestä. Tapahtumapuun kaikki polut eivät yleensä ole mahdollisia tai niiden tapahtumatodennäköisyys on erittäin pieni, jolloin tarkastelun laajuudesta ja kohteen turvallisuustasosta riippuen osa poluista voidaan jättää tarkastelun ulkopuolelle.



**Kuva 2. Esimerkki tulipalon kuvaamisesta tapahtumapuulla (30).**

### 3.3 Mitoituspalo

Mitoituspalo on tulipalo, jonka koko, kasvunopeus, paloteho ja sijainti ovat sellaiset, että sen vaikutus ihmisiin ja omaisuuteen palotilassa on mitoittava. Mitoituspalo ei vastaa tilastollisesti keskimääräistä palotilassa odotettavissa olevaa tulipaltoa, vaan se on voimakkaampi kuitenkin palotilaan nähden realistinen tulipalo, joka johtaa turvallisella puolella olevaan mitoitukseen (40). Mitoituspalo valitaan palotilanteen mukaan ja valinta voi pohjautua riskianalyysiin, suunnitteluohjeisiin tai tilastoihin. Tarkasteltavia palotilanteita voidaan vähentää poistamalla vain vähäistä tuhoa aiheuttavat sekä erittäin pienen tapahtumistodennäköisyyden omaavat palotilanteet. Tarkastelussa huomioidaan myös palontorjuntajärjestelmien vaikutus palon

syttymiseen ja kehittymiseen. Lähteen (30) mukaan tarkastelu tulisi suorittaa myös siten, että jonkun paloturvallisuusjärjestelmän oletetaan olevan osittain tai kokonaan toimintakyvytön. Tällä menettelyllä voi olla kuitenkin huonot seuraukset. Jos suunnittelussa saavutetaan riittävä turvallisuustaso ilman savunpoistojärjestelmää, niin järjestelmä saatetaan jättää kustannusten minimoinnin takia pois. Laskentaa varten mitoituspalo kuvataan palotehokäyrällä. Taulukossa 2 on mitoituspaloja urheiluhallin kantavien teräsrakenteiden analysointiin. Mitoituspalo sijoitetaan tarkasteltavan seikan mukaan. Poistumisturvallisuuden kannalta poistumisteiden lähellä oleva palo on yleensä vaarallisempi kuin keskellä rakennusta oleva palo ja rakenteiden kannalta paikallinen palo voi olla paljon vaarallisempi kuin palotilan keskimääräinen lämpiäminen. Mitoituspaloa sovelletaan yhteen palotilaan kerrallaan ellei palotilanne toisin vaadi (9). Hallirakennuksen mitoituspalojen valinnassa tulisi myös ennakoida mahdollinen pääkäyttötarkoituksesta poikkeava toiminta ja siitä aiheutuvat palotilanteet. Esimerkiksi pienillä paikkakunnilla paikkakunnan ainoaa urheiluhallia käytetään yleensä monitoimihallina (35). Laskennan tulosten turvallisuustason tarkastelua varten asetetaan määrälliset hyväksymiskriteerit (30). Herkkyysanalyysissä selvitetään aiheuttavatko pienet muutokset laskelmien oletuksissa merkittäviä muutoksia paloturvallisuudessa, jolloin herkkyysanalyysissä laskelmat toistetaan vaihtelemalla yksittäisen lähtöarvosuureen arvoa (66).

**Taulukko 2**

MAHDOLLISIA MITOITUSPALOJA URHEILUHALLIN TERÄSOSIEN ANALYSOINTIIN (40)

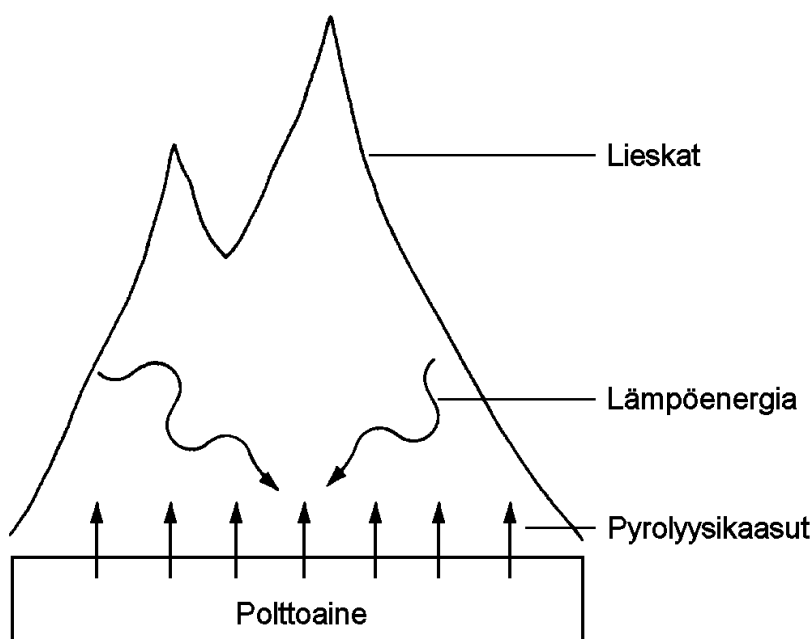
Palava kohde	Palo- kuorma	Ominais- kasvu- aika	Maksimi- paloteho	Hiipumis- aika- vakio	Karakte- ristinen mitta
	$Q$	$t_g$	$\dot{Q}_{\max}$	$\tau$	$D$
	MJ	s	MW	s	m
Puutapuli 500 kg	7800	600	3,5	1500	2
Messukoju	8500	150	13,9	430	3
Huoltoajoneuvo	6800	600	7,0	300	3

## 4 PALAMISEN FYSIKAALISTA KEMIAA

### 4.1 Tulipalo ja palaminen

Palamisen perusedellytykset ovat happi, palava materiaali eli polttoaine, syttymiseen riittävä lämpötila ja häiriintymätön ketjureaktio palamisreaktion jatkumiseen. Palamisreaktio voi olla hallittu tai hallitsematon. Hallitsematonta palamisreaktiota kutsutaan tulipaloksi. Tulipalolle on ominaista, että osa palamisessa vapautuneesta lämpöenergiasta siirtyy takaisin palamisreaktioon, jolloin palamisreaktio kiihtyy (3). Tätä seikkaa havainnollistetaan kuvassa 3. Kansainvälinen standardointijärjestö (ISO) esittää tulipalon määritelmässään vuodelta 1987, että tulipalossa (3):

- i Palamiselle on ominaista lämpöenergian säteily, johon liittyy savun ja mahdollisesti lieskan muodostuminen,
- ii Palaminen leviää hallitsemattomasti ajan ja paikan funktiona.



**Kuva 3. Palamisreaktiossa vapautuneen lämpöenergian palautuminen (55).**

Vaikka tulipalon energiantiheys on hallittuihin palamisprosesseihin verrattuna pieni, niin tulipalon kokonaisteho voi olla erittäin suuri. Tämä johtuu tulipalon liekkimeren laajuudesta (25). Eri palamisprosessien energiantiheys on esitetty taulukossa 3.

### Taulukko 3

ERI PALAMISPROSESSIEN ENERGIATIHEYKSIÄ (3, SUOM. KESKI-RAHKONEN)

<b>Palamisprosessi</b>	<b>Energiatiheys</b> MW/m <sup>3</sup>
Lentokoneen suihkumoottori nousun aikana	1500
Kaasukäyttöinen lämmityskattila	200
Bensiinimoottori	100
Jauhettua kivihiiltä polttava kattila	10
Tulipalo	0,5

Kaasumaisen polttoaineen palamisessa erotetaan kaksi eri palamistapaa (5):

- i esisekoittunut liekki, jossa polttoaine ja happi ovat sekoittuneet keskenään ennen palamista.
- ii diffuusioliikki, jossa polttoaine ja happi ovat aluksi erillään toisistaan, mutta palavat samassa tilassa, missä ne sekoittuvatkin.

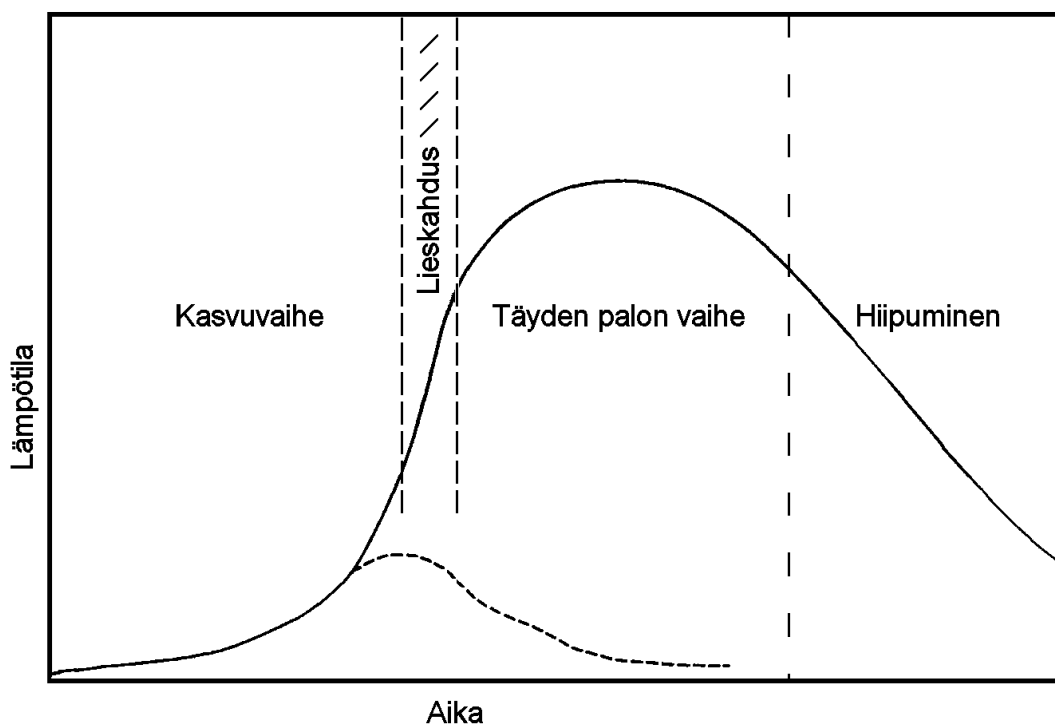
Kaasusuihkujen lisäksi myös nesteet ja jähmeät aineet palavat diffuusioliemillä (5). Diffuusioliemissä palaminen on epätäydellistä (46).

#### 4.2 Palon kehittyminen

Tulipalosta käytetään termiä huonepalo, kun palotilan tilavuus on luokkaa 100 m<sup>3</sup>. Huonepaloa kuvaavien palomallien käyttö rajataankin palavan tilan pinta-alan ja korkeuden mukaan. Eurocodessa esitetyn Wickströmin huonepalomallin käyttö rajoitetaan palotiloihin, joiden kerrosala on enintään 500 m<sup>2</sup> ja korkeus enintään 4 m (9). Huonepalossa lämpötilan kehittyminen jaetaan kolmeen vaiheeseen (55):

- kasvuvaihe,
- täyden palon vaihe ja
- hiipuminen.

Huonepalossa lämpötilan kehittymisen vaiheet esitetään kuvassa 4.



**Kuva 4. Huonepalon lämpötilan kehittymisen vaiheet (5).**

Tulipalon syttyessä saatavilla on riittävästi happea, joten palon kehittyminen riippuu palokuorman ominaisuuksista ja määrästä. Tulipalon kasvuvaiheessa palaminen on vielä paikallista ja palavan tilan keskimääräinen lämpötila melko alhainen. Kasvuvaiheessa lämpöenergiaa siirtyy palolähteestä ympäristöön savukaasujen mukana kuljettumalla ja säteilyinä. Jos palon leviämiseen ei ole saatavilla riittävästi palokuormaa tai jos palotilaan ei kulkeudu riittävästi happea, niin palo ei välttämättä kehity tästä pidemmällä ja palo saattaa hiipua itsekseen ilman huonetilan lieskahdusta. Tämä polku esitetään katkoviivalla kuvassa 4 (43). Kasvuvaiheessa palolähteestä kulkeutuu palokaasuja palavan tilan yläosaan, johon muodostuu erittäin sakea kuumien palokaasujen ja savuhiukkasten muodostama kaasukerros, jota kutsutaan savupatjaksi. Kasvuvaiheen edetessä savupatja paksuntuu, jolloin sen alareuna laskeutuu kohti palotilan lattiaa. Jos palotilassa ei ole savunpoistoa, niin savupatja kuumenee koko ajan palon edetessä ja säteilee lämpöenergiaa palotilan muihin pintoihin (43).

Kun savupatjan lämpötila on kohonnut noin 500...600 °C:een, niin savupatjan säteilyteho riittää sytyttämään palotilassa olevat vielä syttymättömät materiaalit, jolloin ensin savupatjassa ja muualla palotilassa olevat palamattomat kaasut syttyvät nopeasti palamaan, minkä seurauksena kaikki palotilassa oleva palokuorma syttyy palamaan. Tätä hetkellistä välivaihetta kutsutaan lieskahdukseksi, jota seuraa täyden palon vaihe (43,38). Pohjoismaisen rakentamismääräyskokoelman (NKB) ohjeissa 1994:07 on esitetty lieskahdukseen riittäväksi savupatjan säteilytehoksi 15 kW/m<sup>2</sup>. Täyden palon vaiheessa palon lämmönvapautumisnopeus eli paloteho on likimain vakio, koska kaikki palamiskykyinen materiaali palaa. Täyden palon vaiheessa palotilan lämpötila voi olla yli 1000 °C:ta.

Palokuorman loppuessa palo alkaa hiipua. Myös hapen saannin loppuminen saattaa johtaa hiipumiseen, mutta jos happea on ollut riittävästi saatavilla lieskahdukseen, niin sen virtaus on luultavasti riittävä palon loppuun saakka ellei tulipalon sammutuksessa estetä hapen virtausta palotilaan. Vaikka hiipumisessa palotilan keskimääräinen lämpötila laskee, niin palamisessa vapautuu vielä huomattavasti lämpöenergiaa (43).

Tulipalosta käytetään termiä suuren tilan palo, kun palotilan tilavuus on yli 1000 m<sup>3</sup> (5). Suuren tilan palossa syttymisvaihe etenee yleensä samoin kuin huonepalossakin, mutta suuren tilan palossa mittasuhteet ovat suuremmat, jolloin tilan korkeudesta ja tilavuudesta johtuen savupatjan muodostuminen on hitaampaa. Suuressa tilassa savupatja myös jäähtyy nopeammin, koska palokaasujen kulkema matka on pidempi, jolloin palopatsaaseen kulkeutuu enemmän viileämpää ilmaa ja savupatja leviää suuremmalle alueelle, jolloin sen lämpöenergiaa säteilevä pinta-ala kasvaa. Suuren tilan paikallinen palo voi edetä syttymisen jälkeen kolmella eri tavalla (5):

- i Jos paikallisesti syttynyt palo ei pääse leviämään, niin se voi palavan materiaalin loputtua sammua itseksensä.
- ii Jos palotilassa on riittämätön ilmanvaihto, niin tulipalo voi sammua hapen puutteeseen tai palaa hitaasti happirajoitteisena palona.
- iii Jos palotilassa on riittävästi helposti syttyvää palokuormaa ja riittävä ilmanvaihto, niin palo voi kehittyä tädeksi huonepaloksi.



Suuressa tilassa on yleensä riittävästi happea palon kehittymiseen, mutta siellä on vähän palokuormaa, joka lisäksi sijaitsee paikallisesti eri puolilla palotilaa. Palon kehittyminen suuren tilan palossa on siten hitaampaa kuin huonepalossa (4). Suuren tilan palon kehittyminen lieskahduksen kautta täyden palon vaiheeseen on melko harvinaista. Toisaalta teollisuuden varastorakennuksessa saattaa olla paljon palokuormaa esimerkiksi korkeavarastoituna, jolloin palon kehittyminen paikallisesta palosta täyden palon vaiheeseen voi olla erittäin todennäköistä.

### **4.3 Savun tuotto tulipalossa**

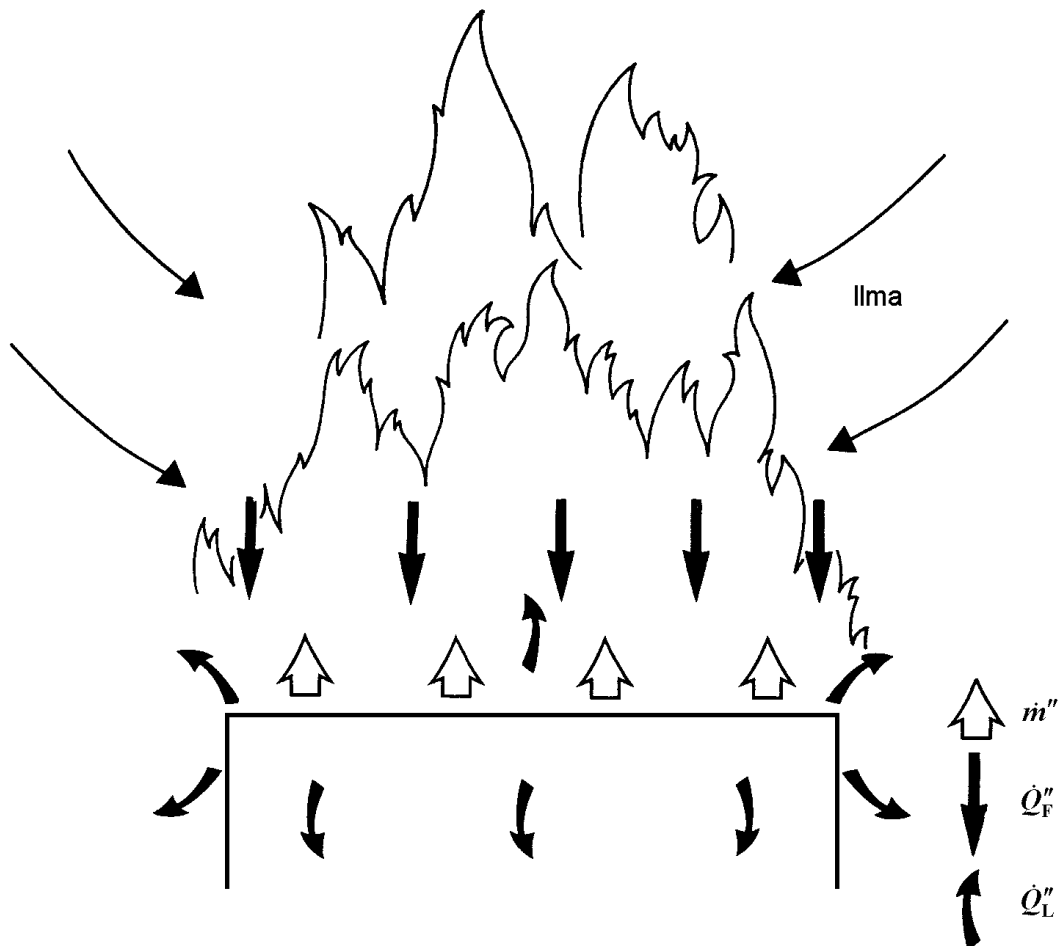
Palamisreaktiossa muodostuu reaktiotuotteina kaasumaisia, nestemäisiä ja kiinteitä yhdisteitä, joista nestemäisistä ja kiinteistä yhdisteistä käytetään nimitystä savu (46). Tulipalossa muodostuvan savun määrään vaikuttaa palonkehitys, joka on palon alkuvaiheessa riippuvainen lähinnä palokuorman ominaisuuksista, kuten pinta-alasta, laadusta ja sijainnista. Palon alkuvaiheessa kiinteiden materiaalien palo kehittyy hitaammin kuin nestepalo. Nestepaloissa palo leviää nopeasti koko nestepinnalle, jolloin savunmuodostus on rajua heti palon alkuvaiheessa. Savun määrään palon edetessä vaikuttaa myös palotilan korkeus. Palotilan korkeuden kasvaessa kasvaa myös muodostuvan savun määrä, koska palopatsaaseen sekoittuu enemmän ympärillä olevaa viileämpää ilmaa. Savupatjan lämpötila määräytyy palotehosta ja massavirrasta. Huonepalon loppuvaiheessa palonkehitystä rajoittaa ilmavirta, jolloin palaminen on osittain vajaata ja savupatjaan kulkeutuu paljon palamattomia kaasuja. Jos palamattomien kaasujen pitoisuus kasvaa riittävän korkeaksi ja palotilaan pääsee yllättäen virtaamaan lisää happea, niin voi tapahtua savukaasuräjähdyks (61).

Rakennuspaloissa syntyvät savukaasut haittaavat näkyvyyttä ja siten vaikeuttavat palotilasta poistumista ja palokunnan sammutustoimintaa. Savukaasut aiheuttavat myös lämpörasitusta rakenteisiin ja levittävät paloa sekä lisäävät lieskahdusvaaraa. Savukaasut pyritäänkin poistamaan heti palon alusta alkaen. Savukaasut poistetaan painovoimaisesti palotilan yläosassa olevien savunpoistoluukkujen kautta tai koneellisesti savunpoistopuhaltimilla. Poistoa voidaan tehostaa ohjaamalla savukaasujen kulkua savusuluilla (23,61).

#### 4.4 Palamisnopeus ja paloteho

Eri materiaalit syttyvät ja palavat eri nopeudella. Kun jotkut materiaalit syttyvät nopeasti ja palavat hetkessä loppuun, niin toisten syttymiseen tarvitaan paljon otollisemmat olosuhteet ja ne voivat palaa erittäin kauan (32).

Kiinteiden aineiden ja nesteiden palaminen edellyttää palamiskykyisten kaasujen muodostumista aineen pinnalle, mikä taas edellyttää lämpöenergian siirtymisestä lieskasta palavan aineeseen. Aineen palamisnopeus riippuukin palamiskykyisten kaasujen muodostumisnopeudesta eli pyrolysoitumislämmöstä, joka nesteillä on aineen alempi höyrystymislämpö. Tilannetta havainnollistetaan kuvassa 5.



Kuva 5. Yksinkertaistetun palotilanteen lämpö- ja massavirtoja (5).

Aineen palamisnopeus pinta-alayksikköä kohti  $\dot{m}''$  on (5)

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' - \dot{Q}_L''}{L_v} \quad (1)$$

jossa  $\dot{Q}_F''$  on liekistä tuleva lämpövuoto,  $\dot{Q}_L''$  on polttoaineen pinnasta lähtevä lämpövuoto ja  $L_v$  on pyrolysoitumislämpö. Palamisnopeus  $\dot{m}$  on massan muutoksen aikaderivaatta  $dm/dt$ . Usein palamisnopeus ilmoitetaan kuitenkin palamisnopeutena polttoaineen pinta-alayksikköä kohti, jolloin se saadaan seuraavasti (5)

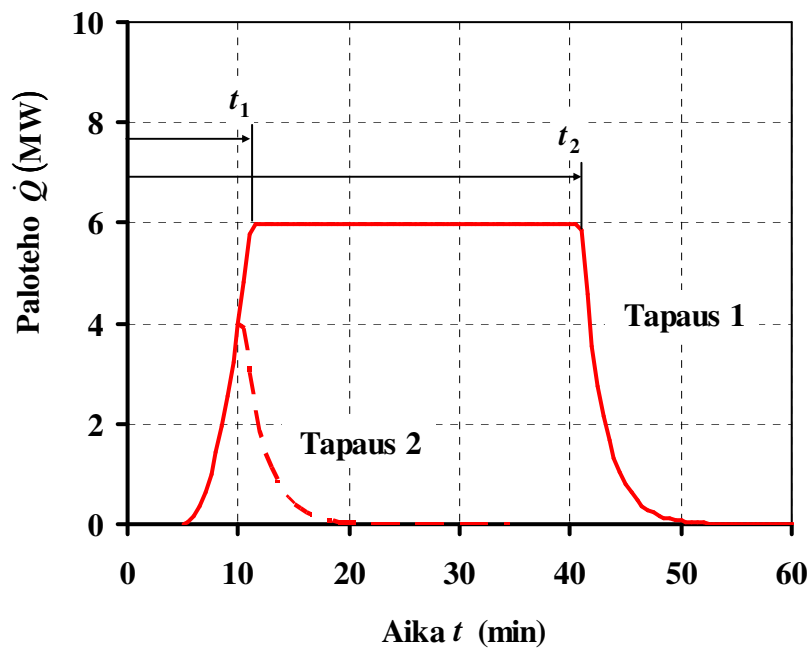
$$\dot{m}'' = \frac{\dot{m}}{A_f} \quad (2)$$

jossa  $A_f$  polttoaineen pinta-ala. Palamisreaktio edellyttää riittävän määrän happea palamisen jatkumiseksi, joten palotehon kasvaessa myös tarvittavan hapen määrä kasvaa. Palamisnopeus ei kuitenkaan kasva äärettömyyksiin hapen saannin kasvaessa, vaan sille voidaan määrittää kokeellisesti maksimiarvo, jonka jälkeen lisätty hapensaanti ei enää vaikuta palamisnopeuteen. Tällöin paloa pidetään polttoainerajoitteisena ja palamisnopeus määräytyy saatavilla olevan palokuorman ominaisuuksista ja määrästä. Tulipalo on happirajoitteinen, kun palamisnopeus määräytyy ilmanvaihdesta. Tulipalossa vapautuvan lämpöenergiämäärän sijaan on yleensä tärkeämpää tuntee nopeus, jolla palavasta materiaalista vapautuu lämpöenergiaa eli paloteho. Polttoainerajoitteisen palon maksimipaloteho  $\dot{Q}_{\max}$  arvioidaan palokuorman palamisominaisuuksista seuraavasti (5,27,43)

$$\dot{Q}_{\max} = \chi \dot{m} \Delta H_c \quad (3)$$

jossa  $\Delta H_c$  on polttoaineen palamiskykyisten kaasujen alempi palamislämpö. Diffuusioliekissä palaminen ei ole täydellistä, jolloin kaikki materiaalin pinnalle muodostuneet palamiskykyiset kaasut eivät osallistu palamisreaktioon, vaan osa aineen massasta poistuu palamattomina savuhiukkasina. Epätäydellinen palaminen

huomioidaan palamisen tehokkuuskertoimella  $\chi$ , jonka Tewarson esitti vaihtelevan välillä 0,7...0,4. Laskennan yksinkertaistamiseksi palamisen tehokkuuskertoimelle otaksutaan kuitenkin keskimääräinen vakioarvo (5). Usein kaikkia palotekoon vaikuttavia muuttuja ei tunneta tai niitä ei pystytä määrittämään riittävän tarkasti, jolloin palotekoon arvioiminen palokuorman avulla on hankalaa. Kun oletetaan kaiken palotilaan tulevan hapen kuluva palamisprosessissa, niin happirajoitteisen huonepalon maksimipaloteho voidaan arvioida palotilaan tulevasta ilmavirrasta. Tulipaloissa paloteho vaihtelee ajan mukaan, mitä kuvataan ajasta riippuvalla funktiolla, jossa paloteho jaetaan kasvavaan ja tasaiseen vaiheeseen sekä hiipumiseen. Kuvassa 6 esitetään esimerkki palotehokäyrästä (5,55).



**Kuva 6. Palotehokäyrä eli paloteho ajan funktiona.**

Kuvassa 6 palo voi edetä kahdella tavalla. Tapauksessa yksi palo kasvaa palotekoon maksimiarvoon saakka ja palaa vakiopaloteholla hiipumisen alkamiseen asti. Tapauksessa kaksi palo saavuttaa maksimipalotehonsa ennen täyden palon vaiheen alkamista, jolloin tasaisen palamisen vaihetta ei muodostu, vaan hiipuminen alkaa suoraan maksimipalotehon jälkeen (40).

Heskestadin mukaan kasvuvaiheessa palotehon kehittyminen noudattaa likimääräisesti paraabelin yhtälöä (5). Aiemmin palotehon kasvuvaiheen kasvunopeutta kuvattiin kasvukertoimella, mutta nykyään käytetään referenssipalotehoa  $\dot{Q}_0$  ja sen saavuttamiseen tarvittavaa ominaiskasvuaikaa  $t_g$ . Eurocodessa referenssipaloteho on 1 MW. Paloteho lasketaan seuraavasti (25,26,46):

$$\text{Kasvava vaihe:} \quad \dot{Q} = \dot{Q}_0 \left( \frac{t}{t_g} \right)^2 \quad \text{kun } t \leq t_1 \quad (4)$$

$$\text{Tasainen vaihe:} \quad \dot{Q} = \dot{Q}_0 \left( \frac{t_1}{t_g} \right)^2 = \dot{Q}_{\max} \quad \text{kun } t_1 < t \leq t_2 \quad (5)$$

$$\text{Hiipuminen:} \quad \dot{Q} = \dot{Q}_0 \left( \frac{t_1}{t_g} \right)^2 \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau}\right) \quad \text{kun } t > t_2 \quad (6)$$

joissa  $t_1$  on täyden palon vaiheen alkamiseen kuluva aika,  $t_2$  on palon hiipumisen alkamiseen kuluva aika ja  $\tau$  on hiipumisaikavakio. Tulipalon hallitsemattomasta luonteesta johtuen palotehon ominaiskasvuaika ja hiipumisaikavakio saattavat vaihdella muutoin samanlaisissa olosuhteissa melko paljon. Palotehokäyrän muotoon vaikuttavat palamisolosuhteet, kuten palokuorman sijainti palotilan dimensioihin ja rajapintoihin nähden. Sama palokuorma aiheuttaa pienessä tilassa suuremman palotehon kuin suuressa tilassa. Lähellä palotilan vaippaa sijaitseva palo aiheuttaa suuremman lämpötilan kuin palaessaan keskellä tilaa, koska rajapinnan lähellä palopatsasta jäädyttävä ilmavirtaus on osittain estetty. Ominaiskasvuaika valitaan palon kasvunopeuden perusteella. Taulukossa 4 esitetään ominaiskasvuaika palon kasvunopeuden mukaan (29,32,55).

Huonepalon lieskahtamisen jälkeen palosta tulee usein happirajoitteinen, jolloin palotilassa oleva happi ei enää riitä palotehon kasvamiseen. Paikalliseksi jäänessä palossa palo on jo levinnyt koko paikallisen palokuorman alueelle, jolloin palosta on polttoainerajoitteinen. Molemmissa tapauksissa paloteho on saavuttanut maksimiarvonsa ja se pysyy vakiona läpi tasaisen vaiheen (32,29). Palavan

materiaalin loppuessa palo hiipuu ja hiipumisnopeutta kuvataan hiipumisaikavakiolla  $\tau$ , joka riippuu palokuorman ominaisuuksista ja ympäristön olosuhteista. Hiipumisaikavakio valitaan esimerkiksi palotilan käyttötarkoituksen mukaan (29). Taulukossa 5 esitetään NKB:n toiminnallisten palovaatimusten teknisen ohjeen 1994:07 mukaiset hiipumisaikavakiot rakennusten eri käyttötaluokissa (38).

#### Taulukko 4

OMINAISKASVUAIKA PALON ERI KASVUNOPEUKSILLA (29,55)

<b>Palon kasvunopeus</b>	<b>Ominaiskasvuaika</b>
	$t_g$
	s
Hidas	577
Normaali	289
Nopea	141
Erittäin nopea	73

#### Taulukko 5

HIIPUMISAIKAVAKIO RAKENNUSTEN ERI KÄYTTÖTAPALUOKISSA (NKB 1994:07)

<b>Käyttötaluokka</b>	<b>Hiipumisaikavakio</b>
	$\tau$
	s
Asuinrakennukset	2000
Hotellit, päiväkodit, yms.	200
Kaupat, kokoontumispaikat	20
Koulut, toimistot, teollisuus	200

Linkova (32) tutki diplomityössään palotehokäyrien aikavakioiden määrittämistä. Tuloksissa todettiin käytettyjen matemaattisten mallien sopivan odotettua paremmin kuvaamaan palotehoa ajan funktiona, jolloin ne soveltuvat hyvin palotekniseen mitoitukseen. Varsinkin käytettäessä kahta tai useampaa sovitetta palotehon muutoksia voidaan kuvata erittäin todenmukaisesti, vaikkakin sovitteiden lisääminen heikentää mallin käytettävyyttä.

Palossa vapautuva lämpöenergiamäärä  $Q$  saadaan integroimalla palotehokäyrän yli, jolloin saadaan myös yhtälö palotehokäyrän parametrien määrittämiseen (40):

$$Q = \int_0^{\infty} \dot{Q}(t) dt = \chi m \Delta H_c \quad (7)$$

Kuvan 6 tapauksessa yksi parametrit saadaan seuraavasti (25,27,40):

$$Q = \underbrace{\dot{Q}_0 \left( \frac{t_1}{t_g} \right)^2}_{=\dot{Q}_{\max}} \left( t_2 - \frac{2t_1}{3} + \tau \right) \quad (8)$$

$$t_1 = t_g \sqrt{\frac{\dot{Q}_{\max}}{\dot{Q}_0}} \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{Q}{\dot{Q}_{\max}} + \frac{2t_1}{3} - \tau \quad (10)$$

Kuvan 6 tapauksessa kaksi parametrit voidaan ratkaista seuraavasti (17):

$$Q = \underbrace{\dot{Q}_0 \left( \frac{t_1}{t_g} \right)^2}_{=\dot{Q}_{\max}} \left( \frac{t_1}{3} + \tau \right) \quad (11)$$

Palopatsaan kokonaispalotehosta noin 70 % siirtyy ympäristöön kuljettumalla palokaasujen virtauksen mukana ja noin 30 % säteilemällä. Osuudet riippuvat palolähteen koosta ja palokuorman ominaisuuksista sekä määrästä, mutta yleensä ne vaihtelevat melko vähän. Esimerkiksi kiinteiden aineiden palamisessa syntyy runsaasti nokea, mikä lisää säteilyn osuutta. Palotehon säteilevää osuutta merkitään suurella  $\chi_r$ , jolloin konvektiivinen paloteho  $\dot{Q}_c$  on (19,27):

$$\dot{Q}_c = (1 - \chi_r)\dot{Q} \quad (12)$$

#### 4.5 Palokuorma

Palokuorma on palotilassa olevan palavan materiaalin lämpöenergiamäärä, joka vapautuu aineen täydellisessä palamisessa (9). Palokuormaksi lasketaan palotilan irtaimiston lisäksi myös palotilan vaipan palamiskykyiset rakennusmateriaalit. Palokuorma voidaan määrittää laskemalla, palo-osaston käyttötavan perusteella tai luotettavan arvion perusteella (66). Palokuorman tiheyden yksiköksi on vakiintunut MJ/m<sup>2</sup>. Aiemmin palokuorman tiheys laskettiin Suomessa palo-osaston vaipan pinta-alayksikköä kohti, mutta nykyään noudatetaan yleiseurooppalaista tapaa laskea palokuorman tiheys lattiapinta-alayksikköä kohti (23). SRMK:n osassa E1-2002 palokuormaryhmät esitetään taulukossa 6 palokuorman tiheyden ominaisarvoina.

#### Taulukko 6

SRMK:N OSAN E1-2002 PALOKUORMARYHMÄT (66)

Palokuormaryhmä	Ohje
Yli 1200 MJ/m <sup>2</sup>	Varastot, jotka ovat erillisiä palo-osastoja
Vähintään 600 MJ/m <sup>2</sup> ja enintään 1200 MJ/m <sup>2</sup>	Osa kokoontumis- ja liiketiloista, kuten näyttelyhallit
Alle 600 MJ/m <sup>2</sup>	Osa kokoontumis- ja liiketiloista, kuten urheiluhallit



Teollisuuden tuotanto- ja varastotilojen palokuormat määritetään aina tapauskohtaisesti (66). Eurocodessa palokuorman tiheyden ominaisarvot esitetään palo-osastojen käyttötavan mukaan (9). Kaikki palokuormaksi laskettava materiaali ei välttämättä ole palotilassa palon aikana eikä kaikki palokuorma osallistu palamiseen. Nämä seikat huomioidaan palokuorman mitoitusarvossa jakamalla palokuorma pysyvään ja muuttuvaan sekä suojattuun ja suojaamattomaan palokuormaan. Jako perustuu palon aikana paikalla olevan palokuorman todennäköiseen määrään sekä todennäköisyyteen, jolla se osallistuu paloon. Eurocodessa palokuorman tiheyden mitoitusarvo  $q_{f,d}$  on (9,23)

$$q_{f,d} = q_{f,k} m \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n \quad (13)$$

jossa  $q_{f,k}$  on palokuorman tiheyden ominaisarvo ja  $m$  on palamiskerroin. Kertoimet  $\delta_{q1}$ ,  $\delta_{q2}$  ja  $\delta_n$  huomioivat palotilan pinta-alan, palotilan käyttötavan ja aktiivisten palontorjuntatoimenpiteiden vaikutuksen syttymiseen. Palokuorman tiheyden ominaisarvo  $q_{f,k}$  lasketaan joko palotilan lattian tai sisävaipan pinta-alaa kohti (9)

$$q_{f,k} = \frac{Q_{fi,k}}{A} \quad (14)$$

jossa palavan tilan pinta-ala  $A$  on joko lattiapinta-ala  $A_f$  tai sisävaipan pinta-ala  $A_t$ . Palokuorman tiheyttä merkitään vastaavasti tunnuksilla  $q_{f,k}$  ja  $q_{t,k}$ . Palokuorman kokonaismäärä  $Q_{fi,k}$  saadaan summaamalla yksittäiset palokuormat (9)

$$Q_{fi,k} = \sum_i Q_{fi,k,i} = \sum_i m_i H_{u,i} \psi_i \quad (15)$$

jossa  $m_i$  ja  $H_{u,i}$  ovat palavan materiaalin  $i$  massa ja tehollinen lämpöarvo. Kertoimella  $\psi_i$  huomioidaan palokuorman  $i$  suojaus. Lämpöarvon yksiköksi on vakiintunut MJ/kg. Tehollinen lämpöarvo  $H_u$  huomioi materiaalin kosteuspitoisuuden  $M$  vaikutuksen kuivan materiaalin lämpöarvoon  $H_{u,0}$  (9):

$$H_u = H_{u,0}(1 - 0,01M) - 0,025M \quad (16)$$

Lieskan etenemissuunta vaikuttaa palon leviämisenopeuteen, joka puolestaan vaikuttaa palon kasvunopeuteen. Liekkirintama etenee pystysuunnassa ylöspäin nopeammin kuin alaspäin. Ylöspäin leviäminen on myös nopeampaa kuin leviäminen vaakasuunnassa. Leviämisenopeus vaikuttaa erityisesti palon kehittymiseen korkeavarastoissa, joissa tavarat varastoidaan hyllyihin. Hyllyjen ja tavaroiden väleihin muodostuu savupiippuina toimivia hormeja, joiden vaikutuksesta palon kehittyminen korkeavarastoissa on erittäin nopeaa.

Babrauskas on esittänyt yhtälön kuormalavapinin maksimipalotehon  $\dot{Q}_{\max}$  laskemiseen, kun maksimipalotehon yksikkönä on kW (17,23,38)

$$\dot{Q}_{\max} = 65\Delta H_{c,p}A_p(1 + 2,14h_p)(1 - 0,027M_p) \quad (17)$$

jossa  $\Delta H_{c,p}$  on puun tehollinen lämpöarvo 15 MJ/kg,  $A_p$  on kuormalavapinin peittämä lattiapinta-ala,  $h_p$  on pinon korkeus ja  $M_p$  on puun kosteuspitoisuus prosentteina. Kuormalavapinin palossa vapautunut lämpöenergiamäärä  $Q$  on (17)

$$Q = \eta_p \rho_p h_p A_p \Delta H_{c,p} \quad (18)$$

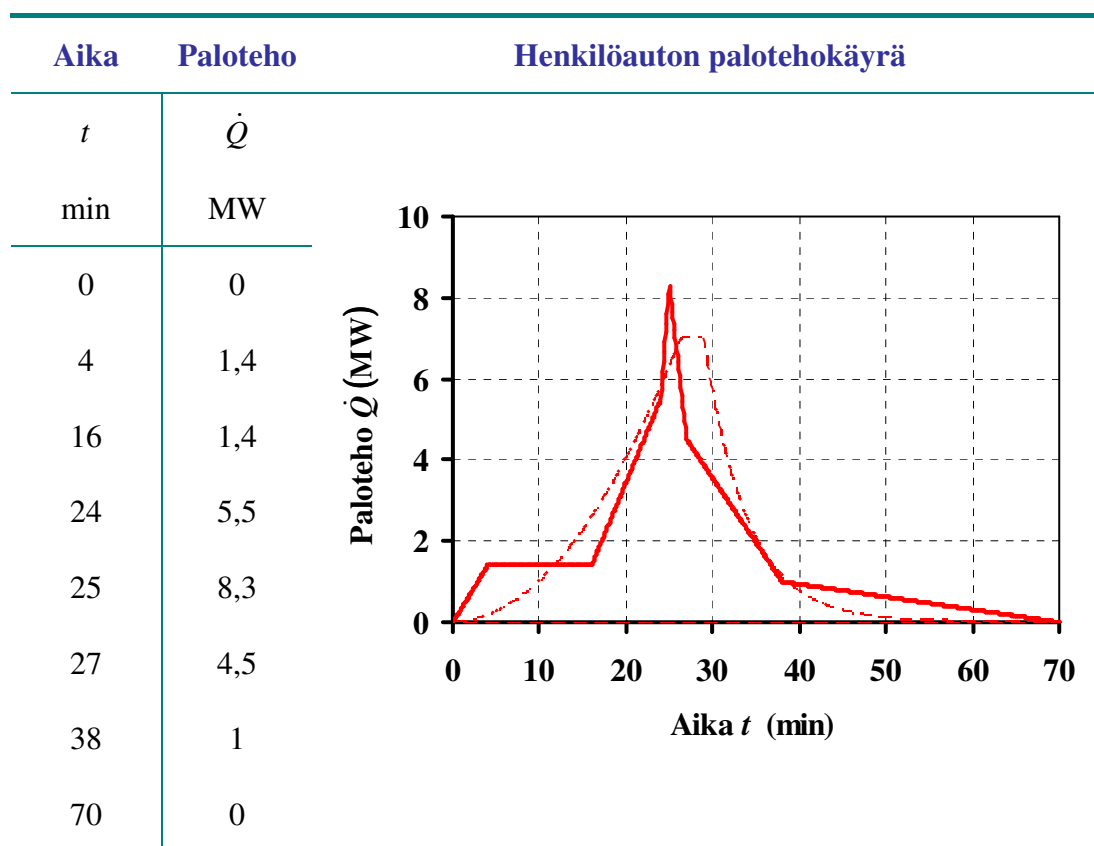
jossa  $\eta_p$  on kuormalavapinin ilmarakojen osuuden huomioiva kerroin 0,33 ja  $\rho_p$  on puun tiheys, jonka arvoksi otaksutaan 500 kg/m<sup>3</sup> (17).

Erään merkittävän paikallisten palojen syttymislähderyhmän muodostavat erilaiset kulkuneuvot. Kulkuneuvojen palokuorma muodostuu lähinnä sen sisältämistä palavista nesteistä kuten poltto- ja hydrauliiikkaöljyistä. Jos kulkuneuvossa ei ole merkittävästi hyötykuormaa tai palavia sisävuorauksia, niin sen palokuorma voidaan yleensä arvioida sen sisältämien palavien nesteiden palokuormasta (23). Taulukossa 7 esitetään CTICM:n laboratoriossa tehtyjen polttokokeiden perusteella laadittu henkilöauton palotehokäyrä, jossa maksimipaloteho on 8,3 MW. Vuosimallia 1995

olevan henkilöauton massa oli 1303 kg ja palokuorma on 6800 MJ (47). Taulukon 7 kuvassa esitetään yhtenäisellä paksulla viivalla henkilöauton palotehokäyrä ja ohuella katkoviivalla vastaava mitoituspalo, jossa ominaiskasvu-aika on 600 s, maksimipaloteho 7 MW ja hiipumisaikavakio 300 s (40).

**Taulukko 7**

HENKILÖAUTON PALOTEHOKÄYRÄ (47)



#### 4.6 Paloa kuvaavat yleiset muuttujat

Palamista kuvataan erilaisilla tunnusluvuilla ja laaduttomilla muuttujilla, joilla arvioidaan esimerkiksi käytettävien palomallien soveltuvuutta (18,25). Paikallisessa palossa palopatsaan koko ei ole yksiselitteinen, joten sitä kuvataan palopatsaan karakteristisella mitalla  $D$ . Palopatsasta tarkastellaan yleensä sylinterinä, jolloin karakteristiseksi mitaksi on luonnollista valita sylinterin halkaisija. Muissa kuin poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoisissa palopatsaissa karakteristinen mitta

voidaan arvioida tehollisena halkaisijana siten, että palopatsaan ekvivalenttinen poikkipinta-ala  $A$  on  $\pi D^2/4$ , jolloin palopatsaan karakteristinen mitta  $D$  on (55):

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (19)$$

Tarkasteltaessa lisäilman virtausta palopatsaaseen sen poikkipinta-alaa oleellisempi mitta on ulkovaipan pinta-ala. Tällöin muun kuin sylinterin muotoisissa palopatsaissa karakteristinen mitta voidaan arvioida tehollisena halkaisijana siten, että palopatsaan ekvivalenttinen piiri  $S$  on  $\pi D$ , jolloin palopatsaan karakteristinen mitta  $D$  on (19):

$$D = \frac{S}{\pi} \quad (20)$$

Palopatsaan kokoa voidaan kuvata laaduttomalla paloteholla  $\dot{Q}^*$ , jota tarkennetaan yleensä alaindeksillä, joka ilmaisee miten laaduton paloteho on määritelty. Palolähteen karakteristisen mitan  $D$  avulla määritelty laaduton paloteho  $\dot{Q}_D^*$  lasketaan seuraavalla lukuarvoyhtälöllä, kun palotehon yksikkö on kW (18,47)

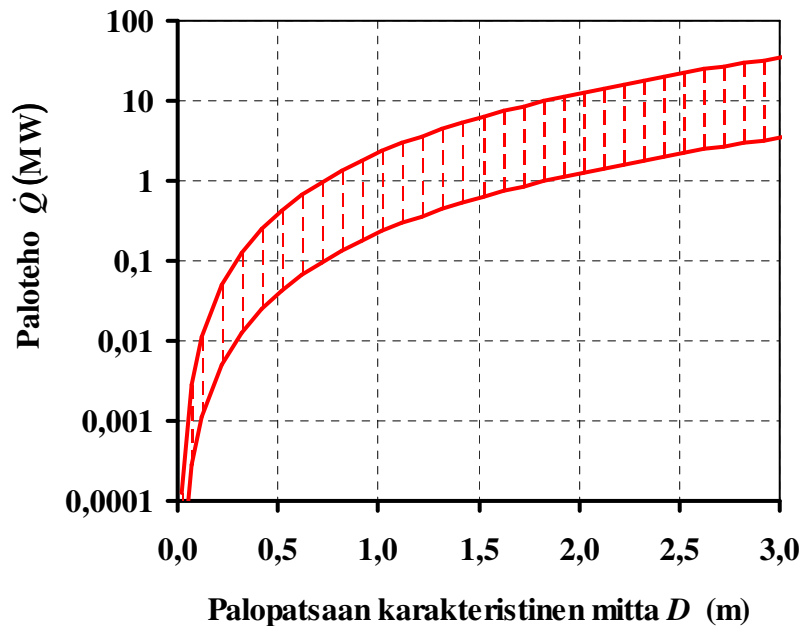
$$\dot{Q}_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_{p,\infty} \theta_\infty g^{1/2} D^{5/2}} = \frac{\dot{Q}}{AD^{5/2}} \quad (21)$$

jossa  $\rho_\infty$ ,  $c_{p,\infty}$  ja  $\theta_\infty$  ovat palopatsaan ympäristön ilman tiheys  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , ominaislämpökapasiteetti  $1000 \text{ J/kgK}$  ja lämpötila  $293 \text{ K}$ . Maan vetovoiman kiihtyvyyden  $g$  on  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Kaavan 21 jälkimmäisessä muodossa on käytetty lyhennysmerkintää  $A \equiv \rho_\infty c_{p,\infty} \theta_\infty g^{1/2} \approx 1100 \text{ kW/m}^2$ , johon on kerätty kaikki ne suureet, joille voidaan otaksua keskimääräinen vakioarvo. Palopatsasmalleissa pitäisi tuntea niiden soveltuvuus eli millä alueella mallin taustalla olevat polttokokeet on tehty ja millä alueella mallia on testattu kokeilla. Nykyisten palopatsasmallien käyttöä voidaan pitää hyväksyttävänä, kun laaduton paloteho on välillä  $0,2 < \dot{Q}_D^* < 2$  tai  $2200 \text{ kW/m}^{5/2} \geq \dot{Q}/D^{5/2} \geq 220 \text{ kW/m}^{5/2}$  (18).

Frouden luku kuvaa turbulentin nostediffuusioliekin hitausvoimien ja nostevoimien suhdetta painovoimakentässä. Nostelieskalla Frouden luku on noin yksi ja suihkulieskalla yli 100, jolloin nostevoimilla ei enää ole vaikutusta lieskan muotoon. Frouden luku  $Fr$  voidaan laskea vaakasuoralle poikkileikkaukseltaan ympyrän muotoiselle palolähteelle seuraavasti (3,25):

$$Fr = \frac{\dot{Q}_c}{\rho_\infty \left( \frac{\Delta H_c}{S+1} \right) D^{5/2} \sqrt{\left( \frac{\Delta H_c}{(S+1)c_{p,\infty}\theta_\infty} \right) g(\chi - \chi_r)}} \approx \frac{\dot{Q}_D^*}{20} \quad (22)$$

Frouden luvulle saadaan likiarvo, kun edelliseen kaavaan sijoitetaan tunnettujen suureiden keskimääräiset arvot. Nykyisten palopatsasmallien käyttöä voidaan pitää hyväksyttävänä, kun Frouden luku on välillä  $0,1 \geq Fr \geq 0,01$  (18).



**Kuva 7. Nykyisten palopatsasmallien hyväksyttävä palotehoalue.**

## 5 VYÖHYKEMALLIT

### 5.1 Deterministiset mallit

Tulipalojen simulointimallit jaetaan (26):

- i stokastisiin,
- ii deterministisiin ja
- iii kokemusperäisiin malleihin.

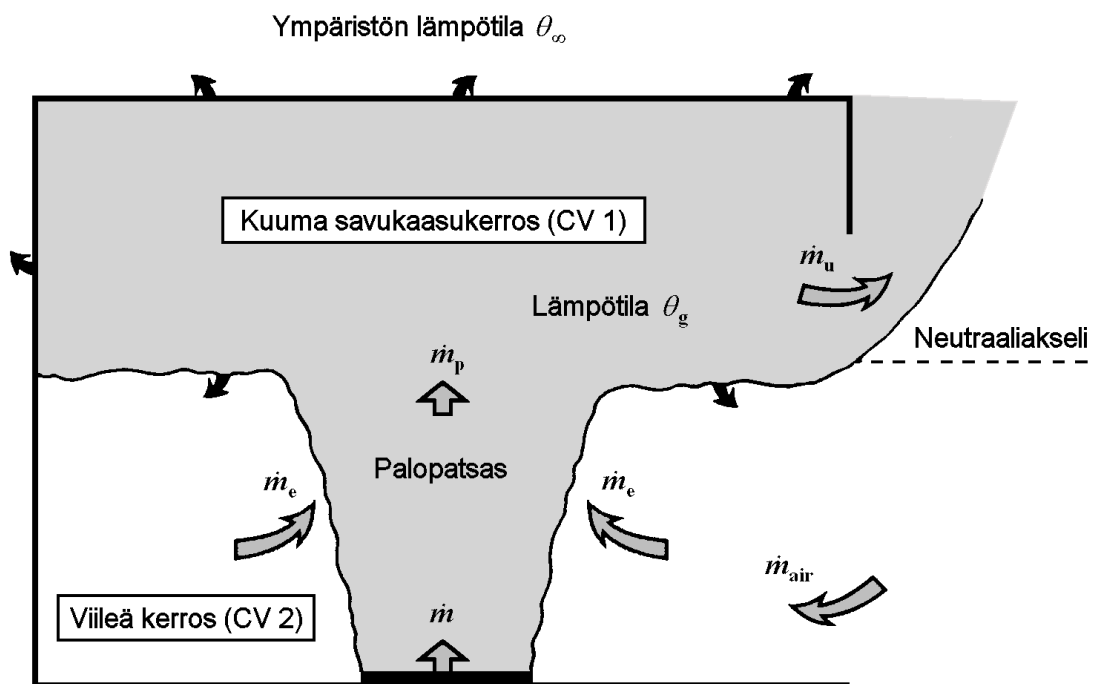
Stokastiset mallit perustuvat todennäköisyyslaskentaan, jolla arvioidaan palon syttymistä ja leviämistä kohteessa ennalta asetetulla turvallisuustasolla. Deterministiset mallit perustuvat tieteellisten teorioiden ja empiiristen havaintojen perusteella määritettyihin fysikaalisiin riippuvuuksiin, joilla arvioidaan lämpötilan kehitys tai savupatjan laskeutumisenopeus kohteessa. Determinististen mallien pitäisi tuottaa samoilla lähtöarvoilla sama lopputulos. Kokemusperäiset mallit perustuvat polttokokeilla hankittuihin tietoihin palosta tietyssä palotilassa. Tulipalojen deterministiset mallit jaetaan (26,30):

- i kenttämalleihin,
- ii vyöhykemalleihin ja
- iii verkkomalleihin.

Kenttämallit perustuvat virtausmekaniikan yhtälöihin, joilla arvioidaan tulipaloa kuvaavien suureiden riippuvuudet ajan ja paikan funktiona. Kenttämallien yhtälöt ratkaistaan tietokoneella ja laskentatyömäärä riippuu ratkaisun halutusta tarkkuudesta. Vyöhykemallit perustuvat palotilan jakamiseen yhteen tai useampaan vyöhykkeeseen, joiden sisällä olosuhteet ovat vakiot ja joiden ulkorajapintojen välillä on massa- ja energiavirtojen vuorovaikutus. Verkkomallit perustuvat palotilan jakamiseen solmupisteisiin, jotka kuvaavat kokonaan tai osittain suljettuja tiloja. Solmupisteen sisällä olosuhteet ovat samat ja solmupisteet ovat vuorovaikutuksessa toistensa kanssa haarojen välityksellä. Verkkomallit sijoittuvatkin vyöhyke- ja kenttämallien välille siten, että verkkomallit lähestyvät vyöhykemalleja, jos solmupisteitä on vähän ja kenttämalleja, jos solmupisteitä on paljon (30,38).

## 5.2 Kaksivyöhykemalli

Yksivyöhykemallissa koko palotila on samaa vyöhykettä, joten se soveltuu lieskahtaneen huonepalon kuvaamiseen. Kaksivyöhykemallissa palotila jaetaan kylmään ja kuumaan vaakasuoraan vyöhykkeeseen, joista kuuma vyöhyke kuvaa savupatjaa ja kylmä vyöhyke savupatjan alapuolella olevaa viileämpää ilmaa (19,30). Vyöhykkeiden sisällä suureiden arvot otaksutaan samoiksi vaakasuorassa suunnassa eikä vyöhykkeiden välillä tapahdu sekoittumista (25). Paikallisessa palossa palopatsas toimii kaksivyöhykemallin massa- ja energialähteenä, josta palokaasut kohoavat nosteen vaikutuksesta ylöspäin kohti kattoa kuljettaen mukanaan ainetta ja energiaa. Palopatsaassa palokaasujen virtaukseen sekoittuu ympäristöstä viileämpää ilmaa, mikä lisää massavirtaa ja viilentää palopatsasta. Kaksivyöhykemallin periaate esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Kaksivyöhykemallin toimintaperiaate (5)

Palokaasujen törmätessä palopatsaan patopisteessä katon alapintaan ne leviävät säteittäisesti ympäriinsä ja kerrostuvat katon rajaan muodostaen savupatjan. Palokaasut jäähtyvät kuljettuessaan kauemmas palopatsaasta. Lisäksi osa savupatjan

lämpöenergiasta siirtyy kattorakenteisiin ja osa säteilee muualle palotilaan. Palopatsaasta virtaavat kuumemmat palokaasut syrjäyttävät jäähtyneemmät palokaasut savupatjassa, jolloin savupatja alkaa kerrostua ja samalla sen alareuna laskeutuu (18). Kaksivyöhykemallin vyöhykejako toimii hyvin, jos palolähteen paloteho muuttuu vain hitaasti eikä huonetilassa ole liikaa sekoittavia virtauksia.

Kaksivyöhykemallin lähtötietoina tarvitaan palotilan geometria, rajoittavien pintojen ominaisuudet sekä mitoituspalo ja sen sijainti. Kaksivyöhykemallin tulosteena saadaan kylmän ja kuumen kerroksen rajapinnan korkeus ja keskimääräinen lämpötila ajan funktiona sekä massa- ja energiavirrat aukoista (30). Massa- ja energiataseyhtälöillä arvioidaan lämpötilan kehittymistä ja savun leviämistä palotilassa. Jos palotilan yläosassa ei ole aukkoja, niin palokaasut kerrostuvat nopeasti savupatjaksi, jonka massan muutosnopeus  $\dot{m}_L$  on (19)

$$\dot{m}_L = \dot{m}_p - \dot{m}_u \quad (23)$$

jossa  $\dot{m}_p$  on massavirta palopatsaasta savupatjaan ja  $\dot{m}_u$  on savupatjasta huoneen aukkojen kautta poistuva massavirta. Palolähteestä palopatsaaseen tuleva massavirta on melko pieni verrattuna ympäröivästä ilmasta palopatsaaseen kulkeutuvaan massavirtaan  $\dot{m}_e$ , jolloin usein otaksutaan, että (19):

$$\dot{m}_p = \dot{m}_e \quad (24)$$

Savupatjan energianmuutosnopeus  $\dot{E}_L$  on (19)

$$\dot{E}_L = \dot{E}_p - \dot{E}_u - \dot{E}_c - \dot{E}_{LR} \quad (25)$$

jossa  $\dot{E}_p$  on palopatsaan lämpöenergiavuo,  $\dot{E}_u$  on lämpöenergiavuo huoneen aukoista ulos,  $\dot{E}_c$  on palokaasusta seiniin ja kattoon konvektiivisesti siirtyvä lämpöenergiavuo ja  $\dot{E}_{LR}$  on savupatjan säteilyteho.



### 5.3 CFAST –vyöhykemalliohjelmisto

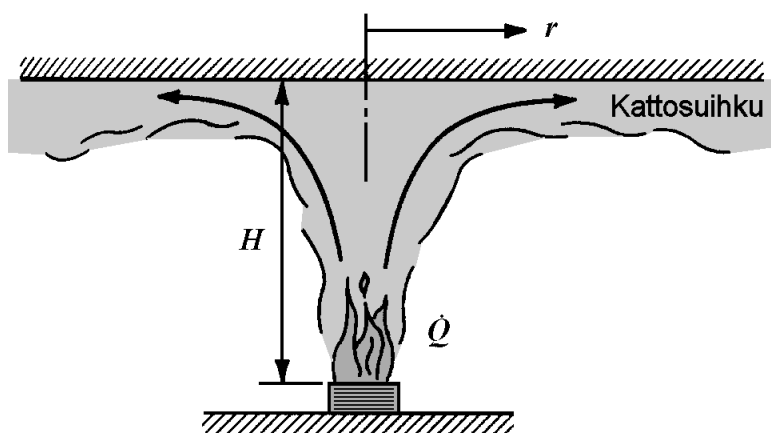
Eräs kaksivyöhykemallia hyödyntävä suunnitteluohjelmisto on National Institute of Standards and Technology:ssa kehitetty CFAST. Ohjelmisto on vapaasti saatavilla internetistä (18). Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) on tutkinut CFAST-ohjelmiston soveltuvuutta insinööriyöskentelyyn arvioimalla ohjelmiston laskentatuloksia ja sen käytön dokumentointia. Tutkimuksen mukaan CFAST-ohjelmistolla saatavat tulokset ylemmän vyöhykkeen maksimilämpötilasta ja ajasta, jossa vyöhykkeiden rajapinta laskeutuu 1,5 m korkeudella lattiatasosta, vastasivat hyvin koetuloksia. Ylemmän vyöhykkeen lämpiämiseen 100 °C:seen tai 300 °C:seen kuluvan ajan ohjelma laski mitattuja aikoja lyhyemmäksi ja savupatjan paksuuden mitattuja arvoja pienemmäksi. Lisäksi ohjelmistosta on saatavilla runsaasti julkaisuja ja se on hyvin dokumentoitu (18).

Paavilainen (38) tutki diplomityössään teräsrakenteiden palonkestoa teollisuuden tuotanto- ja varastohalleissa CFAST-ohjelmistolla. Työssä määritettiin neljässä esimerkkikohteessa pahimmat palotilanteet ja simuloitiin niiden lämpötilankehitys kaksivyöhykemallilla. Teräsrakenteen palonkestävyys arvioitiin asetetulla kriittisellä lämpötilalla. Työn tuloksena todettiin, että esimerkkikohteista teollisuuden tuotantohallien paloissa suojaamattomien teräsrakenteiden lämpötilat alittivat niiden kriittisen lämpötilan, joten hallin teräsrakenteiden todettiin kestävän palon. Esimerkkikohteista teollisuuden varastohallin lämpötilan kehityksestä ei saatu luotettavia tuloksia, mutta tulokset viittasivat siihen, että varastohallin palossa lämpötilan kehitys riittäisi suojaamattomien teräsrakenteiden kriittisen lämpötilan ylittymiseen.

## 6 PALOPATSASMALLIT

### 6.1 Palopatsas

Nimelliset aika-lämpötilakäyrät ja parametrinen huonepalomalli eivät sovellu suurten tilojen paikalliseen paloon. Jos voidaan todeta, ettei palotila pääse lieskahtamaan, niin EN 1363-1 –standardin aika-lämpötilakäyrä on liian ankara todelliseen paloon verrattuna ja huonepalomallin soveltuvuuden rajoitukset puolestaan estävät sen käytön suuressa tilassa. Suurten tilojen paloissa palokuormat ovat usein paikallisia ja palokuorman tiheys tilan kokoon nähden pieni, jolloin ei ole odotettavissa, että palon syttyessä tilassa tapahtuisi lieskahdus. Suurten tilojen palo tulisikin simuloida oletettuun palonkehitykseen perustuen. Kehittyneempien suunnittelumenetelmien käyttö vie enemmän aikaa ja vaatii suunnittelijalta perehtymistä tulipalojen simulointiin, mutta näitä lisäkustannuksia saadaan pienennettyä, jos voidaan esimerkiksi osoittaa teräsosien palosuojaus tarpeettomaksi. Palopatsas on osa kaksivyöhykemallia, jossa se toimii massa- ja energialähteenä. Palopatsasmallia käytetään myös itsenäisesti tarkasteltaessa esimerkiksi kattorakenteisiin kohdistuvaa lämpörasitusta palopatsaan kohdalla, koska kaksivyöhykemallissa oletus savupatjan lämpötilan homogeenisuudesta vaakasuunnassa aliarvioi savupatjan lämpötilan palopatsaan kohdalla (19). Palokaasujen virtausta katonrajassa kutsutaan kattosuihkuksi ja sitä kuvaavia palopatsasmalleja kattosuihkumalleiksi, joiden kaaviokuva esitetään kuvassa 9.

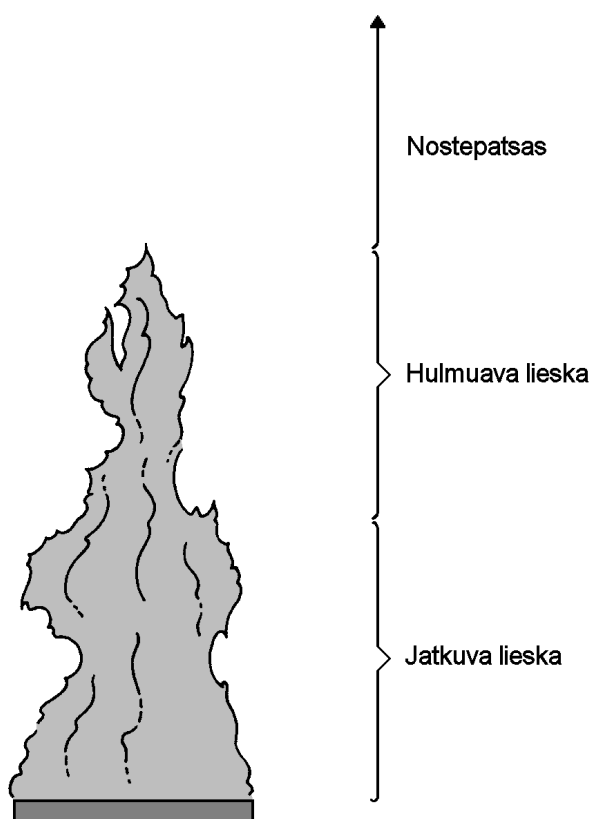


Kuva 9. Kattosuihkumallin kaaviokuva (5).

Suurin osa palopatsasmalleista perustuu pistelähdemalliin, jossa paloa kuvataan pistemäisellä lämmönlähteellä (18). Kattosuihkuvirtauksen keskipistettä aivan katon rajassa kutsutaan patopisteeksi. Palopatsasta kuvataan sylinterisymmetrisenä patsaana, jonka koordinaatistossa  $z$ -koordinaatti kulkee palopatsaan keskiakselia pitkin palolähteestä ylöspäin ja  $r$ -koordinaatti on vaakasuora etäisyys palopatsaan keskiakselilta poispäin. Kattosuihkumalleissa yleensä otaksutaan etteivät palokaasut pääse kerrostumaan katon rajaan, vaan ne kulkeutuvat pois palotilasta, jolloin kuuma savukaasukerros ei paksuunnu.

## 6.2 Luonnollisten palojen lieskat

Palopatsaat palavat diffuusilla nosteliekillä. McCaffrey tutki halkaisijaltaan 0,3 m polttimen muodostaman palopatsaan jakautumista osiin. Havaintojensa perusteella hän esitti palopatsaan luokittelun lieskojen esiintymistodennäköisyyden perusteella kuvan 10 mukaisesti jatkuvaan ja hulmuavaan lieskaan sekä nostepatsaaseen (3,5).



**Kuva 10. McCaffreyn luokittelu (5).**

Jatkuvan lieskan alueella on koko ajan lieskoja ja lämpötila alueella pysyy lähes vakiona. Hulmuavan lieskan alueella lieskoja on vain ajoittain ja palokaasujen virtausnopeus pysyy likipitään vakiona. Nostepatsaassa lieskoja ei enää esiinny ja nosteen aiheuttama virtaus hidastuu palokaasujen lämpötilan laskiessa niiden etääntyessä palolähteestä (5). Palopatsaan lämpötilan maksimi-arvo on pysyvän liekin alueella, josta se alenee hulmuavan lieskan alueelle mentäessä. Lieskat voidaan jakaa laaduttoman palotehon mukaan kolmeen alueeseen. Kun  $\dot{Q}_D^* < 0,10$  lieskat palavat yksittäisinä palavan alueen keskiakseliin nojaavina lieskoina ja niiden korkeus on pienempi kuin palavan alueen halkaisija. Kun  $0,10 < \dot{Q}_D^* < 1,0$  lyhyet lieskat yhdistyvät ja laaduttoman palotehon kasvaessa ne alkavat jo muodostaa yhtenäisiä korkeita lieskoja. Kun  $\dot{Q}_D^* > 1,0$  lieskat muodostavat yhtenäisen palopatsaan, jossa lieskan korkeus on palopatsaan karakteristiseen mittaan verrattuna jo kolminkertainen (3). Jotkut palopatsasmallit eivät sovellu tilanteisiin, joissa lieskat yltävät kattoon asti. Tällöin arvioidaan lieskan korkeus eli taso mihin palamisreaktiot loppuvat. Heskestad sovitti eri lähteistä keräämiään tutkimustuloksia yhtälöön, jolla voidaan arvioida lieskan korkeus  $L_f$ , kun palotehon yksikkö on kW (5):

$$\frac{L_f}{D} = -1,02 + 15,6N^{1/5} \quad (26)$$

$$N = \frac{c_{p,\infty}\theta_\infty}{g\rho_\infty^2(\Delta H_c/S)^3} \frac{\dot{Q}^2}{D^5} \quad (27)$$

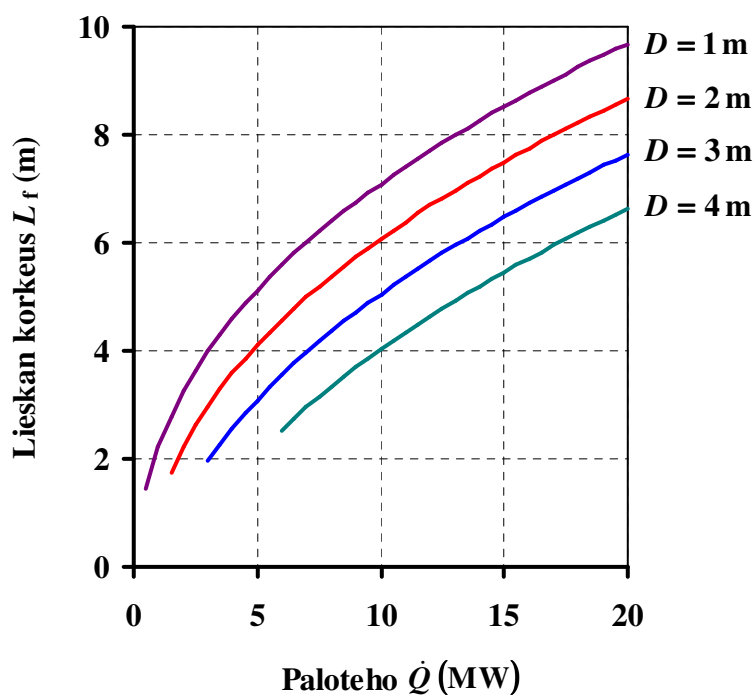
Useimmat dimensiottoman muuttujan  $N$  suureista ovat tunnettuja. Monilla kaasumaisilla ja nestemäisillä palavilla aineilla stokiometrisessa palamisreaktiossa polttoaineen massayksikköä kohden vapautuneen lämpöenergian suhde tarvittavan ilman massayksikköön  $\Delta H_c/S$  on 2900...3200 kJ/kg. Otetaan käyttöön merkintä:

$$k_1 \equiv 15,6 \left[ \frac{c_{p,\infty}\theta_\infty}{g\rho_\infty^2(\Delta H_c/S)^3} \right]^{1/5} \quad (28)$$

Sijoitetaan suureille niiden keskimääräiset arvot normaaliolosuhteissa, jolloin parametri  $k_1$  saa arvon  $0,235 \text{ m/kW}^{2/5}$ . Sijoitetaan tämä arvo Heskestadin kaavaan, jolloin saadaan lieskan korkeudelle niin sanottu insinöörimuoto (5,46,47):

$$L_f = -1,02D + 0,235\dot{Q}_c^{2/5} \quad (29)$$

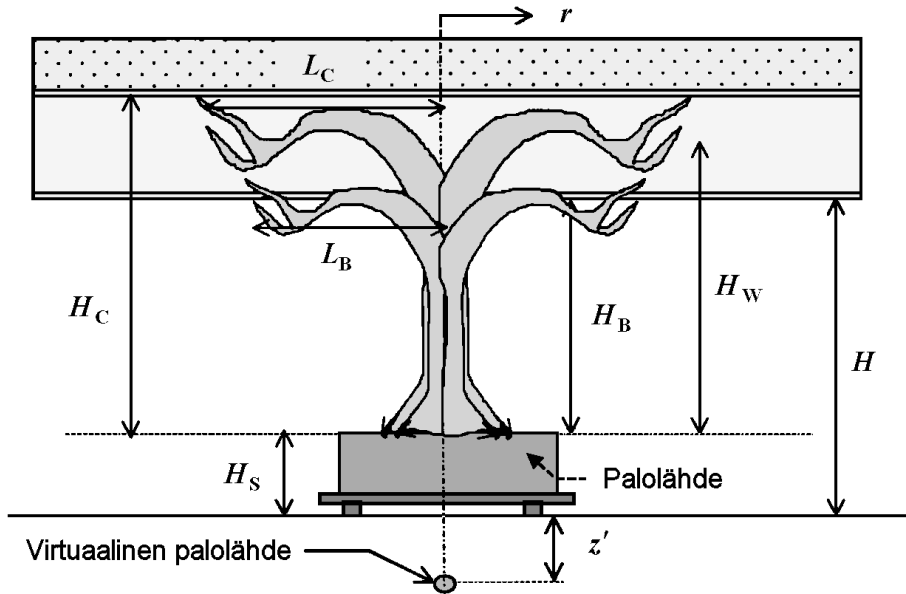
Kuvassa 11 on esitetty lieskan korkeus palotehon funktiona eri kokoisissa palopatsaissa. Kokeissa on havaittu Heskestadin yhtälön kuvaavan hyvin lieskan korkeutta, vaikkakin sitä on testattu vain alueella  $7 < \dot{Q}_c^{2/5} D^{-1} < 700 \text{ kW}^{2/5} \text{ m}^{-1}$  (5).



Kuva 11. Lieskan korkeus Heskestadin kaavan mukaan.

### 6.3 Hasemin kattosuihkumalli

Hasemi et al. tutkivat I-palkin lämpötilajakaumaa paikallisessa palossa, jossa lieskat ylsivät I-palkin alalaippaan. Myös Myllymäki teki polttokokeita samasta aiheesta. Koetilanne esitetään kuvassa 12 (47).



**Kuva 12. Hasemin mallissa esiintyvät geometriset suureet (47).**

Kun lieskat eivät yllä kattoon, niin lieskan korkeus voidaan laskea Heskestadin kaavan ohella myös seuraavasti (47):

$$L_f = 3,5\dot{Q}^{*2/3}D \quad \text{kun } \dot{Q}^* < 1 \quad (30)$$

$$L_f = 3,5\dot{Q}^{*2/5}D \quad \text{kun } \dot{Q}^* \geq 1 \quad (31)$$

Hasemi ja Tokunaga esittivät palolähteen virtuaalisen origolle seuraavat yhtälöt (47):

$$z' = 2,4D(\dot{Q}^{*2/5} - \dot{Q}^{*2/3}) \quad \text{kun } \dot{Q}^* < 1 \quad (32)$$

$$z' = 2,4D(1 - \dot{Q}^{*2/5}) \quad \text{kun } \dot{Q}^* \geq 1 \quad (33)$$

Laippojen suuntaan taipuvien lieskojen pituudet I-palkin ylä- ja alalaipan tasolla  $L_{HB}$  ja  $L_{HC}$  arvioidaan skaalattujen laaduttomien palotehojen  $\dot{Q}_{HB}^*$  ja  $\dot{Q}_{HC}^*$  avulla (47):

$$L_{HB} = H_B (2,3\dot{Q}_{HB}^{*0,3} - 1) \quad (34)$$

$$L_{HC} = H_C (2,9\dot{Q}_{HC}^{*0,4} - 1) \quad (35)$$

$$\dot{Q}_{HB}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p \theta_\infty g^{1/2} H_B^{5/2}} = \frac{\dot{Q}}{AH_B^{5/2}} \quad (36)$$

$$\dot{Q}_{HC}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p \theta_\infty g^{1/2} H_C^{5/2}} = \frac{\dot{Q}}{AH_C^{5/2}} \quad (37)$$

Wakamatsu et al. määrittivät lämpövuon  $\dot{h}$  ala- ja ylälaipan alapintaan sekä uumaan tarkasteltavan pisteen ja palolähteen virtuaalisen origon välisen normalisoidun etäisyyden  $x$  funktiona seuraavasti, kun lämpövuon yksikkö on kW/m<sup>2</sup> (47):

$$\text{Alalaipan alapintaan: } x = \frac{r + H_B + z'}{L_{HB} + H_B + z'} \quad \dot{h} = 518,8 \exp(-3,7x) \quad (38)$$

$$\text{Uumaan: } x = \frac{r + H_W + z'}{L_{HW} + H_W + z'} \quad \dot{h} = 148,13 \exp(-2,75x) \quad (39)$$

$$\text{Ylälaipan alapintaan: } x = \frac{r + H_C + z'}{L_{HC} + H_C + z'} \quad \dot{h} = 100,48 \exp(-2,85x) \quad (40)$$

Franssen taas oletti koko I-palkin poikkileikkauksen lämpötilajakauman tasan jakautuneeksi, jolloin vaakasuoran lieskan pituus  $L_{HB}$  saadaan seuraavasti (47):

$$L_{HB} = H_B (2,9\dot{Q}_{HB}^{*0,33} - 1) \quad (41)$$

Eurocoden 1991 osan 1-2 paikallisen palon mallissa lämpövuon  $\dot{h}$  määritetään seuraavasti, kun palopatsaan lieskat yltävät tarkasteltavaan rakenteeseen asti (9):

$$\dot{h} = 100000 \quad \text{kun } x \leq 0,30 \quad (42)$$

$$\dot{h} = 136300 - 121000x \quad \text{kun } 0,30 < x < 1,0 \quad (43)$$

$$\dot{h} = 15000x^{-3,7} \quad \text{kun } x \geq 1,0 \quad (44)$$

joissa normalisoitu etäisyys  $x$  määritetään seuraavasti (47):

$$x = \frac{r + H + z'}{L_{\text{HB}} + H + z'} \quad (45)$$

Eurocodessa mallin käyttöä rajoitetaan tilanteisiin, joissa palopatsaan karakteristinen mitta on korkeintaan 10 m ja paloteho korkeintaan 50 MW (9).

#### 6.4 Alpertin kattosuihkumalli

Alpert tutki mittavilla polttokokeilla kattosuihkuvirtausta ja totesi virtauksen paksuuden olevan 5...12 % patopisteen ja palolähteen välisestä etäisyydestä. Edelleen hän havaitsi, että palokaasujen lämpötilan maksimiarvo sijaitsi hyvin lähellä katon alapintaa, noin 1 % patopisteen ja palolähteen välisestä etäisyydestä (15). Polttokokeiden perusteella Alpert kehitti korrelaation kattosuihkuvirtauksen palokaasujen maksimilämpötilalle  $\theta_{\text{max}}$  lähellä katon rajaa vaakasuoran etäisyyden  $r$  funktiona, kun konvektiivisen palotehon yksikkö on kW (3,55):

$$\theta_{\text{max}} - \theta_{\infty} = \frac{16,9\dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{kun } r \leq 0,18H \quad (46)$$

$$\theta_{\text{max}} - \theta_{\infty} = \frac{5,38(\dot{Q}_c/r)^{2/3}}{H} \quad \text{kun } r > 0,18H \quad (47)$$

Lähellä estettä kuten nurkkaa tai seinää palopatsaan palokaasujen lämpötila kasvaa ja tämä esteiden aiheuttama häiriö ympäröivän ilman sekoittumiseen palokaasuihin



huomioidaan kertomalla konvektiivinen paloteho kahdella, kun palava kohde sijaitsee lähellä seinää ja neljällä, kun palava kohde sijaitsee nurkassa (40). Alpertin kattosuihkumallin kaaviokuva esitetään kuvassa 9. Alpertin polttokokeissa paloteho vaihteli välillä 0,668...98 MW ja palotilan korkeus välillä 4,6...15,5 m. Alpertin korrelaatiota voidaan soveltaa tiloihin, joissa (5):

- palokaasujen vaakasuuntainen virtaus on esteetöntä,
- katon korkeus ei vaihtelee huomattavasti,
- katonrajaan ei muodostu pysyvää kuumaa palokaasukerrosta ja
- lieskat eivät yllä lähelle kattoa.

Esteettömän virtauksen ehto toteutuu, jos esteen korkeus on alle 1 % palotilan korkeudesta tai jos palolähteen etäisyys lähimpään katon rajassa olevaan pystysuoraan esteeseen on ainakin  $3H$ . Palolähteen ollessa lähellä nurkkaa tarvitaan vapaata tilaa enemmän (5,25). Jotta pysyvää kuumaa palokaasukerrosta ei pääsisi muodostumaan, niin palotilasta tulee olla yhteys ulos, jotta palokaasut pääsevät virtaamaan pois palotilasta. Alpertin korrelaatiot eivät huomioi palokaasujen virtaukseen kuluva aikaa, jolloin ne pätevät vain hitaasti muuttuvissa paloissa (5). Heskestad ja Delichatsios kehittivät kattosuihkuvirtauksen palokaasujen maksimilämpötilalle yhden funktion korrelaation (15)

$$\theta_g - \theta_0 = c_\theta \left( 0,188 + 0,313 \frac{r}{H} \right)^{-4/3} \frac{Q_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad (48)$$

jossa kerroin  $c_\theta$  on  $0,0275 \text{ m}^{5/3} \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}^{2/3}$ . Korrelaation pätevyysalue on  $0 < r/H < 8$  ja korrelaation oletuksena on ettei katon rajaan muodostu pysyvää kuumaa savukaasukerrosta ja että palopatsaan pysty akselin etäisyys lähimpään seinään on yli  $1,8H$  (3). Heskestadin ja Delichatsioksen korrelaatiolla saadaan lähellä palopatsaan keski akselia korkeampia arvoja palokaasun maksimilämpötilalle kuin Alperin korrelaatioilla, mutta korrelaatioiden erot pienenevät kauempana palolähteen keski akselista. Myös Cooper teki tarkennuksia Alpertin korrelaatioihin. Hän tutki palokaasujen lämpötilaprofiilien hienorakenteita aivan katon rajassa ja sisällytti kattosuihkumallin korrelaatioon myös tarkastelupisteen etäisyyden katosta (46).

## 7 NIMELLISET AIKA-LÄMPÖTILAKÄYRÄT

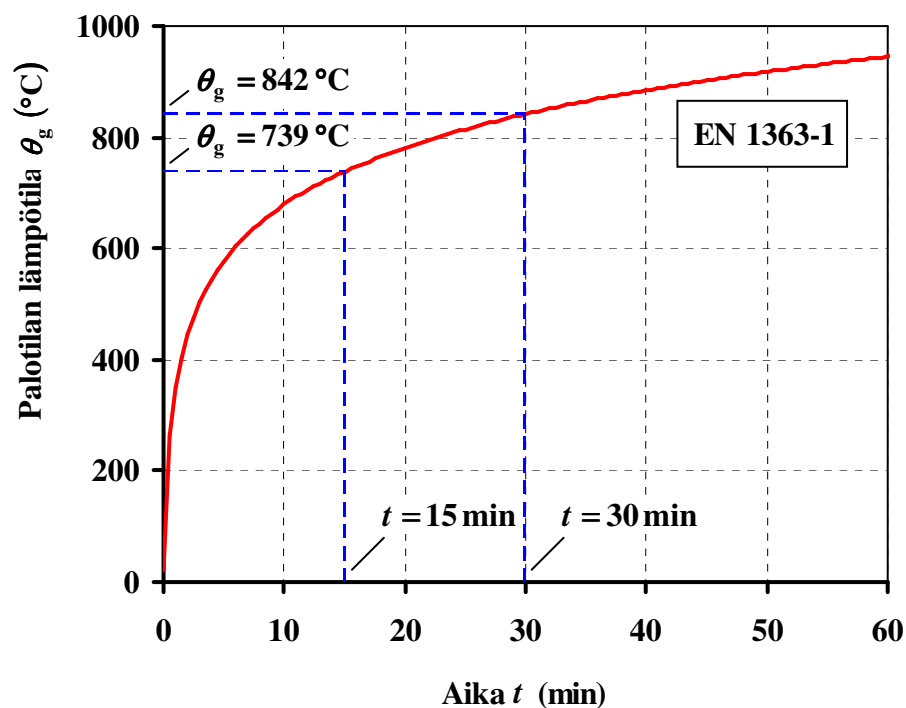
### 7.1 EN 1363-1 –standardin aika-lämpötilakäyrä

Teräsrakenteiden palotekninen mitoitus perustuu yleensä nimelliseen aika-lämpötilakäyrään, joka kuvaa suunnittelupaloa eikä siten mitään yksittäistä todellista tulipaloa. Nimelliset aika-lämpötilakäyrät pohjautuvat standardipolttokokeisiin, joita on kehitetty useisiin eri tarkoituksiin. Aiemmin nimellisiä aika-lämpötilakäyriä kutsuttiin standardipaloiksi. Standardipalot luotiin paloteknisen suunnittelun apuvälineiksi, jotta rakennusosalle voidaan asettaa yksiselitteisiä vaatimuksia palonkestävyyden suhteen ja jotta eri rakennusosien palonkestävyyksiä voidaan yhteismitallisesti verrata keskenään. Standardipaloa käytetään polttokokeissa ja laskennallisessa palomitoituksessa. Laskennallisessa palomitoituksessa palotilan kaasun lämpötilan oletetaan noudattavan nimellistä aika-lämpötilakäyriä, jonka perusteella lasketaan rakennusosan lämpiäminen. Standardipolttokokeessa taas rakennusosan palorasitusta kontrolloidaan uunin lämpötilalla, joka noudattaa nimellistä aika-lämpötilakäyriä. Vaikka aika-lämpötilakäyriä on useita erilaisia, niin Suomessa käyttöön on vakiintunut ISO-834 –standardin aika-lämpötilakäyrä, joka perustuu oletukseen, että rakennuspalojen palavat materiaalit ovat enimmäkseen selluloosapohjaisia. Vaikka tämä aika-lämpötilayhteys esitetään nykyään EN 1363-1 –standardina, niin itse aika-lämpötilayhteys on edelleen sama (9):

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (49)$$

Standardipolttokokeissa palotilan alkulämpötila on 20 °C, mutta laskennallisessa palomitoituksessa se valitaan olosuhteiden mukaan. Kuvassa 13 on esitetty palotilan kaasun lämpötilan kehittyminen EN 1363-1 –standardin aika-lämpötilakäyrässä. Kuljettumisen lämmönsiirtokerroin on selluloosapohjaisessa palossa 25 W/m<sup>2</sup>°C (9). EN 1363-1 –standardin aika-lämpötilakäyrä kuvaa huonepaloa lieskahduksen jälkeen, jolloin käyrän alkupisteessä todellinen tulipalo on kehittynyt jo joitakin minuutteja. Aika-lämpötilakäyrä on kasvava eksponenttifunktio, joka ei huomioi palon hiipumista. Oletettuun palonkehitykseen perustuvaan mitoitukseen verrattuna

EN 1363-1 –standardin aika-lämpötiläkäyrään perustuva mitoitus tuottaa yleensä turvallisella puolella olevan ratkaisun. Vaikka EN 1363-1 –standardin aika-lämpötiläkäyrä soveltuu hyvin huonepaloon, niin se ei yleensä sovellu paikalliseen paloon, jolloin se johtaa teräsrakennusosissa kohtuuttomiin palosuojauksiin. Varsinkin korkeissa yksikerroksisissa hallirakennuksissa tilan mittoihin ja palokuorman tiheyteen nähden todellinen tulipalo ei yleensä yllä EN 1363-1 –standardin kuvaamaan tilanteeseen.

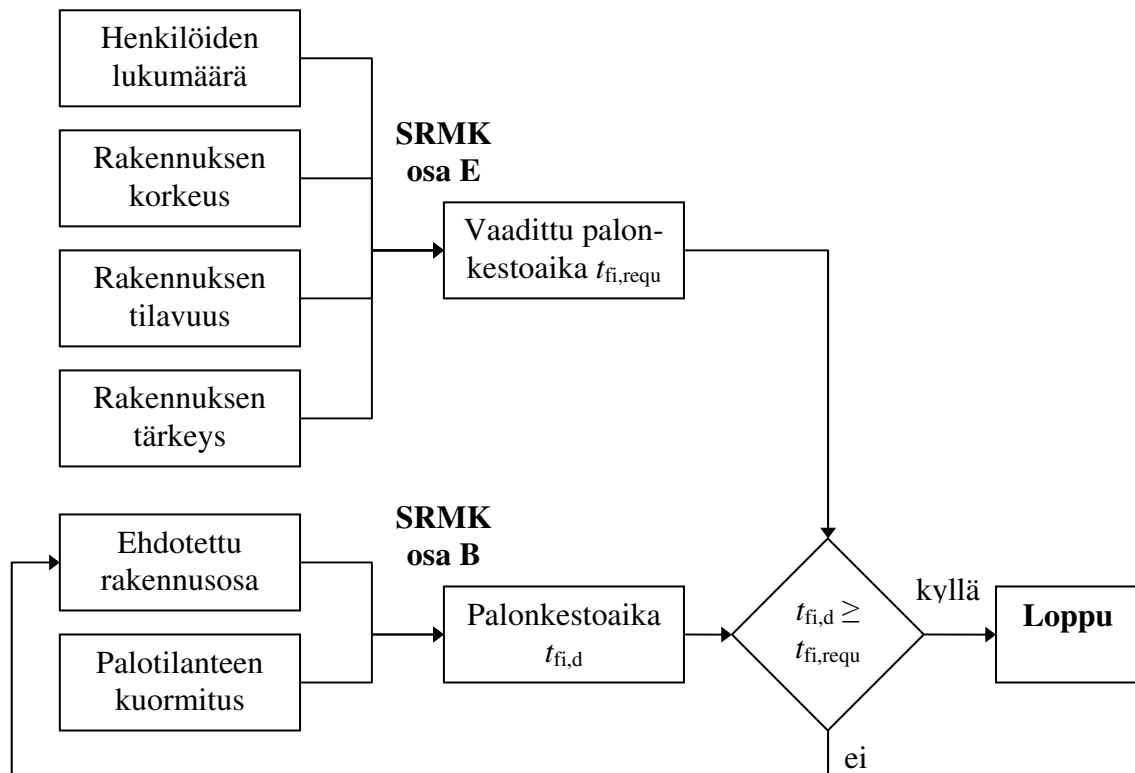


Kuva 13. Standardin EN 1363-1 aika-lämpötiläkäyrä.

## 7.2 Rakennusosan paloluokka

Rakennusosalle voidaan asettaa vaatimuksia palotilanteen kestävyiden ja osastoivuuden suhteen. Kantavuusvaatimusta merkitään tunnuksella R ja osastoivuusvaatimusta yhdistetyllä tunnuksella EI, joka sisältää vaatimuksen rakennusosan tiiveydestä ja eristävydestä. Kirjaintunnuksen jälkeen ilmoitetaan minuutteina rakennusosalta vaadittava palonkesto-aika, jonka ajan rakennusosan edellytetään täyttävän sille asetetut vaatimukset. Näin muodostuva merkintä on

rakennusosan palonkestoajaluokka tai lyhyemmin paloluokka (66). Nimelliseen aika-lämpötiläkäyrään perustuvassa palomitoituksessa rakennusosan palorasitusta kuvataan aika-lämpötiläkäyrällä vaaditun paloluokan ajan, jonka jälkeen lasketaan rakenteen kestävyys. Jos rakennusosa täyttää palomitoitusehdon vaaditun palonkestoajan jälkeen, niin se voidaan hyväksyä. Muussa tapauksessa rakennusosaa muutetaan siten, että palomitoitusehto täyttyy. Nimelliseen aika-lämpötiläkäyrään pohjautuvassa palomitoituksessa ei huomioida eroja eri teräsosien saamassa palorasituksessa. Kuvassa 14 esitetään esimerkki standardipalomitoituksen algoritmista, jossa oletetaan, että palotilan kaasun lämpötila noudattaa EN 1363-1 –standardin aika-lämpötiläkäyrää ja terässauvojen poikittainen ja pitkittäinen lämpötilajakauma on tasan jakautunut (6).



**Kuva 14. Teräsrakennusosan palotekninen mitoitus EN 1363-1 standardin aika-lämpötiläkäyrän avulla SRMK:n mukaan (6).**

## 8 LÄMMÖNSIIRTYMISMEKANISMIT

### 8.1 Johtuminen

Luonnossa lämpötilaerot pyrkivät aina tasoittumaan, joten lämpötilagradientin kohdalla tapahtuu aina spontaania lämpöenergian siirtymistä korkeammasta energiatilasta matalampaan. Lämpöenergiaa voi siirtyä johtumalla, kuljettumalla ja säteilemällä (16). Kiinteän ainekappaleen ulkopinnalle lämpöenergiaa voi siirtyä ympäristöstä kaikilla kolmella siirtymismekanismilla, mutta kiinteän aineen sisällä lämpöenergiaa voi siirtyä vain johtumalla. Kiinteän huokoisen aineen sisällä lämpöenergiaa voi taas siirtyä kaikilla kolmella siirtymismekanismilla. Tulipalossa vapautuva kokonaisenergiamäärä on suuri, jolloin palolähteen ja ympäristön välille muodostuu huomattavia lämpötilaeroja. Tulipalossa lämpöenergiaa siirtyy palolähteestä ympäristöön pääasiassa kuljettumalla ja säteilemällä. Alkuvaiheessa kuljettumisen osuus on suuri, mutta säteilyn osuus kasvaa lieskojen kasvaessa. Tulipalossa lämpöenergiaa siirtyy myös johtumalla, mutta palon kehittyessä sen osuus muihin siirtymismekanismeihin verrattuna on pieni (25).

Tulipalosta teräsosan pinnalle siirtynyt lämpöenergia siirtyy johtumalla teräsosan sisälle. Johtumisessa lämpöenergiaa siirtyy molekyyliltä toiselle niiden keskinäisissä törmäyksissä. Vierekkäisten molekyyliden lämpötilaero ilmenee niiden liike-energiaerona, joka tasoittuu molekyyliden keksinäisissä törmäyksissä, jolloin niiden lämpötilaero tasoittuu. Kiinteiden aineiden lisäksi lämpöenergiaa siirtyy johtumalla myös fluideissa, mutta tällöin johtumisen osuus kokonaislämmönsiirtymistä on melko pieni ja sillä on merkitystä lähinnä ohuissa ainekerroksissa (16). Fourier esitti Fourierin lämmönjohtumislakina tunnetun johtumisen yhtälön, joka esitetään osittaisdifferentiaalimuodossa suorakulmaisessa koordinaatistossa seuraavasti (43)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q = \rho c_p(\theta) \frac{d\theta}{dt} \quad (50)$$

jossa  $\lambda_x(\theta)$ ,  $\lambda_y(\theta)$  ja  $\lambda_z(\theta)$  ovat materiaalin lämmönjohtavuudet koordinaatiston akselien suunnissa sekä  $\rho c_p(\theta)$  on materiaalin lämpökapasiteetti. Jos kappaleen sisällä ei kehity lämpöenergiaa, niin kappaleen sisäinen lämmöntuotto  $Q$  merkitään nolllaksi. Jos materiaali on homogeeninen ja isotrooppinen, niin materiaalin lämmönjohtavuus on tarkastelusuunnasta riippumaton eli lämmönjohtavuus on vain lämpötilan funktio  $\lambda(\theta)$ . Jos otetaan käyttöön materiaaliin johtuvan ja varastoituvan lämpöenergian suhdetta kuvaava lyhennysmerkintä lämpötilanjohtavuus  $a$ , niin Fourierin lämmönjohtumislain yhtälö yksinkertaistuu muotoon (2,14):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \nabla^2 \theta = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (51)$$

$$a = \frac{\lambda(\theta)}{\rho c_p(\theta)} \quad (52)$$

Lämmönjohtavuus kuvaa materiaalin kykyä siirtää lämpöenergiaa materiaalin sisällä (2). Lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuus normaalilämpötila-alueella on pientä ja lämmönjohtavuudelle usein otaksutaan keskimääräinen vakioarvo. Tulipalossa lämpötila-alue on kuitenkin niin laaja, että lämmönjohtavuuden lämpötilariippuvuus huomioidaan (16).

## 8.2 Kuljettuminen

Kuljettumisessa eli konvektiossa lämpöenergiaa siirtyy materiaalikappaleen pinnalle tai pinnalta pinnan ohi virtaavan fluidin välityksellä. Lämpöenergian siirtyminen tapahtuu aivan pinnan läheisyydessä olevassa rajakerroksessa. Kuljettumisessa erotetaan fluidin liikkeen aiheuttaman voiman perusteella luonnollinen ja pakotettu kuljettuminen. Luonnollisessa kuljettumisessa liike aiheutuu lämpötilagradientista johtuvasta nosteesta ja pakotetussa kuljettumisessa liike aiheutuu jostain ulkoisesta voimasta (16,25). Newton esitti lämmönsiirtymiselle kiinteän aineen pinnalta kokemusperäisen yhteyden, joka tunnetaan Newtonin jäähtymislakina. Jäähtymislaki

on myös määritelmä kuljettumista kuvaavalla kuljettumisen lämmönsiirtokertoimelle  $\alpha_c$ , kun kuljettumisen nettolämpövuoto  $\dot{h}_{\text{net,c}}$  esitetään seuraavasti (5,25,43)

$$\dot{h}_{\text{net,c}} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m)^m \quad (53)$$

jossa  $\theta_g$  on ei aivan pinnan läheisyydessä olevan fluidin lämpötila,  $\theta_m$  on pinnan lämpötila ja  $m$  on konvektiopotenssi, jonka arvoksi yksinkertaisissa tarkasteluissa voidaan otaksua yksi. Kuljettumisen lämmönsiirtokerroin ei ole materiaalivakio, vaan se riippuu useista välittömistä ja välillisistä seikoista kuten materiaalin lämmönjohtavuus ja ominaislämpö, fluidin virtauksen viskositeetti, fluidin tiheys, fluidin ja pinnan välinen lämpötilaero sekä pinnan rakenne. Normaalilämpötila-alueella kuljettumisen lämmönsiirtokerroin vaihtelee luonnollisessa kuljettumisessa välillä 5...25 W/m<sup>2</sup>°C ja pakotetussa kuljettumisessa välillä 10...500 W/m<sup>2</sup>°C (5).

### 8.3 Säteily

Lämpösäteily on hiukkasten tuottamaa sähkömagneettista aaltoliikettä, jota emittoituu hiukkasten palatessa alemmalle energiatasolle. Lämpösäteily ei siten tarvitse siirtymiseen väliainetta. Kaikki kiinteät aineet, nesteet ja kaasut säteilevät ympärilleen lämpösäteilyä. Kun lämpösäteily kohtaa pinnan, niin se voi osittain absorboitua, heijastua takaisin ja läpäistä pinnan. Lämpösäteilyssä lämpöenergiaa siirtyy kuumemmasta pinnasta kylmempään, koska kuumempi pinta säteilee viileämpää pintaa tehokkaammin (16). Stefan-Boltzmannin yhtälön mukaan harmaan kappaleen säteilemän lämpöenergian säteilyvoimakkuus  $E$  on verrannollinen kappaleen absoluuttisen lämpötilan neljänteen potenssiin (16)

$$E = \varepsilon \sigma \theta^4 \quad (54)$$

jossa  $\sigma$  on Stefan-Boltzmannin vakio  $5,670 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup> ja  $\varepsilon$  on emissiivisyys. Mooney esitti palotilanteen säteilyn nettolämpövuolle  $\dot{h}_{\text{net,r}}$  yhtälön (43)

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \varepsilon_m \sigma (\theta_g^4 - \varepsilon_f \theta_m^4) \quad (55)$$

jossa  $\varepsilon_f$  on tulipalon emissiivisyys ja  $\varepsilon_m$  on rakenteen pinnan emissiivisyys. Kansainvälisen palotutkimuskomitean paloteknisen työryhmän (CIB W14) raportissa vuodelta 1983 esitetään kaava 55 hieman yksinkertaisemmassa muodossa (43)

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \varepsilon_{\text{res}} \sigma (\theta_g^4 - \theta_m^4) \quad (56)$$

jossa  $\varepsilon_{\text{res}}$  on tulipalon ja materiaalin pinnan välinen resultoiva emissiivisyys. Kuvitteellista tarkasteltavassa lämpötilassa täydellisesti emittoivaa ja absorboivaa kappaletta kutsutaan mustaksi kappaleeksi, jota käytetään vertailukappaleena verrattaessa todellisen pinnan säteilyominaisuuksia (2). Musta kappale emittoi jokaisella lämpötilan ja aallonpituuden arvolla enemmän energiaa kuin yksikään todellinen niin sanottu harmaa kappale (16). Materiaalin emissiivisyys  $\varepsilon$  on pinnan säteilyn ja säteilyn vastaanottamisen suhde, joka mustalla kappaleella on yksi ja harmaalla kappaleella aina alle yksi. Todellisilla pinnoilla emissiivisyys ei ole vakio, vaan se riippuu pinnan lämpötilasta, säteilyn aallonpituudesta sekä säteilyn ja pinnan normaalin välisestä kulmasta (2). Todelliset kappaleet myös säteilevät diffuusisti eli säteilytehokkuus on kaikkiin suuntiin yhtä suuri (26). Palomitoituksessa liekin ja materiaalin pinnan emissiivisyyksille otaksutaan likimääräiset vakioarvot, jolloin resultoiva emissiivisyys  $\varepsilon_{\text{res}}$  on (43):

$$\varepsilon_{\text{res}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_f} + \frac{1}{\varepsilon_m} - 1} = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_f}{\varepsilon_f + \varepsilon_m - \varepsilon_m \varepsilon_f} \quad (57)$$

CIB W14:n raportissa vuodelta 1983 esitetään yksinkertaisempi tapa laskea resultoiva emissiivisyys, missä otaksutaan kaavan 57 jälkimmäisen muodon nimittäjän arvoksi yksi, jolloin kaava supistuu muotoon (9,43):

$$\varepsilon_{\text{res}} = \varepsilon_f \varepsilon_m \quad (58)$$



Huonepalossa tai kun lieskarintaman paksuus on yli 2 metriä, niin tulipalon emissiivisyydeksi voidaan otaksua yksi (47). Eurocodessa esitetään teräksen emissiivisyydeksi 0,7 sekä teräsosan ja tulipalon resuloivaksi emissiivisyydeksi 0,7 (9,12). Se on melko korkea arvo, kun esimerkiksi lähteessä (43) sekä SRMK:n osassa B7-1996 käytetään resuloivalle emissiivisyydelle arvoa 0,5. Myös Eurocoden kehitystyössä todettiin arvon 0,5 sopivan hyvin yhteen laskettujen ja kokeissa mitattujen lämpötilojen kanssa (54,65). Lähteessä (43) esitetään tulipalon emissiivisyydeksi 0,8 ja teräsosan pinnan emissiivisyydeksi 0,625. Nämä arvot tuottavat resuloivaksi emissiivisyydeksi 0,5. Teräsosan pinnan emissiivisyyteen vaikuttaa osan pintakäsittely, jota voi hyödyntää esimerkiksi palosuojamaalien kehityksessä. Tässä työssä käytetään resuloivalle emissiivisyydelle arvoa 0,5.

Säteilyn lämmönsiirtokerroin  $\alpha_r$  riippuu säteilevien pintojen välisestä lämpötilaerosta sekä pintojen emissiivisyyksistä ja näkyvyydestä suhteessa toisiinsa. Kun kuljettumisen lämmönsiirtokerroimelle voidaan paloteknisessä mitoituksessa otaksua palotilanteesta riippuva vakioarvo, niin säteilyn lämmönsiirtokerroin ei ole vakio, vaan se muuttuu niin kauan kun tarkasteltavien pintojen välillä on lämpötilaero. Säteilystä vastaanottavan kappaleen saama säteilyn lämpövuoto on kappaleiden välisen lämpötilaeron lisäksi riippuvainen pintojen välisestä keskinäisestä näkyvyydestä, joka huomioidaan näkyvyyskerroimella  $\Phi$ . Näkyvyyskerroin pintojen 1 ja 2 väliselle lämpösäteilylle on se osa pinnalta 1 diffuusisti säteilevästä lämpöenergiasta, joka kohtaa pinnan 2. Näkyvyyskerroimen arvo on yksi, kun kappaleeseen kohdistuu säteilyä puoliavaruudesta. Näkyvyyskerroin on riippuvainen tarkasteltavien pintojen pinta-alasta, niiden välisestä etäisyydestä sekä keskinäisestä suuntauksesta (5,9). Säteilyn lämmönsiirtokerroin lasketaan seuraavasti:

$$\alpha_r = \frac{\Phi \varepsilon_{\text{res}} \sigma}{\theta_g - \theta_m} \left[ (\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad (59)$$

## 9 TERÄKSEN OMINAISUUDET KORKEISSA LÄMPÖTILOISSA

### 9.1 Viruminen

Teräs on palamaton materiaali, jonka sulamispiste on noin 1530 °C (46). Korkeissa lämpötiloissa teräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet kuitenkin heikkenevät sekä teräsosaan muodostuu helpommin plastisia muodonmuutoksia. Lisäksi teräsosan jo osittainkin estyneestä lämpölaajenemisesta aiheutuu lisäjännityksiä. Eurocoden 1993 osassa 1-2 teräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien heikkeneminen korkeissa lämpötiloissa huomioidaan polttokokeisiin perustuvalla jännitys-venymäyhteydellä. Kokeissa havaittiin teräksen myötörajan heikkenemisen alkavan jo 300 °C:n lämpötilassa, vaikka teräs menettää lopullisesti lujuutensa noin 1000 °C:ssa (60). Teräksen lämpötilan kohotessa yli 200 °C:n teräksen jännitys-venymäyhteys muuttuu epälineaariseksi, minkä jälkeen yksiselitteisten myötörajan ja kimmokertoimen arvojen määrittäminen kokeilla on hankalaa. Teräksen myötöraja korkeissa lämpötiloissa määritetäänkin osuutena teräksen kokonaismuodonmuutoksesta, jolloin myötöraja saattaa joissakin koetilanteissa vaihdella melko paljon (49). Eurocodessa teräksen palontilanteen myötöraja on 2 % kokonaisvenymää vastaava muodonmuutos, kun SRMK:n osassa B7-1996 vastaava osuus on 0,2 %. Kuormitusnopeus vaikuttaa teräksen jännitys-venymäyhteyteen, koska hitaasti kuormitettuna teräs deformoituu eri tavalla kuin nopeasti kuormitettuna. Teräksen venymä on yleensä suurempi hitaalla kuormituksella kuin nopealla kuormituksella, jolloin materiaali ikään kuin menee lukkoon.

Teräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa määritetään vakiolämpötila- tai transienttikokeilla. Kokeet eroavat toisistaan siinä, että mitä suureita muutetaan kokeen aikana ja mitä pidetään vakiona (34). Vakiolämpötilakoe on melko helppo suorittaa, joten aiemmin sitä on käytetty lähes yksinomaan. Vakiolämpötilakokeessa teräskoekappale lämmitetään mittauslämpötilaan, jossa se vedetään poikki vakionopeudella tai jännitystilaa tasaisesti nostamalla. Teräksen jännitys-venymäyhteys saadaan suoraan kokeessa tallennetusta jännitys-venymäyhteydestä. Transienttikoe on hieman vaikeampi suorittaa kuin vakiolämpötilakoe. Käytännössä on kuitenkin havaittu, että transienttikoe kuvaa

paremmin teräksen käyttäytymistä korkeissa lämpötiloissa kuin vakiolämpötilakoe, joten nykyään käytetään yhä enemmän transienttikoeita vakiolämpötilakokeen sijaan. Transienttikokeessa teräskoe kappaletta kuormitetaan vakiokuormalla samalla, kun koekappaleen lämpörasitusta nostetaan vakionopeudella esimerkiksi 20 °C/min, kunnes koekappale myötäämällä saavuttaa ennalta asetetun venymäärän tai murtuu. Transienttikokeessa mitataan lämpötila-venymäyhteys, josta vähennetään lämpölaajenemisen osuus ja tulosten perusteella saadaan teräksen jännitys-venymäyhteys eri lämpötiloissa. Transienttikokeessa on mukana viruman vaikutus, jolloin niillä saadaan alhaisempi myötöraja kuin vakiolämpötilakokeella (37,49).

Anderberg ja Thelandersson esittivät vuonna 1976, että teräksen kokonaisvenymä jaetaan virumasta ja jännityksestä aiheutuvaan venymään sekä vapaaseen lämpölaajenemiseen (43). Virumalla tarkoitetaan vakiokuormituksella ajan mukana tapahtuvaa muodonmuutosta. Teräksellä viruman vaikutus on normaalilämpötilassa hyvin pieni eikä sitä huomioida mitoituksessa, mutta teräksen lämpötilan kohotessa viruman vaikutus kasvaa merkittävästi, jolloin se pitää huomioida mitoituksessa. Jotta viruman vaikutus voidaan sisällyttää teräksen muodonmuutoksiin, niin pitää tuntea teräsosan jännitys- ja lämpötilahistoria. Tällainen menetelmä onkin kehitetty teräspalkeille, mutta se on käytännön suunnittelua varten liian vaivalloinen ja monimutkainen. Virumasta aiheutuvien muodonmuutosten määrittämiseksi onkin kehitetty karkeampi menetelmä, jossa oletetaan, että teräksen lämpiämisnopeus ei vaikuta merkittävästi teräksen muodonmuutoksiin korkeissa lämpötiloissa. Tällöin teräkselle voidaan määrittää viruman vaikutuksen sisältävät jännitys-venymäyhteydet ilman, että pitää tuntea teräsosan kuormitus- ja lämpötilahistoria (6). Kun aiemmin teräksen palotilanteen jännitys-venymäyhteys määritettiin vakiolämpötilakokeilla, niin viruman vaikutus ei sisällynyt teräksen jännitys-venymäyhteyteen. Koska teräksen viruman vaikutuksen huomioiminen paloteknisessä mitoituksessa oli hankalaa, niin tuolloin esitettiin teräksen kriittisen lämpötilan ylärajaksi viruman perusteella 600 °C:tta. Eurocodessa taas teräksen palotilanteen jännitys-venymäyhteys määritetään transienttikokeiden perusteella, jolloin viruman vaikutus sisältyy jännitys-venymäyhteyteen eikä teräksen kriittisen lämpötilan ylärajaa enää esitetä (52,58).

## 9.2 Lämpöpiteneminen

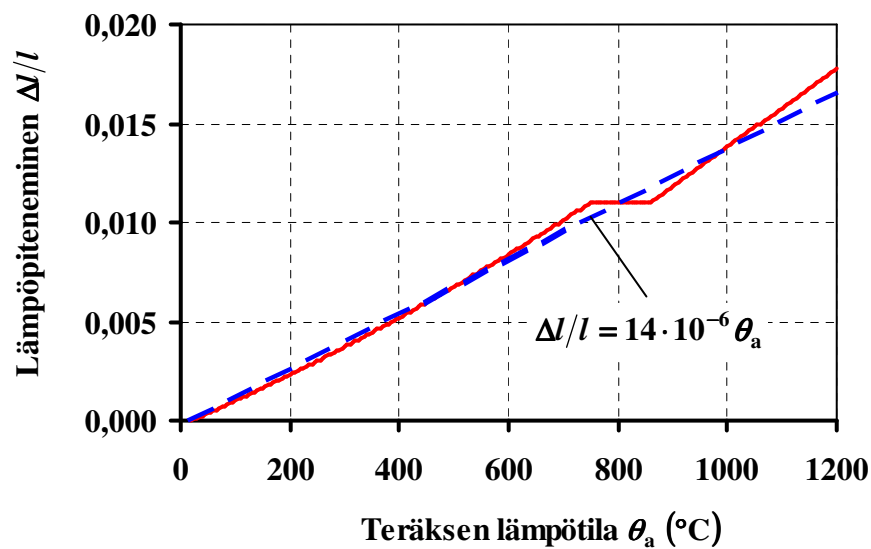
Eurocodessa teräksen lämpöpitenemistä merkitään venymän sijaan suhteella  $\Delta l/l$ , jossa  $l$  on teräsosan referenssipituus 20 °C:n lämpötilassa ja  $\Delta l$  on lämpötilan muutoksen aiheuttama lämpöpiteneminen. Teräksen lämpöpiteneminen lasketaan seuraavasti (6,12):

$$\Delta l/l = 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4} \quad \text{kun } 20 \leq \theta_a < 750 \text{ °C}$$

$$\Delta l/l = 1,1 \cdot 10^{-2} \quad \text{kun } 750 \leq \theta_a \leq 860 \text{ °C} \quad (60)$$

$$\Delta l/l = 2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 6,2 \cdot 10^{-3} \quad \text{kun } 860 < \theta_a \leq 1200 \text{ °C}$$

Teräksen lämpöpiteneminen teräksen lämpötilan funktiona esitetään kuvassa 15. Aiemmin esitettiin teräksen lämpöpiteneemiselle, ominaislämpökapasiteetille ja lämmönjohtavuudelle analyyttisiä laskelmia ja käsinlaskentaa varten yksinkertaisemmat lineaariset korrelaatiot, jotka tässä työssä esitetään kyseisissä kuvaajissa katkoviivalla ja niiden matemaattisilla korrelaatiolla.

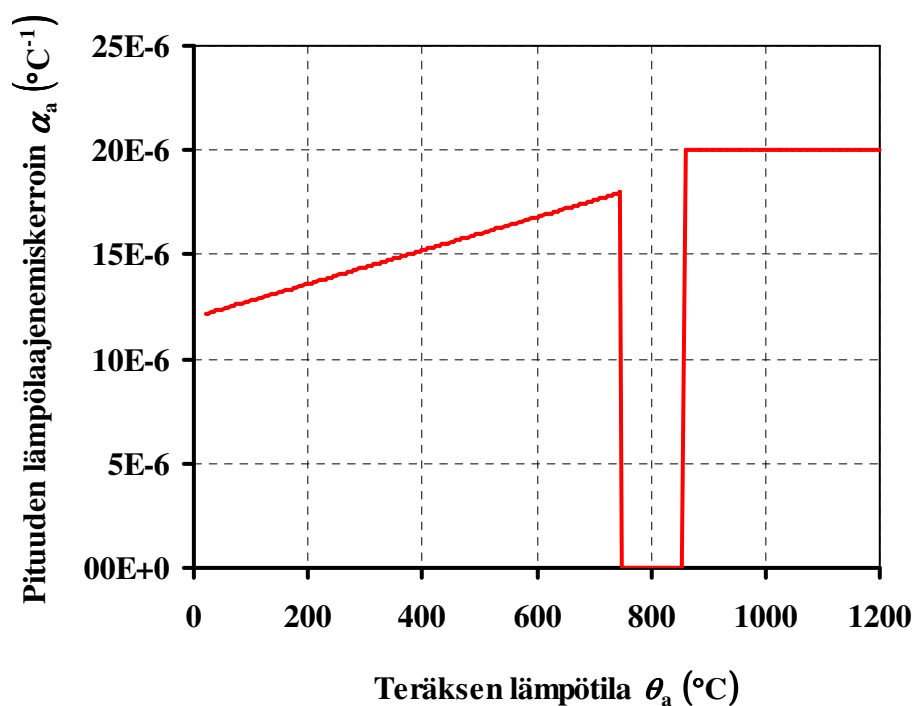


Kuva 15. Teräksen lämpöpiteneminen lämpötilan funktiona.

Teräksen pituuden lämpölaajenemiskerroin  $\alpha_a$  saadaan teräksen lämpöpiteneemisestä derivoimalla se teräksen lämpötilan suhteen:

$$\alpha_a = \frac{1}{l} \frac{dl}{d\theta_a} \quad (61)$$

Teräksen pituuden lämpölaajenemiskerroin teräksen lämpötilan funktiona esitetään kuvassa 16.



**Kuva 16. Teräksen pituuden lämpölaajenemiskerroin lämpötilan funktiona.**

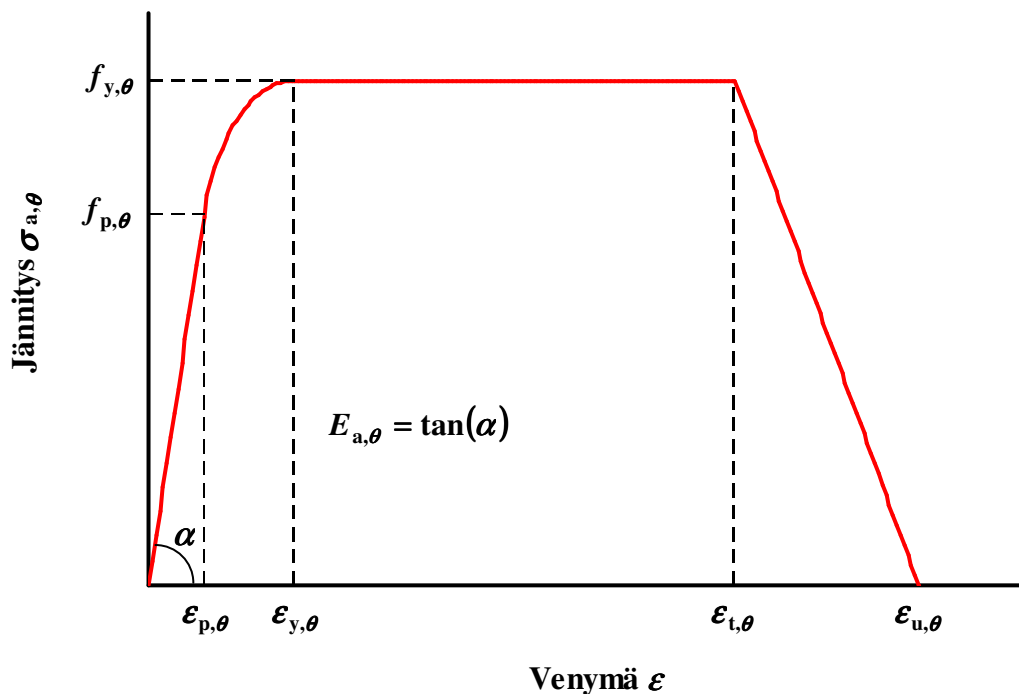
Teräksen lämpölaajeneminen pysähtyy hetkeksi teräksen lämpötilan ollessa välillä 750...860 °C:tta, jolloin teräksen hienorakenne muuttuu ferriitti-pearliittisesta austeniittiseksi ja tähän rakennemuutokseen kuluu runsaasti energiaa (43,60). Laskettaessa teräksen lämpöpiteneemisestä aiheutuvia lisäjännityksiä Eurocoden 1991 osan 1-5 mukaan, voidaan teräksen pituuden lämpölaajenemiskertoimelle käyttää likiarvoa  $10 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$ . SRMK:n osassa B7-1996 vastaava likiarvo on  $12 \cdot 10^{-6} \text{ °C}^{-1}$  (10,65).

### 9.3 Teräksen jännitys-venymäyhteys

Eurocodessa teräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa muodostetaan kolmella osamallilla, joita havainnollistaa kuva 17:

- I Kimmoinen alue:  $\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$
- II Transientti-elliptinen alue:  $\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$
- III Plastinen alue:  $\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$

jossa  $\varepsilon$  on venymä,  $\varepsilon_{p,\theta}$  on suhteellisuusrajaa vastaava venymä,  $\varepsilon_{y,\theta}$  on myötövenymä ja  $\varepsilon_{t,\theta}$  on myötörajaa vastaava rajavenymä. Suhteellisuusrajaa vastaavan venymän ylittyessä teräsosaan jää pysyviä muodonmuutoksia.



Kuva 17. Teräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötilassa.

Kuvan 17 jännitys-venymäyhteys määritetään taulukon 8 mukaan, kun teräksen lämpiämisnopeudeksi otaksutaan 2...50 °C/min. Tulipaloissa suojaamattoman teräsoosan lämpiämisnopeus on keskimäärin 5...50 °C/min (12).

**Taulukko 8**

TERÄKSEN JÄNNITYS-VENYMÄYHTEYS KORKEISSA LÄMPÖTILOISSA (12)

Venymäalue	Jännitys	Tangenttimoduli		
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$		
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + \left(\frac{b}{a}\right) \sqrt{a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \sqrt{a^2 + (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2}}$		
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0		
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}}{\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}}\right)$			
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00			
<b>Parametrit:</b>	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$	$\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$	$\varepsilon_{u,\theta} = 0,02$
<b>Yhtälöt:</b>	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) \left( \varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + \frac{c}{E_{a,\theta}} \right)$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$			

jossa  $f_{y,\theta}$  on myötöraja,  $f_{p,\theta}$  on suhteellisuusraja,  $E_{a,\theta}$  on lineaarisen kimmoisen alueen alkukimmokerroin ja  $\varepsilon_{u,\theta}$  on murtovenymä. Eurocodessa teräkselle esitetään kaksi eri myötörajaa: tehollinen myötöraja, joka perustuu 2 % kokonaisvenymää vastaavaan jännitykseen ja muunnettu kerroin, joka perustuu 1 % kokonaisvenymää

vastaavaan jännitykseen. Jos teräsosalle ei ole asetettu tiukkoja muodonmuutoskriteereitä, niin suojaamattomien teräsosien palomitoituksessa käytetään tehollista myötörajaa. Teräksen jännitys-venymäyhteyden pienennystekijät esitetään taulukossa 9 ja kuvassa 18.

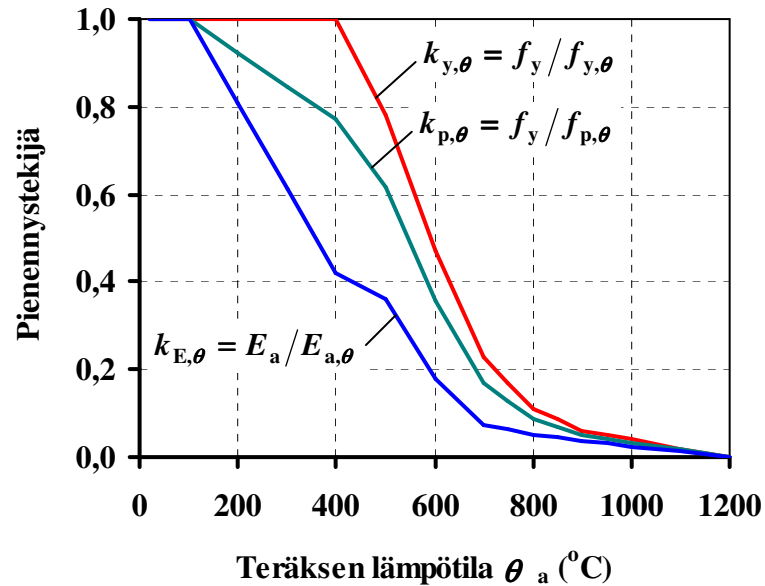
### Taulukko 9

TERÄKSEN JÄNNITYS-VENYMÄYHTEYDEN PIENENNYSTEKIJÄT KORKEISSA LÄMPÖTILOISSA (12)

Teräksen lämpötila	Tehollisen myötörajan pienennystekijä	Suhteellisuusrajan pienennystekijä	Kimmokertoimen pienennystekijä
$\theta_a$ °C	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20	1,000	1,000	1,000
100	1,000	1,000	1,000
200	1,000	0,807	0,900
300	1,000	0,613	0,800
400	1,000	0,420	0,700
500	0,780	0,360	0,600
600	0,470	0,180	0,310
700	0,230	0,075	0,130
800	0,110	0,050	0,090
900	0,060	0,0375	0,0675
1000	0,040	0,0250	0,0450
1100	0,020	0,0125	0,0225
1200	0,000	0,0000	0,0000

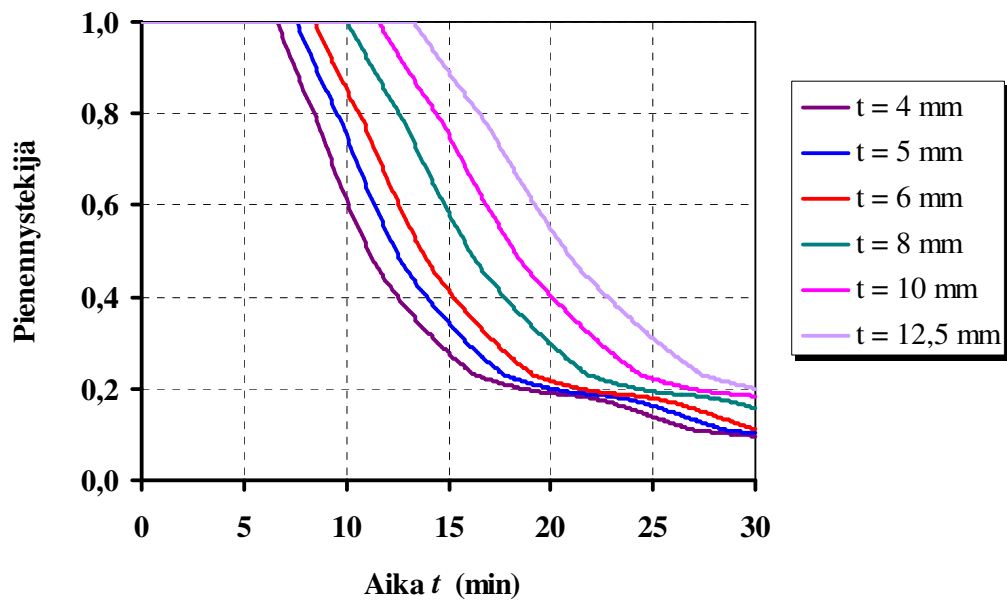


jossa  $k_{y,\theta}$  on tehollinen myötöraja suhteessa myötörajaan 20 °C:n lämpötilassa,  $k_{p,\theta}$  on suhteellisuusraja suhteessa myötörajaan 20 °C:n lämpötilassa ja  $k_{E,\theta}$  on kimmokerroin suhteessa 20 °C:n lämpötilan arvoon.

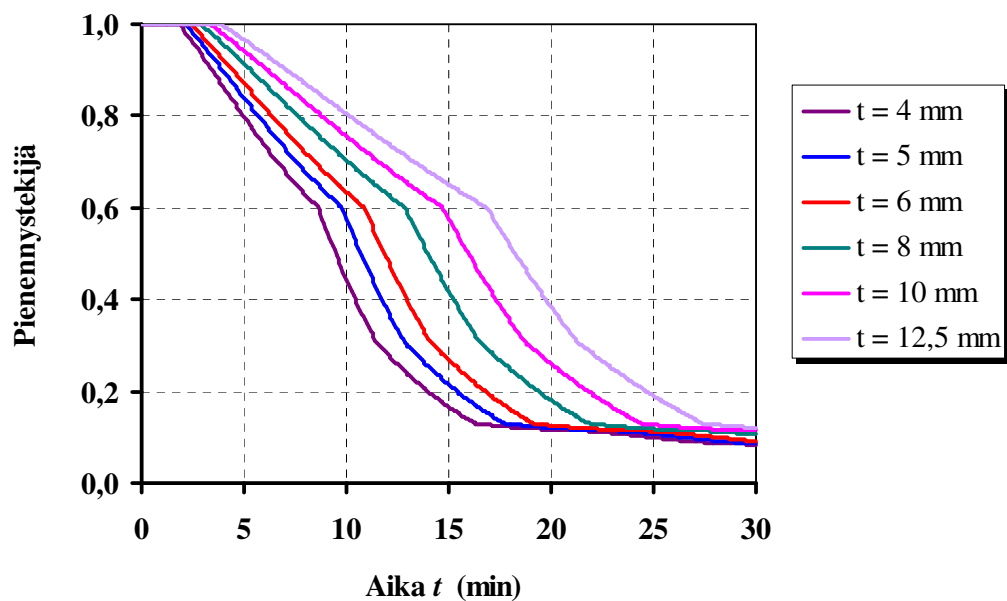


**Kuva 18. Teräksen jännitys-venymäyhteyden pienennystekijät korkeissa lämpötiloissa.**

Kuvissa 19 ja 20 esitetään suojaamattomien teräsputkien myötörajan ja kimmokerroimen pienennystekijöiden muuttuminen EN 1363-1 –standardipalossa teräsputken eri ainevahvuuksilla.



Kuva 19. Suojaamattoman teräsputken myötörajan pienennystekijä EN 1363-1 –standardipalossa teräsputken eri ainevahvuuksilla, kun  $\epsilon_{res} = 0,5$ .



Kuva 20. Suojaamattoman teräsputken kimmokertoimen pienennystekijä EN 1363-1 –standardipalossa teräsputken eri ainevahvuuksilla, kun  $\epsilon_{res} = 0,5$ .

#### 9.4 Teräksen muut termiset ominaisuudet

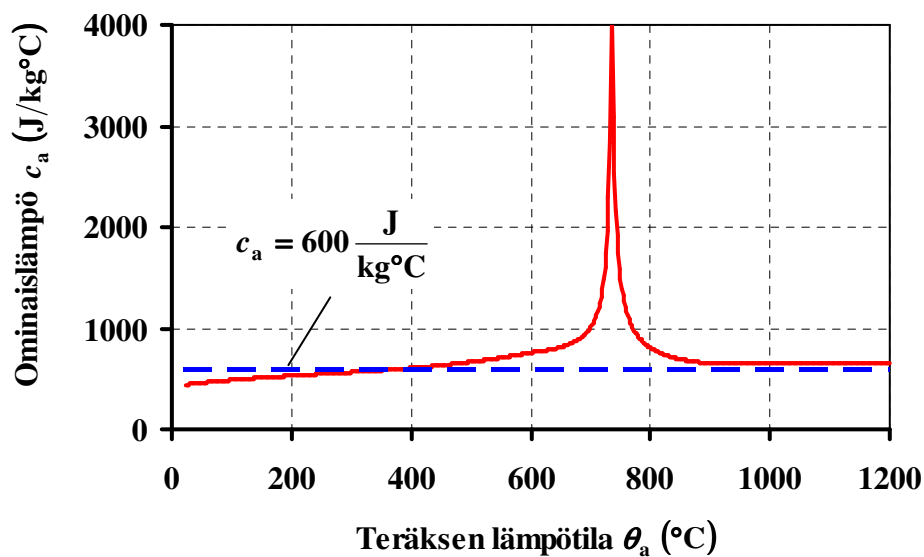
Ominaislämpökapasiteetti on lämpöenergia, joka tarvitaan nostamaan materiaalin lämpötilaa 1 °C:lla. Teräksen ominaislämpökapasiteetti  $c_a$  esitetään kuvassa 21 ja se lasketaan seuraavasti, kun ominaislämpökapasiteetin yksikkö on J/kg°C (6,12):

$$c_a = 425 + 0,773\theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 \cdot 10^{-6}\theta_a^3 \quad 20 \leq \theta_a < 600 \text{ °C}$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad 600 \leq \theta_a < 735 \text{ °C}$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad 735 \leq \theta_a < 900 \text{ °C}$$

$$c_a = 650 \quad 900 \leq \theta_a \leq 1200 \text{ °C}$$
(62)



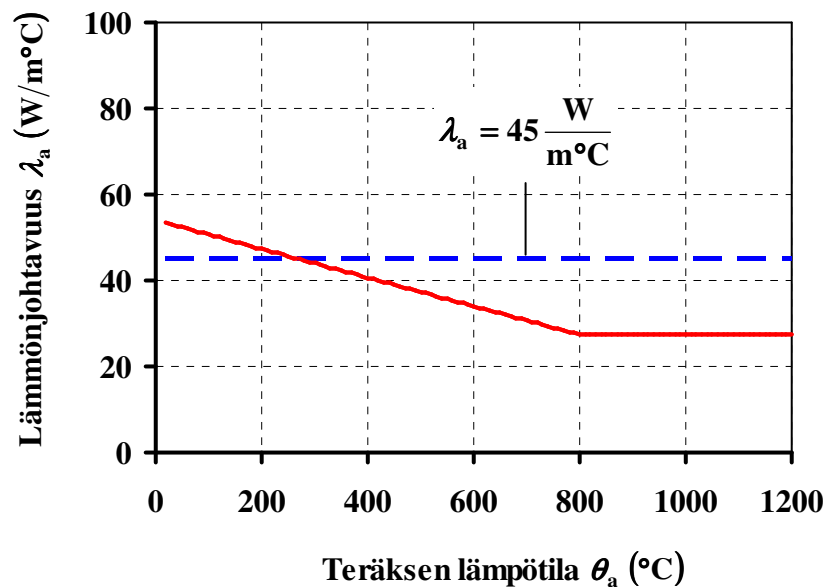
**Kuva 21. Teräksen ominaislämpökapasiteetti teräksen lämpötilan funktiona.**

Teräksen ominaislämpökapasiteetissa on huomattava piikki 735 °C:n lämpötilassa, mikä liittyy aiemmin mainitun teräksen rakennemuutoksen vaatimaan energiaan (60).

Teräksen lämmönjohtavuus on korkea ja se on riippumaton tarkasteltavasta suunnasta ja paikasta. Tulipalossa suojaamattoman teräsoosan voidaan yleensä olettaa saavuttavan nopeasti stationääristä lämmönsiirtymistä vastaavan lämpötilajakauman. Teräksen lämmönjohtavuus esitetään kuvassa 22 ja se lasketaan seuraavasti, kun lämmönjohtavuuden yksikkö on  $\text{W/m}^\circ\text{C}$  (12):

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2} \theta_a \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C}$$

$$\lambda_a = 27,3 \quad 800^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$$
(63)



Kuva 22. Teräksen lämmönjohtavuus teräksen lämpötilan funktiona.

## 10 SUOJAAMATON TERÄS TULIPALOSSA

### 10.1 Suojaamattoman teräsosan lämpiäminen

Tulipalossa sauvamaisen teräsosan lämpötila otaksutaan yleensä poikkileikkauksessa tasan jakautuneeksi ja lämmön siirtyminen teräsosan sisällä yksidimensionaaliseksi (58). Oletukset perustuvat teräksen korkeaan lämmönjohtavuuteen, jolloin sauvamaisen teräsosan pinnalle tulevan lämpöenergian otaksutaan jakautuvan tasaisesti koko poikkileikkaukseen. Suojaamattoman teräsosan lämpiämisen yhtälön johtamiseen voidaan siten käyttää differentiaalisen ainekappaleen sijaan koko palolle altista poikkileikkausta. Jos lämpöhäviöitä ei huomioida, niin energiatasapainon periaatteella teräsosaan aikayksikössä  $\Delta t$  pituusyksikköä kohden tuleva lämpöenergia on yhtä suuri kuin teräsosaan varastoitunut lämpöenergia (14,43)

$$c_a \rho_a V \frac{\Delta \theta_{a,t}}{\Delta t} = \alpha A_m (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \quad (64)$$

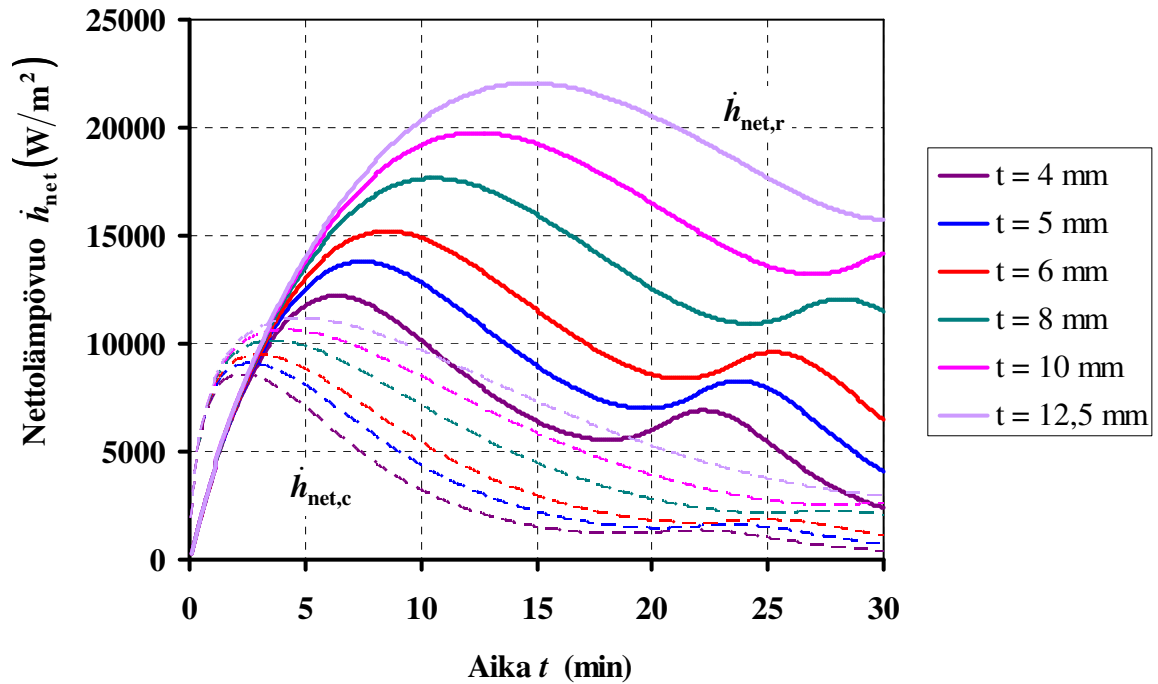
jossa  $A_m$  on suojaamattoman teräsosan palolle altis vaipan pinta-ala ja  $V$  osan tilavuus. Kokonaislämmönsiirtokerroin  $\alpha$  on kuljettumisen ja säteilyn lämmönsiirtokertoimien summa. Kuljettumisen lämmönsiirtokerroin on palotyyppiin perustuva vakioarvo, mutta säteilyn lämmönsiirtokerroin lasketaan palotilan kaasun ja teräksen lämpötilaeron perusteella. Suojaamattoman teräsosan lämpötilan nousu  $\Delta \theta_{a,t}$  aikavälillä  $\Delta t$  lasketaan seuraavasti (14,43,46):

$$\Delta \theta_{a,t} = \frac{\alpha_c + \alpha_r}{c_a \rho_a} \frac{A_m}{V} (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t \quad (65)$$

Eurocodessa teräksen palorasitusta kuvataan konvektio- ja säteilyosaan jaetun nettolämpövuon mitoitusarvolla  $\dot{h}_{\text{net,d}}$ :

$$\dot{h}_{\text{net,d}} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) + \Phi \varepsilon_{\text{res}} \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (66)$$

Kuvassa 23 esitetään konvektion ja säteilyn nettolämpövuoto EN 1363-1 –standardipalossa suojaamattoman teräsputken eri ainevahvuuksilla. Säteilyn lämpövuoto kuvataan paksulla yhtenäisellä viivalla ja konvektion lämpövuoto ohuella katkoviivalla. Palon alussa konvektion lämpövuoto on suurempi, mutta jo muutaman minuutin palon jälkeen säteilyn lämpövuoto muodostuu hallitsevaksi.



**Kuva 23. Suojaamattoman teräsputken konvektion ja säteilyn nettolämpövuoto EN 1363-1 –standardipalossa teräsputken eri ainevahvuuksilla, kun  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,5$ .**

Ilman tarkempaa selvitystä näkyvyyskerroin  $\Phi$  on yksi. Eurocodessa teräksen lämpiämisen yhtälössä on mukana myös varjostusvaikutuksen korjaustekijä  $k_{\text{shadow}}$ , jolloin teräsosan lämpiämisen yhtälö esitetään muodossa (12,46):

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{\text{shadow}} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{\text{net,d}} \Delta t \quad (67)$$

$$k_{\text{shadow}} = \frac{(A_m/V)_{\text{box}}}{A_m/V} \quad (68)$$

Varjostusvaikutuksen korjaustekijällä ei ole merkittävää fysikaalista taustaa, eikä sillä ole vaikutusta suojaamattomien teräsputkien lämpiämiseen, koska teräsputken poikkileikkaustekijä on sama kuin sen laatikkoarvo. Suojaamattoman teräksen lämpiäminen voidaan laskea aika-askeleittain Forward-Euler-aikaintegraalilla (46):

$$\theta_{a,t}^{(n+1)} = \theta_{a,t}^{(n)} + \frac{A_m/V}{c_a^{(n)} \rho_a} \dot{h}_{\text{net,d}}^{(n)} \Delta t \quad (69)$$

Teräksen lämpiäminen voidaan laskea myös Backward-Euler-aikaintegraalilla, mutta se johtaa joka laskentakierroksella iterointiin, jolloin laskentatyömäärä kasvaa huomattavasti (46). Jotta varmistetaan ratkaisun suppeneminen, niin Eurocodessa esitetään laskenta-aikavälin  $\Delta t$  ylärajaksi 5 sekuntia. Suojaamattoman teräsosan palolle alttiin vaipan pinta-alan ja tilavuuden suhdetta  $A_m/V$  kutsutaan teräsosan poikkileikkaustekijäksi. Poikkileikkaustekijä vaikuttaa merkittävästi teräsosan lämpiämiseen (12). Poikkileikkaukseltaan vakion suojaamattoman teräsosan poikkileikkaustekijä lasketaan periaatteella:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{palolle alttis piiri}}{\text{poikkileikkausala}} \quad (70)$$

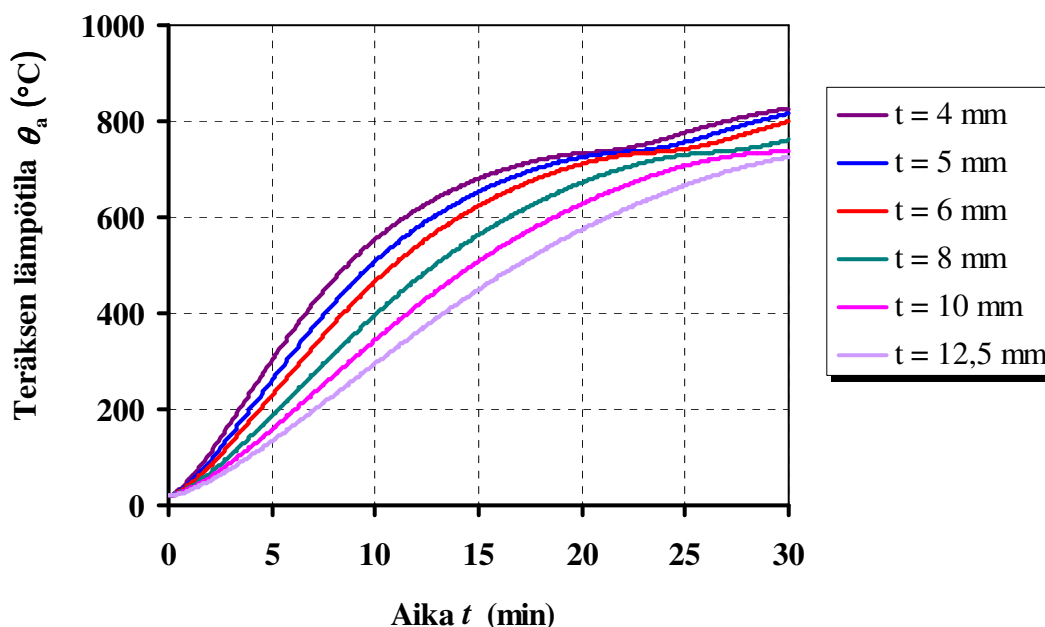
Kun periaatetta sovelletaan kaikilta sivuiltaan palolle alttiille suojaamattomalle neliön tai suorakaiteen muotoiselle teräsputkelle, niin poikkileikkaustekijä on (50)

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h-4r_0+\pi r_0)}{2t(b+h-2t)-(4-\pi)(r_0^2-r_1^2)} \quad (71)$$

jossa  $b$  on poikkileikkauksen leveys ja  $h$  on korkeus sekä  $r_0$  on teräsputken nurkan ulkopyöristysäde ja  $r_1$  on sisäpyöristysäde. Kun teräsputken ainevahvuus on oleellisesti pienempi kuin poikkileikkauksen leveys, niin poikkileikkaustekijä on:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{ulkopiiri}}{\text{ulkopiiri} \cdot \text{ainevahvuus}} \approx \frac{1}{t} \quad (72)$$

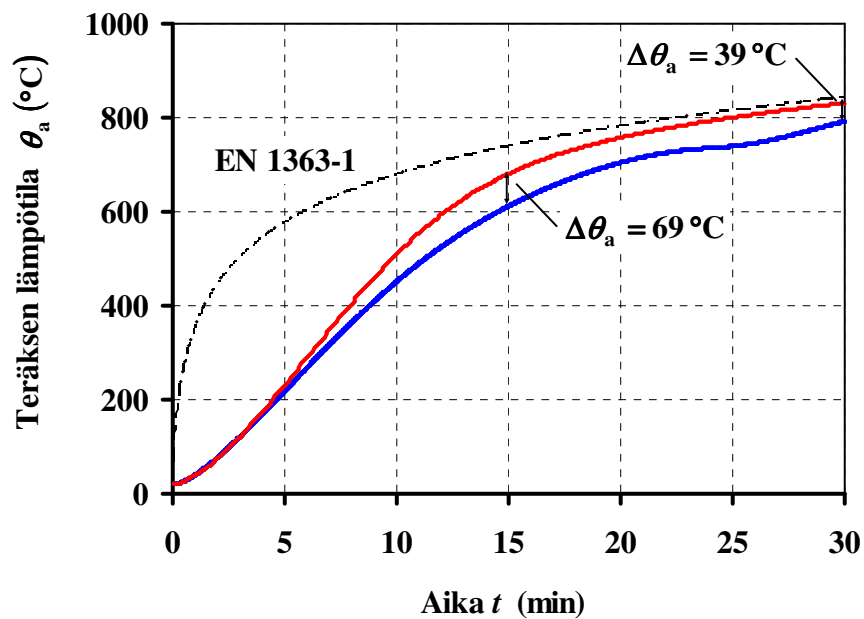
Teräsputkien ainevahvuudet ovat 2,5...12,5 mm, jolloin poikkileikkaustekijöiden likiarvot ovat välillä 400...80 m<sup>-1</sup>. Kuvassa 24 esitetään suojaamattoman teräsputken lämpiäminen EN 1363-1 standardipalossa eri ainevahvuuksilla.



**Kuva 24. Suojaamattoman teräsputken lämpiäminen EN 1363-1 – standardipalossa teräsputken eri ainevahvuuksilla, kun  $\epsilon_{res} = 0,5$ .**

Laskettaessa suojaamattoman teräsosan lämpiämistä joudutaan valitsemaan lopputulokseen vaikuttavia lähtöarvoja sekä laskennan tarkkuutta. Kuvassa 25 esitetään suojaamattoman teräsputken lämpiämisen ääriarvot EN 1363-1 – standardipalossa laskennan eri alkuarvoilla ja tarkkuudella. Laskennassa käytetyt arvot esitetään taulukossa 10. Tarkasteltava teräsputki on P90×90×6,3. Teräsputken lämpötilat poikkesivat toisistaan 15 minuutin kohdalla 69 °C:tta ja 30 minuutin kohdalla 39 °C:tta. 69 °C:n lämpötilaero tuottaa vetorasituksessa lämpötila-alueesta riippuen jopa 21 %-yksikön eron teräksen kestävyteen. Kun käytetään ominaislämpökapasiteetille likiarvoa 600 J/kg°C, niin teräksen rakennemuutokseen tarvittavaa lämpöenergiaa ei huomioida, jolloin myös teräksen lämpiämistä hidastava vaikutus jää huomioimatta. Kuvassa 25 tämä näkyy noin 25 minuutin kohdalla, jolloin teräksen lämpiämisen minimikäyrässä on pieni notkelma.





Kuva 25. Suojaamattoman P90×90×6,3 teräsputken lämpiäminen EN 1363-1 -standardipalossa laskennan eri alkuarvoilla ja tarkkuudella.

Taulukko 10

SUOJAAMATTOMAN P90×90×6,3 TERÄSPUTKEN LÄMPIÄMISEN LASKENNASSA  
KÄYTETTYJÄ LÄHTÖARVOJA

Laskentasuure	Minimikäyrä	Maksimikäyrä	Erotus
Laskenta-aikaväli $\Delta t$	1 s	5 s	4 s
Resultoiva emissiivisyys $\varepsilon_{\text{res}}$	0,5	0,7	0,2
Ominaislämpökapasiteetti $c_a$	kaava 62	600 J/kg°C	vaihtelee
Poikkileikkaustekijä $A_m/V$	$1/t$	kaava 71	$10 \text{ m}^{-1}$
Näkyvyyskerroin $\Phi$	1	1	0
Teräksen lämpötila $\theta_a$ , 15 min	612 °C	681 °C	69 °C
Teräksen lämpötila $\theta_a$ , 30 min	793 °C	832 °C	39 °C

## 10.2 Teräsputkiristikon lämpötilajakauma

Lämpötilagradientti teräsosan poikkileikkauksen yli aiheuttaa epätasaisen lämpölaajenemisen, mikä osittainkin estyneenä aiheuttaa jännitystilan. Tasainen lämpötilajakauma aiheuttaa tasaisen normaalijännitys jakauman, josta ei aiheudu muodonmuutoksia, mutta epätasainen lämpötilajakauma aiheuttaa lisäksi myös taivutusjännitys jakauman, josta aiheutuu muodonmuutoksia. Sauvamaisten teräsosien poikkileikkauksen lämpötilajakauma otaksutaan yleensä tasan jakautuneeksi. Otaksu ei välttämättä päde teräsosan nopeassa lämpiämisessä (75). Teräsosan lämpötilagradienttia arvioidaan lämmönjohtumisen ja kuljettumisen suhdetta teräsosan pinnalla kuvaavalla Biotin luvulla. Kun karakteristinen mitta on teräsputken poikkileikkaustekijän käänteisluku eli  $t$ , niin Biotin luku  $Bi$  on (2,5):

$$Bi = \frac{\alpha_c t}{\lambda_a} \quad (73)$$

Teräsosan poikittaista lämpötilagradienttia ei tarvitse huomioida, jos Biotin luku on alle 0,1. Kuljettumisen lämmönsiirtokerroin on tavallisissa paloissa  $25 \text{ W/m}^2\text{°C}$  ja teräksen lämmönjohtavuus keskimäärin  $45 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Kun teräsputkien ainevahvuus on välillä 2,5...12,5 mm, niin Biotin luku on selvästi alle 0,1. Tavallisissa tulipaloissa teräsputkelle voidaan siten otaksua poikkileikkaukseen tasainen lämpötilajakauma. Paikallisessa palossa teräsosan palorasitus on voimakkaasti riippuvainen palolähteen sijainnista osaan nähden, jolloin sauvamaiseen teräsosaan kohdistuu epätasainen palorasitus, joka tuottaa pituussuuntaisen lämpötilagradientin. Teräsputkiristikossa eri terässauvat myös lämpiävät samassa palorasituksessa eri nopeudella, koska sauvojen poikkileikkaustekijät ovat erisuuret. Teräsputkiristikoon muodostuu siten aina pitkittäinen ja poikittainen lämpötilagradientti. Pitkittäinen lämpötilagradientti muodostuu ylä- ja alapaarteeseen ja poikittainen ylä- ja alapaarten välille (58). Vesander (75) tutki diplomityössään teräsristikon kantokykyä palossa. Työssä todettiin, että ristikon pitkittäisellä ja poikittaisella lämpötilajakaumalla on suuri merkitys ristikon palotilanteen kestävyyyteen. Ristikon epätasaiset lämpötilajakaumat lisäsivät ristikon sauvojen jännityksiä ja taipumaa tasaiseen lämpötilajakaumaan verrattuna, kun poikittaisessa lämpötilajakaumassa alapaarre oli kuumempi.

### 10.3 Analyyttinen palomalli

Keski-Rahkonen (27) on tutkinut suojaamattoman teräsosan lämpiämistä ja hän esitti analyttisen laskentamallin teräsosan lämpiämiseen suuren tilan palossa. Malli on yksinkertaistettu sen havainnollisuuden säilymiseksi ja se soveltuu huonepaloon sekä paikalliseen paloon. Malli on johdettu seuraavasta energiatasapainoyhtälöstä:

$$\rho_a c_a V d\theta_a(t) = \alpha A_m [\theta_g(t) - \theta_a(t)] dt \quad (74)$$

Kirjoitetaan differentiaaliyhtälö homogeenimuotoon ja merkitään niitä teräksen lämpiämisen määrääviä suureita, joille voidaan otaksua vakioarvo, termillä  $\tau$ :

$$\frac{d\theta_a(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} \theta_a(t) - \frac{1}{\tau} \theta_g(t) = 0 \quad (75)$$

$$\tau = \frac{\rho_a c_a V}{\alpha A_m} \quad (76)$$

Sijoitetaan termiin  $\tau$  teräksen tiheys  $7850 \text{ kg/m}^3$  sekä ominaislämpökapasiteetin ja kokonaislämmönsiirtokertoimen keskimääräiset arvot  $540 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  ja  $100 \text{ W/m}^2\text{C}$ , jolloin osa lyhennystermistä voidaan ilmaista vakioarvolla:

$$\frac{\rho_a c_a}{\alpha} \approx 42390 \text{ s/m} \quad (77)$$

Differentiaaliyhtälön alkuehdot ovat  $\theta_a(0) = \theta_g(0) = \theta_0$ , jolloin yhtälölle saadaan muuttujanvaihdolla suljetussa muodossa oleva ratkaisu, josta teräsosan lämpiäminen voidaan laskea palotilan kaasun lämpötilan perusteella (1):

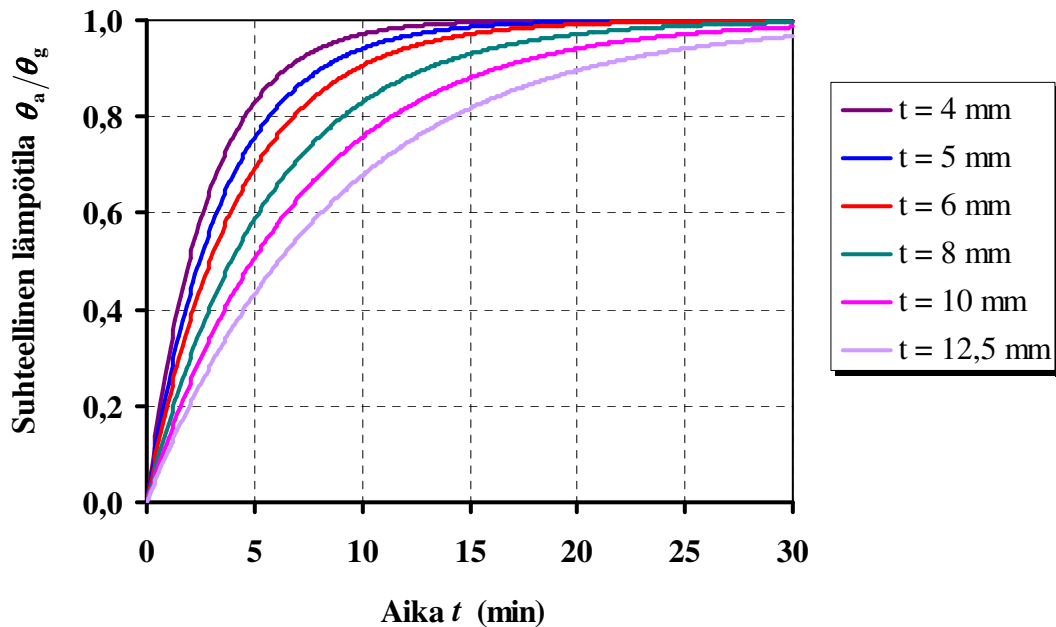
$$\theta_a = \theta_0 \exp(-t/\tau) + \frac{1}{\tau} \exp(-t/\tau) \int_0^t \exp(u/\tau) \theta_g(u) du \quad (78)$$

$$\theta_a = \theta_0 \exp(-t/\tau) + \theta_g [1 - \exp(-t/\tau)] \quad (79)$$

Kun huomioidaan alkuehdot ja asetetaan alkulämpötilaksi  $\theta_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ , niin yhtälön 79 ensimmäinen termi menee nolllaksi, jolloin se yksinkertaistuu muotoon:

$$\frac{\theta_a}{\theta_g} = 1 - \exp(-t/\tau) \quad (80)$$

Yhtälöstä 80 voidaan määrittää suojaamattoman teräsosan lämpiäminen suhteessa palotilan lämpötilaan eli kuinka nopeasti teräksen lämpötila saavuttaa palontilan lämpötilaa. Kuvassa 26 esitetään suojaamattoman teräsputken lämpiäminen suhteessa palotilan kaasun lämpötilaan teräsputken eri ainevahvuuksilla.

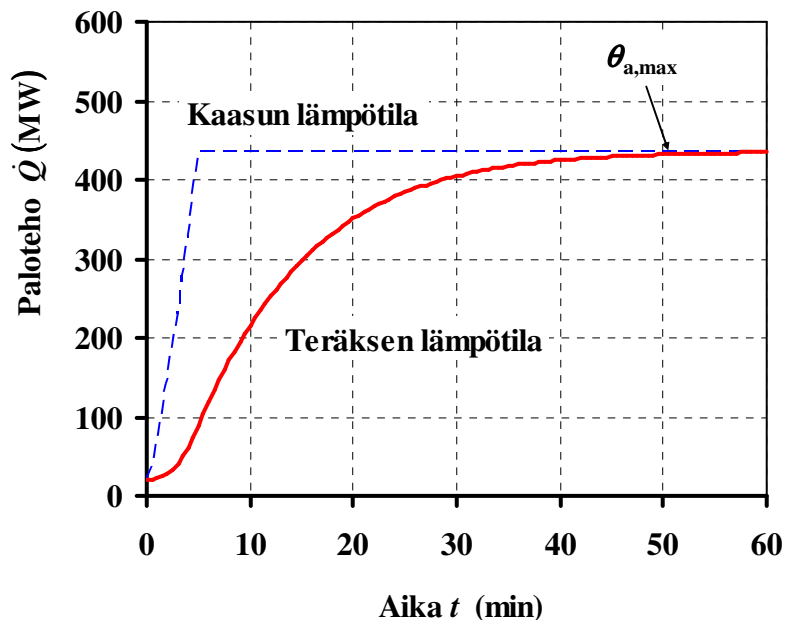


**Kuva 26. Suojaamattoman teräsputken lämpötila suhteessa palotilan kaasun lämpötilaan teräsputken eri ainevahvuuksilla.**

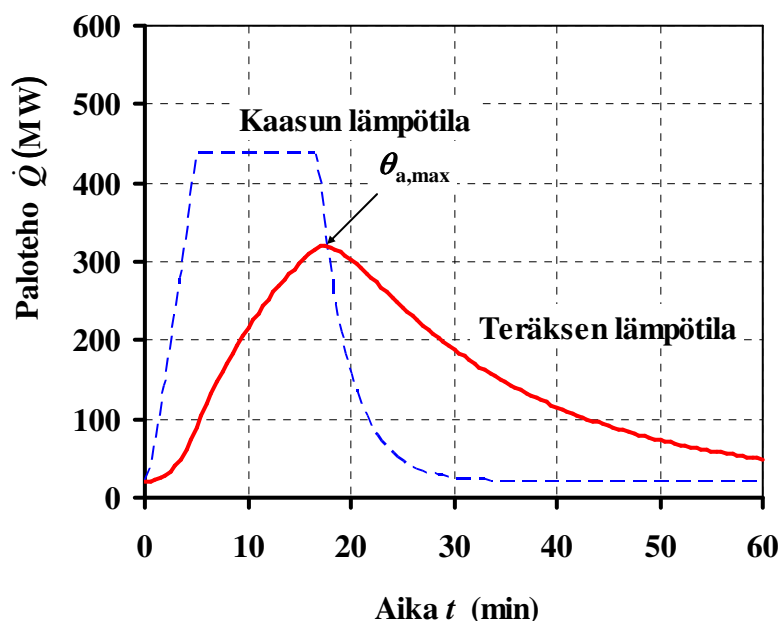
Myös lähteessä (54) on esitetty analyttinen kaava suojaamattoman teräsosan lämpiämiseen EN 1363-1 –standardipalossa. Laskentamallin soveltuvuusehdot kuitenkin rajoittavat sen käytön teräsputkilla paloluokkaan R15, jossa malli kuitenkin tuottaa hyvin lähellä tarkkaa ratkaisua olevia lämpötiloja.

#### 10.4 Teräsosan lämpiäminen paikallisessa palossa

Teräsosan lämpiämiseksi paikallisessa palossa on lähteen (40) mukaan kaksi mitoittavaa tapausta: teräsosan lämpiäminen pitkäkestoisessa palossa ja teräsosan lämpiäminen lyhytkestoisessa palossa. Pitkäkestoisessa palossa merkittävin palomitoitukseen vaikuttava tekijä on palotilan kaasun maksilämpötila. Lyhytkestoisessa palossa palomitoitukseen vaikuttavat palotilan kaasun lämpötilan lisäksi myös lämmönsiirtoprosessi ja teräksen materiaaliominaisuudet. Kuvissa 27 ja 28 esitetään periaatekuvat teräsosan lämpiämisestä pitkä- ja lyhytkestoisessa palossa. Ensisijaisesti teräsosat mitoitetaan pitkäkestoiselle palolle, mutta joissakin tapauksissa palotilanne vastaa lyhytkestoista paloa. Palon kestoa mitoittavan lämpötilan suhteen voidaan arvioida palotehokäyrän maksimipalotehon ajalla, jota kutsutaan kriittiseksi ajaksi  $t_{cr}$ . Lähteessä (40) suositellaan kriittisen ajan raja-arvoksi viisi minuuttia, jota lyhyemmällä maksimipalotehon ajalla voidaan käyttää lyhytkestoisen palon periaatetta.

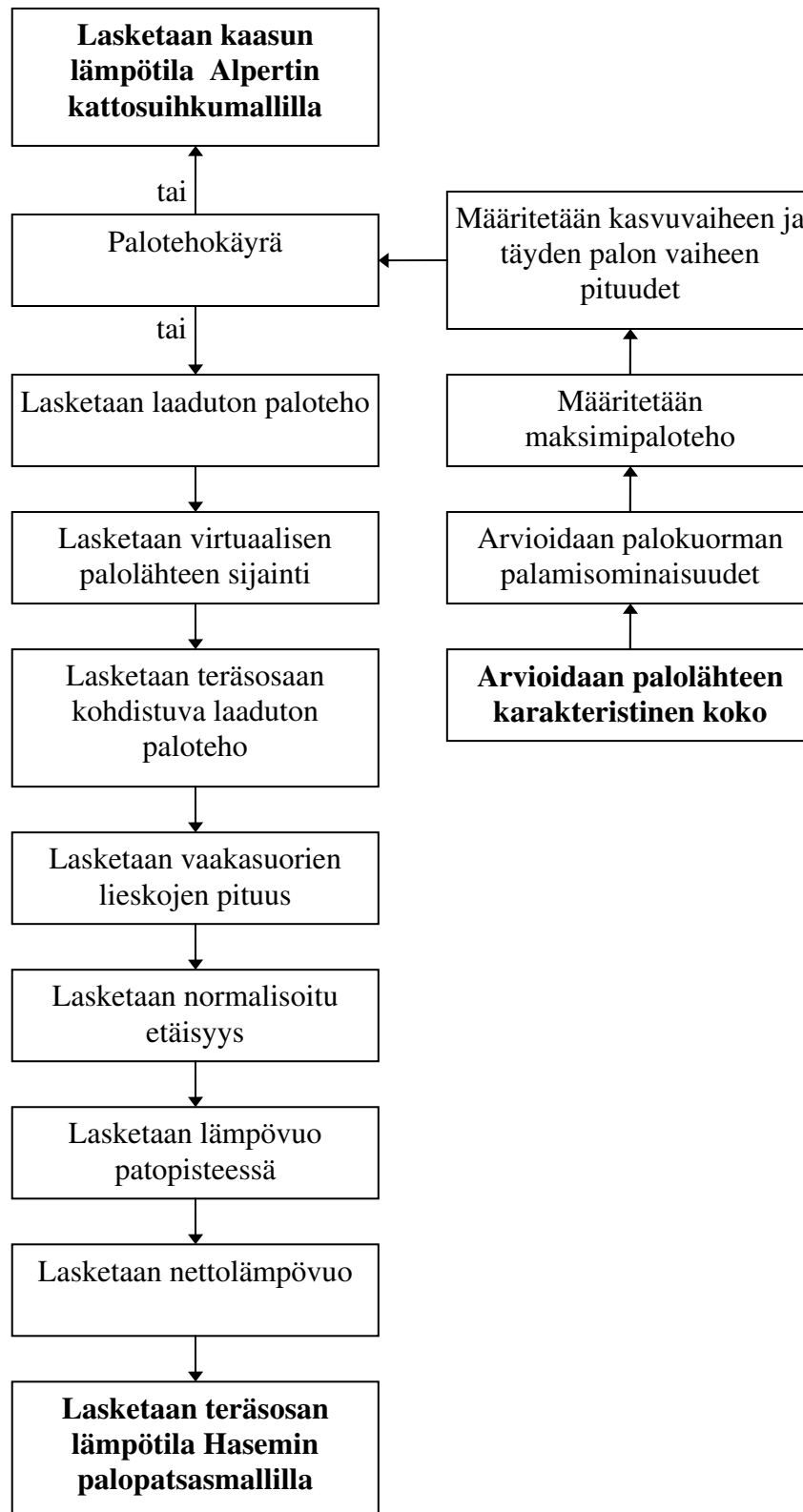


Kuva 27. Teräsosan lämpeneminen pitkäkestoisessa tulipalossa.

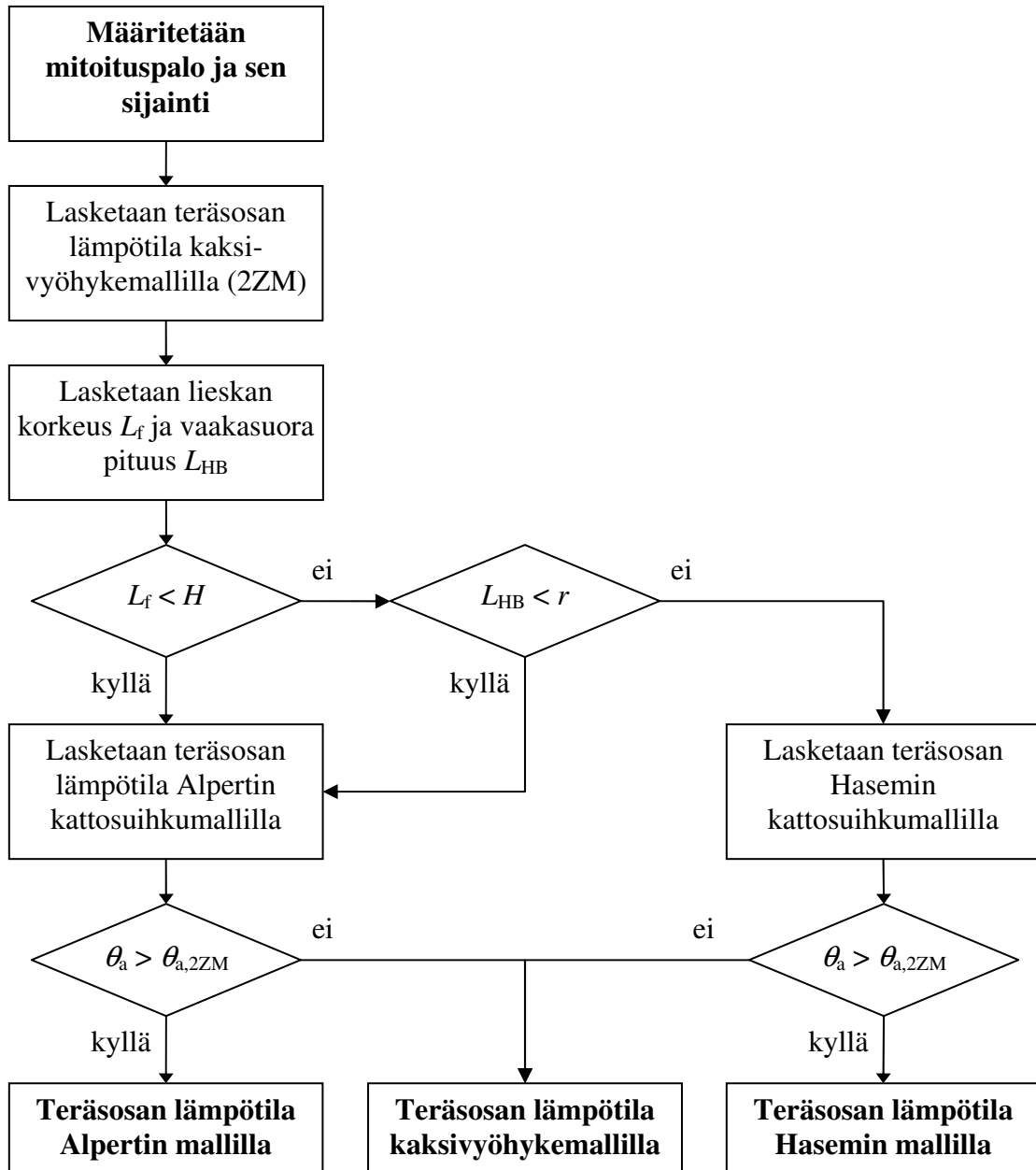


**Kuva 28. Teräsosan lämpeneminen lyhytkestoisessa tulipalossa.**

Paikallisen palon mallia voidaan käyttää teräsosan lämpiämiseen suuren tilan palossa, jolloin palorasitusta kuvataan kattosuihkumalleilla tai kaksivyöhykemallilla. Kattosuihkumalliksi valitaan lieskan ulottuvuuden perusteella Alpertin tai Hasemin kattosuihkumalli. Jos kaksivyöhykemallilla laskettu savupatjan lämpötila ylittää kattosuihkumallilla määritetyn palorasituksen, niin teräsosan lämpiäminen lasketaan savupatjan kaasun lämpötilan mukaan. Kaksivyöhykemallissa huomioidaan myös savupatjan laskeutumisenopeus käyttämällä tilanteen mukaan ylemmän tai alemman vyöhykkeen keskimääräistä lämpötilan kehitystä. Esimerkiksi ristikon alapaarre on palon alussa viileämmässä vyöhykkeessä, jolloin sen palorasitus määritetään alemman vyöhykkeen mukaan. Palon edetessä savupatja laskeutuu alapaarten tasolle, jonka jälkeen sen palorasitus määritetään ylemmän vyöhykkeen mukaan. Palopatsaan lieskan korkeus  $L_f$  arvioidaan Heskestadin kaavalla tai Hasemin mallin yhteydessä esitetyllä kaavalla. Rakennusosan edessä taipuvan lieskan vaakasuuntainen ulottuvuus  $L_{HB}$  arvioidaan Hasemin mallin yhteydessä esitetyllä kaavalla. Kuvassa 29 esitetään lähteen (31) mukainen teräsosan lämpiämisen algoritmi kattosuihkumallille ja kuvassa 30 esitetään suojaamattoman teräsosan lämpiämisen laskenta-algoritmi paikallisessa palossa.



Kuva 29. Teräsosan lämpiämisen laskenta-algoritmi kattosuihkumallilla (31).



**Kuva 30. Teräsosan lämpiämisen laskenta-algoritmi paikallisessa palossa.**

Kun lieskat sekä pysty- että vaakasuunnassa ulottuvat teräsosaan, niin lieskojen lämpövuon  $\dot{h}$  lasketaan Hasemin kattosuihkumallilla, jolloin nettolämpövuon mitoitusarvo  $\dot{h}_{\text{net,d}}$  on (9)

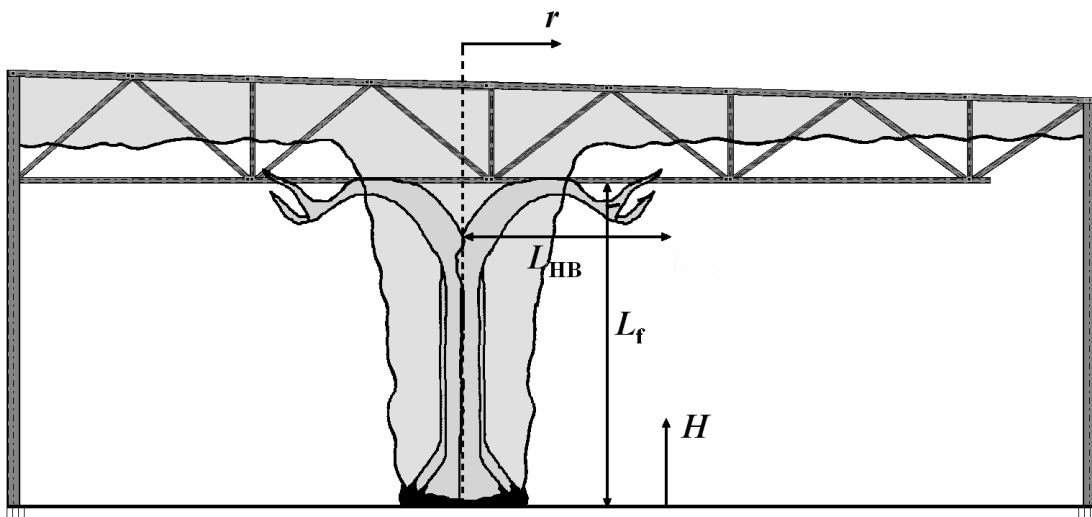
$$\dot{h}_{\text{net,d}} = \dot{h} + \alpha_c (\theta_\infty - \theta_m) + \Phi \epsilon_{\text{res}} \sigma \left[ (\theta_\infty + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad (81)$$



jossa  $\theta_\infty$  on ympäristön lämpötila 20 °C. Kun lieskat eivät ulotu teräsosaan, niin kattosuihkun palokaasujen lämpiäminen lasketaan Alpertin kattosuihkumallilla, jolloin nettolämpövuon mitoitusarvo  $\dot{h}_{\text{net,d}}$  on (9)

$$\dot{h}_{\text{net,d}} = \alpha_c (\theta_g - \theta_m) + \Phi \varepsilon_{\text{res}} \sigma [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (82)$$

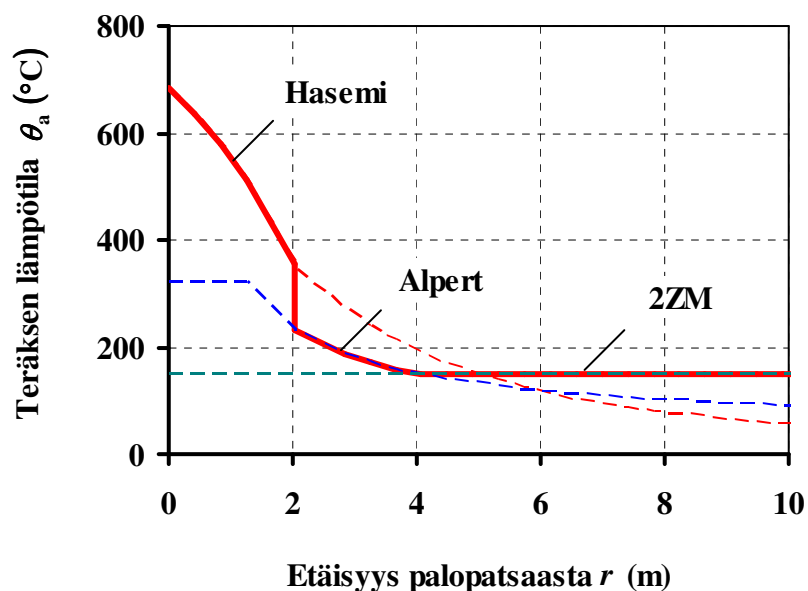
jossa  $\theta_g$  on palotilan kaasun lämpötila. Kun savupatjan palorasitus ylittää kattosuihkun palorasituksen, niin kaavassa 82 palokaasujen lämpötilan sijaan käytetään kaksivyöhykemallin vyöhykkeiden lämpötiloja huomioiden teräsosan sijainti suhteessa vyöhykerajan laskeutumiseen. Paikallisen palon kaaviokuva esitetään kuvassa 31.



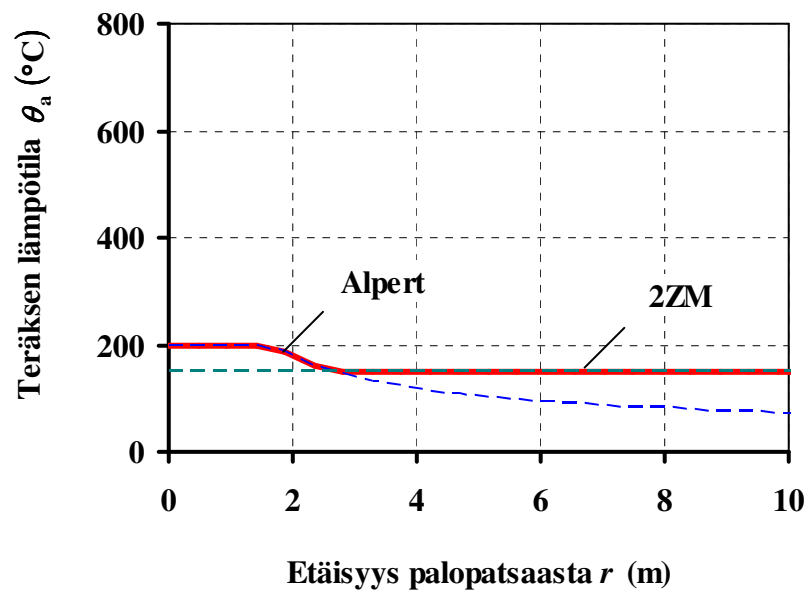
**Kuva 31. Paikallisen palon kaaviokuva.**

Eurocoden paikallisen palon mallin lämpövuolausekkeet on kehitetty lieskahtavaan huonepalo, jossa kaikki teräkseen säteilevät pinnat ovat samassa lämpötilassa. Kaksivyöhykemallissa teräkseen säteileviä pintoja on kahdessa eri lämpötilassa, jolloin teräkseen kohdistuva lämpövuoto yliarvioidaan. VTT:n kaksivyöhykemallia simuloivassa polttokokeessa havaittiin, että kun palolähde sammutettiin, niin savupatjan sisällä olevan teräsosan lämpiäminen loppui, vaikka savupatjan lämpötila oli vielä tässä vaiheessa korkeampi kuin teräsosan (78).

Jos palomitoituksessa paarteet jaetaan elementteihin, joiden lämpötila otaksutaan tasan jakautuneeksi, niin on luonnollista ottaa elementin lämpötilaksi sen keskimääräinen lämpötila. Elementin paikallinen maksimilämpötila saadaan, kun palopatsas sijoitetaan elementin referenssipisteeseen eli sauvan keskipisteeseen, jossa  $r = 0$ . Teräksen lämmönjohtumisen takia elementin tasan jakautuneeksi lämpötilaksi pitäisi valita hieman paikallista maksimilämpötilaa matalampi lämpötila, jolloin sauvan lämpötila olisi todennukaisempi. Tällöin palopatsaan keskiakseli ei saisi kulkea elementin referenssipisteen kautta. Kuvissa 32 ja 33 esitetään esimerkkinä ristikon ala- ja yläpaarteiden lämpötilajakauma paikallisessa palossa, kun palopatsas sijaitsee paarteiden puolivälissä. Paarteiden lämpötilajakaumat esitetään yhtenäisellä paksulla viivalla ja palomallien verkohäyrät ohuilla katkoviivoilla. Lieskat ulottuvat alapaarteeseen, mutta eivät enää yläpaarteeseen. Kuvasta 32 poiketen todellisessa palossa paarteiden pituussuuntainen lämpötilajakauma tasaantuisi teräksen lämmönjohtumisen johdosta, jolloin myös paarteiden lämpötilan maksimi- ja minimiarvot lähenisivät toisiaan eikä Hasemin ja Alpertin mallien välille muodostuisi epäjatkuvuuskohdalla.



**Kuva 32. Esimerkki teräsputkiristikon alapaarteiden puolikkaan lämpiämisestä paikallisessa palossa, kun palopatsas sijaitsee paarteiden keskipisteen kohdalla.**



**Kuva 33. Esimerkki teräspuistikristikon yläpaarteen puolikkaan lämpiämisestä paikallisessa palossa, kun palopatsas sijaitsee paarteen keskipisteen kohdalla.**

## 11 KYLMÄMUOVATUT TERÄSPUTKET

### 11.1 Rautaruukin EN 10219 -Putkipalkit

Rautaruukki Oyj valmistaa kuumavalssatusta teräsnauhasta kylmämuovaamalla ja hitsaamalla poikkileikkaukseltaan neliön ja suorakaiteen muotoisia sekä pyöreitä teräsputkiä, joiden tuotenimi on Putkipalkki. Putkipalkkien tärkeän käyttökohderyhmän muodostavat erilaiset ristikkorakenteet, koska teräsputkien hyvä nurjahduskestävyys mahdollistaa pitkät jännevälit ja harvan diagonaalijaon (50). Teräsputken poikkileikkauksen muoto antaa putkelle hyvät kestävyys- ja jäykkyysominaisuudet poikkileikkauksen teräsmäärään nähden, jolloin teräsputkiristikko on jänneväliinsä nähden kevyt kannatinrakenne (76). Koska teräsputkella on vähemmän massaa kuin vastaavalla avoimella profiililla, niin teräsputki lämpenee nopeasti. Toisaalta taas teräsputken vaipan pinta-ala on noin 2/3 teräsmäärältään vastaavan avoimen profiilin vaipan pinta-alasta, joten teräsputkella on vähän palolle altista pintaa. Kylmämuovattujen teräsputkien ominaisuudet määritetään toimitusehtostandardissa EN 10219-1 ja mittastandardissa EN 10219-2 (57).

### 11.2 Muokkauslujittuminen

Rautaruukki Oyj:n Putkipalkkien teräslaji on S355J2H, jossa perusaineen myötöraja on ainevahvuuksilla vähintään  $355 \text{ N/mm}^2$  (48,50). Standardin EN 10219-1 mukaan kylmämuovaus on valmistusprosessi, jossa teräsputki muovataan huoneenlämpötilassa (56). Kylmämuovauksessa teräsputken poikkileikkauksen eri osissa tapahtuu eriasteista muokkauslujittumista, jolloin teräksen ominaisuudet muuttuvat kuumavalssattuun perusaineeseen nähden. Muokkauslujittumisen suuruus riippuu kylmämuovauksen määrää kuvaavasta muovausasteesta, joka on teräsputken poikkileikkauksen kapeamman sivun leveyden ja ainevahvuuden suhde (59):

$$\text{muovausaste} = \frac{b}{t} \quad (83)$$

Teräsputki on voimakkaasti kylmämuovattu, kun muovausaste on alle 12. Kylmämuovauksessa tapahtuvat ominaisuusmuutokset ovat erisuuruisia teräsputken poikkileikkauksen eri osissa. Voimakkaimmin kylmämuovaus vaikuttaa teräsputken nurkan sisäosaan ja heikoimmin putken tasaiseen seinämään. Kylmämuovattun teräsputken lujuus on nurkan sisäosassa korkeampi kuin tasaisessa seinämässä, mutta toisaalta samalla nurkan muodonmuutoskyky ja sitkeys heikkenevät tasaiseen seinämään nähden. Keskimäärin kylmämuovattun teräsputken myötöraja on kuitenkin korkeampi kuin kuumavalssatulla perusaineella (59). Jotta muokkauslujittumista voidaan hyödyntää kylmämuovattujen teräsputkien mitoituksessa, niin määritetään kylmämuovattun teräsosan keskimääräinen myötöraja. Kansainvälisen putkentehtäjäjärjestön (CIDECT) ohjeissa kylmämuovattun teräsputken keskimääräinen muokkauslujittunut myötöraja määritetään kokeiden perusteella tai laskennallisesti. Korkeissa lämpötiloissa putkipalkeilla käytetään kuumavalssatun teräksen myötörajan jännitys-venymäyhteyden pienennyskertoimia, koska putken perusaine on kuumavalssattu (13,51,69).

Kun kylmämuovattulle teräsputkelle tehdään muovauksen jälkeen jännityksenpoistohehkus ylä 600 °C:ssa, niin myötörajan muokkauslujittunut osuus häviää noin puolessa tunnissa, jonka jälkeen teräs käyttäytyy kuumavalssatun perusaineen tavoin. Muokkauslujittumisen hyödyntämistä palomitoituksessa on tutkittu Rautaruukin toimeksiannosta melko paljon. Kokeiden perusteella kylmämuovattu teräsputki käyttäytyy myös palotilanteessa edellä kuvatulla tavalla, jolloin muokkauslujittunut osuus säilyy tavallisessa palossa noin puoli tuntia, jonka jälkeen myötöraja putoaa perusaineen tasolle. Kokeissa havaittiin myös, että palon jälkeen kylmämuovattu teräsputki käyttäytyi edelleen perusaineen tavoin, jolloin sillä oli kuumavalssatun perusaineen mukainen myötöraja. Palomitoituksessa muokkauslujittunutta myötörajaa ei kuitenkaan hyödynnetä, vaan se toimii ikään kuin kylmämuovattun teräsputken kestävyyspiiloreservinä (13,14,37,78).

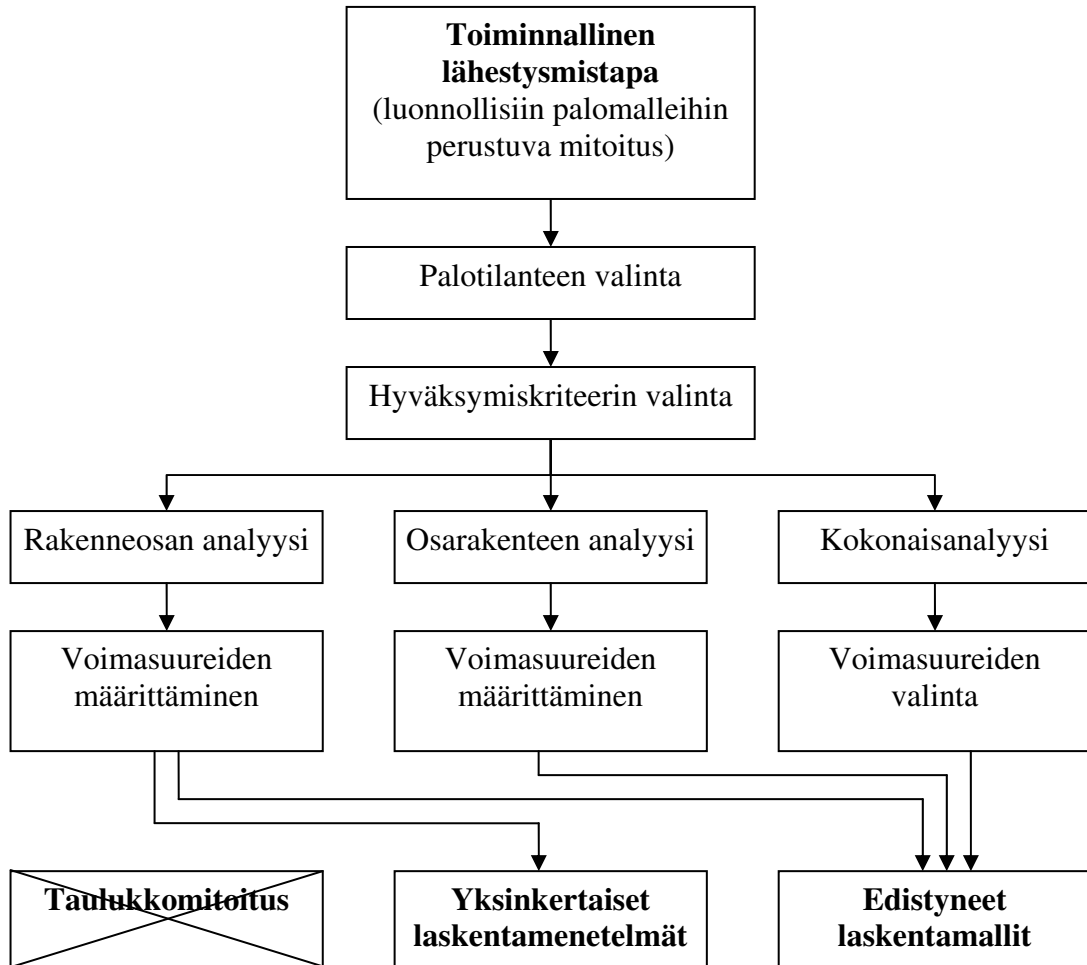
## 12 TERÄSPUTKIRISTIKON PALOMITOITUS

### 12.1 Palomitoitusrutiini

Teräspuistikiristikolla on normaalilämpötila-alueella hyvä kantokyky suhteessa ristikon teräsmäärään. Ristikon keveyden seurauksena teräspuistikiristikko kuitenkin lämpenee palossa, jolloin teräsosien lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet heikkenevät. Ristikon hoikat uumasauvat yleensä lämpiävät nopeasti, kun taas massiivisempien paarteiden lämpiämiseen kuluu enemmän aikaa. Normaalilämpötilamitoituksessa ristikon kantokyky määräytyy yleensä puristetuinman uumasauvan nurjahduskestävyydestä. Teräspuistikiristikon palotilanteen kantokykyyn vaikuttavat tekijät jaetaan mekaanisiin, termisiin ja rakenteellisiin tekijöihin. Mekaaniset tekijät ovat kimmokerroin, myötöraja, lämpöpitäminen, ominaislämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus. Termiset tekijät ovat palotilan kaasun lämpötilan kehittyminen ja teräksen lämpiämiseen vaikuttavat termiset suureet sekä teräsosan lämpötilajakauma (75). Rakenteelliset tekijät liittyvät ristikon tuentaan, joka voi olla staattiselta malliltaan vapaasti tuettu tai jäykkä. Palotilanteessa vapaa tuenta sallii suuremmat muodonmuutokset ennen voimien uudelleenjakautumista, kun taas jäykässä tuennassa pienetkin muodonmuutokset aiheuttavat merkittävää voimien uudelleenjakautumista. Palotilanteessa staattisesti määräämättömän rakenteen varmuus murtotilaan nähden on parempi kuin staattisesti määrätyn rakenteen. Mitoitettaessa teräsrakenteita palotilanteissa pitää rakennetta aina tarkastella kokonaisuutena ja erityisen tarkkaa suunnittelua vaativat rakenteet, joissa on jatkuvan sortumisen vaara (58). Eurocodessa palotilanne on onnettomuusrajatila, jossa teräsosan palotekninen mitoitus etenee seuraavasti (9):

- i Valitaan tarkoituksenmukainen mitoittava palotilanne.
- ii Kuvataan valittu palotilanne mitoituspalolla.
- iii Lasketaan teräsosien lämpiäminen.
- iv Tehdään teräsosien palotekninen mitoitus valitulla hyväksymiskriteerillä.

Kolme ensimmäistä vaihetta käsiteltiin jo aiemmissa luvuissa. Kuvassa 34 esitetään Eurocoden mukainen oletettuun palonkehitykseen perustuva teräsrakenteiden palomitoitusrutiini.



**Kuva 34. Eurocoden 1993 osan 1-2 palomitoitusalgoritmi.**

Nimellisiin aika-lämpötilakäyriin perustuvassa palomitoituksessa laskettiin teräsosan lämpiäminen vaaditulle palonkestoajalle. Oletetussa palonkehityksessä teräsosan lämpiäminen lasketaan palon hiipumisen loppuun saakka. Eurocodessa teräsosien kestävyys palotilanteessa voidaan osoittaa kolmella eri hyväksymiskriteerillä (9):

$$\text{Aikakriteeri:} \quad t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (84)$$

$$\text{Lujuuskriteeri:} \quad R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (85)$$

$$\text{Lämpötilakriteeri:} \quad \theta_{a,max} \geq \theta_{a,cr} \quad (86)$$

Aikakriteerissä teräsosan palotilanteen kestävyys todetaan laskelmalla määritetyn teräsosan palonkestoajan perusteella. Jos osan palonkesto aika ylittää vaaditun palonkestoajan, niin rakennusosa voidaan hyväksyä. Vaadittu palonkesto aika perustuu esimerkiksi ihmisten poistumiseen ja palokunnan palon hallintaan saamiseen kuluvaan aikaan. Lujuskriteerissä teräsosan palotilanteen kestävyys todetaan laskemalla teräsosan kestävyys palotilanteessa. Jos laskettu palotilanteen kestävyys ylittää palotilanteen rasituksen, niin rakennusosa voidaan hyväksyä. Lämpötilakriteerissä lasketaan teräsosan kriittinen lämpötila, jota verrataan teräksen lämpiämiseen palossa. Jos teräsosan maksimilämpötila ei ylitä teräsosan kriittistä lämpötilaa, niin teräsosa voidaan hyväksyä (46,60). Teräsrakenteiden palotilanteen analysointia varten Eurocodessa on kolme eri laajuista analyysiä: rakenneosan analyysi, osarakenteen analyysi ja kokonaisanalyysi. Eurocode esittää myös kolme eri tasoista mitoitusmenettelyä: taulukkomitoitus, yksinkertaiset laskentamenetelmät ja edistyneet laskentamallit. Tässä tekstissä käsitellään vain yksinkertaisia laskentamenetelmiä.

## 12.2 Teräsosan kriittinen lämpötila

Eurocodessa esitetään yksinkertainen teräsosan palotilanteen kuormitussuhteeseen perustuva palomitoitusmenetelmä. Teräsosan palotilanteen kuormitussuhde  $\eta_{fi}$  on palotilanteen ja normaalilämpötilan kuormitusten mitoitusarvojen suhde (12,54)

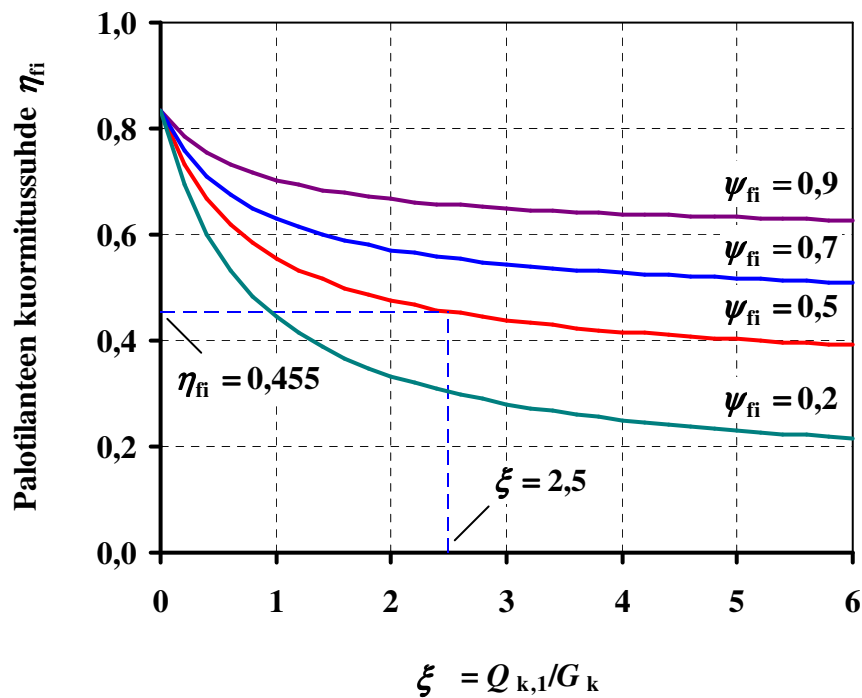
$$\eta_{fi} = \frac{E_{fi,d}}{E_d} = \frac{\gamma_{GA} G_k + \psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (87)$$

jossa  $\gamma_G$  on pysyvän kuorman ja  $\gamma_{Q,1}$  on määrävän muuttuvan kuorman osavarmuuskerroin sekä  $\gamma_{GA}$  on pysyvän kuorman palotilanteen osavarmuuskerroin.  $\psi_{fi}$  on palotilanteen hyötykuormien yhdistelykerroin. Kuvassa 35 esitetään palotilanteen kuormitussuhde hyötykuormien yhdistelykertoimen eri arvoilla. Sijoitetaan osavarmuuskerroimille Suomen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaiset arvot  $\gamma_G = 1,2$  ja  $\gamma_{Q,1} = 1,5$  sekä palotilanteen yhdistelykertoimelle arvo  $\psi_{fi} = 0,5$ . Otetaan lisäksi käyttöön määrävän muuttuvan kuorman ja pysyvän kuorman



suhdetta kuvaava lyhennysmerkintä  $\xi = Q_{k,1}/G_k$ , joka teräsputkiristikolla on tyypillisesti lumikuorman ja kattorakenteen omapainon suhde, jonka arvo on suuri, esimerkiksi 2,5 (54). Tällöin palotilanteen kuormitussuhde on:

$$\eta_{fi} = \frac{\gamma_{GA} + \psi_{fi}\xi}{\gamma_G + \gamma_{Q,1}\xi} = \frac{1,0 + 0,5 \cdot 2,5}{1,2 + 1,5 \cdot 2,5} = 0,455 \quad (88)$$



Kuva 35. Palotilanteen kuormitussuhde yhdistelykertoimien eri arvoilla.

Eurocodessa teräsosan palotilanteen käyttöaste  $\mu_0$  ajan hetkellä  $t = 0$  on (12)

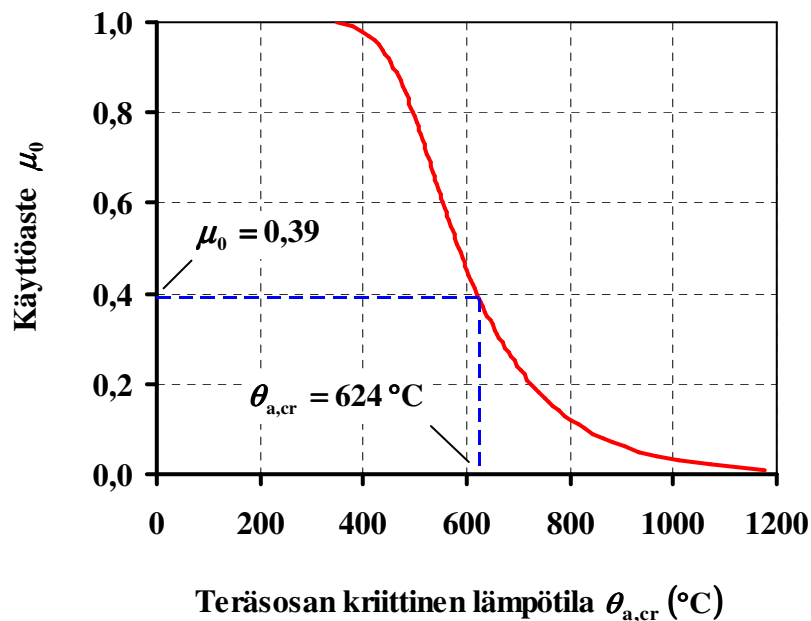
$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} = \frac{\eta_{fi} E_d}{\gamma_{M,0} R_d} = \frac{0,45 E_d}{1,1 R_d} \approx 0,41 \frac{E_d}{R_d} \quad (89)$$

jossa  $\gamma_{M,0}$  on teräksen osavarmuuskerroin 1,1 ja  $R_{fi,d,0}$  on teräsosan palotilanteen kestävyys palon alussa sekä  $R_d$  kestävyys normaalilämpötilassa. Palotilanteen kuormitussuhteen likiarvon perusteella teräsputkiristikon sauvojen palotilanteen

käyttöaste on palon alussa noin 41 % normaalilämpötilan käyttöasteesta. Vaikka sauvojen käyttöaste on palon alussa erittäin pieni, niin se kuitenkin kasvaa nopeasti palon edetessä teräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien heikentyessä. Teräsosan kriittisessä lämpötilassa teräsosan palotilanteen kestävyys on laskenut vallitsevan palotilanteen rasituksen suuruiseksi. Teräsosan kriittinen lämpötila riippuu rakennemallista, palotilanteen kuormituksesta ja aineominaisuuksista sekä mahdollisesta palosuojauksesta (22,47). Eurocode esittää yksinkertaisen kaavan teräsosan kriittisen lämpötilan  $\theta_{a,cr}$  laskemiseen, kun teräsosan poikkileikkauksen lämpötilajakauma on vakio (12):

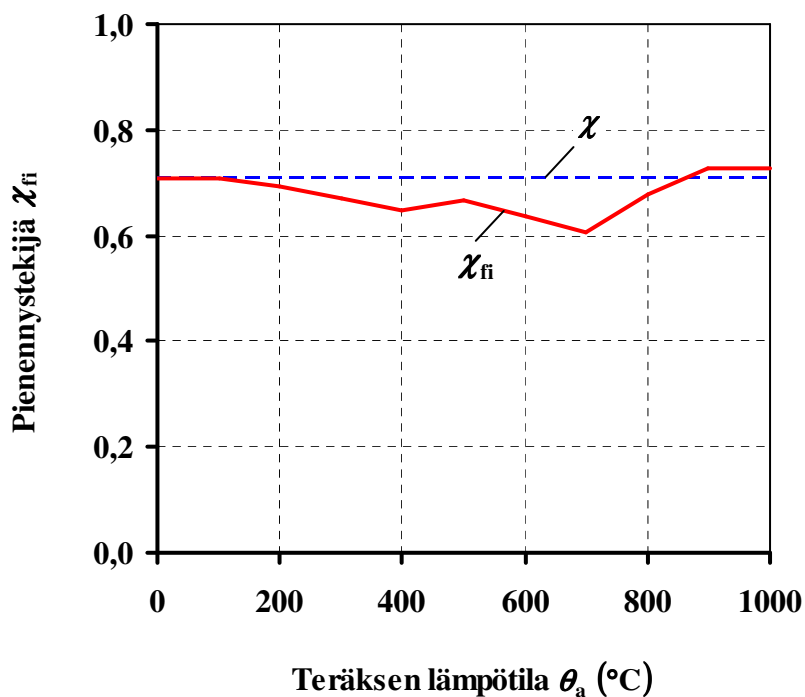
$$\theta_{a,cr} = 39,19 \ln \left( \frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,833}} - 1 \right) + 482 \quad (90)$$

Kuvassa 36 esitetään teräsosan kriittinen lämpötila käyttöasteen mukaan. Ristikon sauvojen käyttöaste pyritään saamaan mahdollisimman korkeaksi, jolloin rasitetuimman teräsosan käyttöaste on tyypillisesti 0,95. Palotilanteen käyttöaste on tästä 41 % eli  $\mu_0 = 0,39$  ja vastaava kriittinen lämpötila on  $\theta_{a,cr} = 624$  °C.



**Kuva 36. Teräsosan kriittinen lämpötila eri poikkileikkausluokilla.**

Kaavan 90 luonnollisella logaritmilla kuvataan teräksen myötörajan heikkenemistä teräksen lämpiämisessä, joten kaava sopii vain teräsosille, joiden kestävyys on suoraan verrannollinen myötörajaan. Kaava ei siten sovellu suoraan osille, joiden kestävyys määräytyy stabiliteetin menetyksen tai muodonmuutosrajatilan mukaan. Esimerkiksi kylmämuovautun teräsputken nurjahduskestävyys on palotilanteessa suhteessa pienempi kuin normaalilämpötilassa, koska palomitoituksessa putken dimensioton hoikkuus kerrotaan termillä  $\sqrt{k_{y,\theta}/k_{E,\theta}}$ , jonka arvo on yli yksi ennen kuin teräsosa lämpiää lähellä 900 °C:tta. Kuvassa 37 esitetään esimerkkinä erään puristetun teräsputken nurjahduskestävyyden pienennystekijät normaalilämpötilassa  $\chi$  ja teräsputken lämpiämisessä  $\chi_{fi}$ .



**Kuva 37. Esimerkki suojaamattoman teräsputken nurjahduskestävyyden pienennystekijän muuttumisesta palotilanteessa.**

Teräsputkiristikoissa useimpien teräsosien kriittinen lämpötila on hyvin korkea, koska osien käyttöaste normaalilämpötilassa on alhainen. Jokaisen profiiliryhmän rasi-tuimman sauvan käyttöaste on kuitenkin korkea, jolloin niiden kriittinen lämpötila jää alhaiseksi. Jos otaksutaan osan käyttöasteeksi normaalilämpötilassa

tasaa 1 ja osan kestävyuden olevan suoraan verrannollinen myötörajaan, niin tällöin teräsosan kriittinen lämpötila on alimmillaan 616 °C. Erilaiset stabiiliuden menetykset kuitenkin laskevat teräksen kriittistä lämpötilaa. Teräsputkiristikon terässauvojen kriittisiä mitoitusehtoja on yleensä vain muutama, vaikka osia mitoitettaessa lasketaankin useita mitoitusehtoja. Uumasauvojen vetosauvat mitoitaa aksiaalinen vetovoima ja puristussauvat nurjahduskestävyys. Alapaarteen mitoitaa vetokestävyys tai leikkauskestävyys, jos alapaarre kiinnitetään pilariin ja yläpaarteen taivutus- ja nurjahduskestävyyden yhteisvaikutus tai leikkauskestävyys. Näistä vain veto- ja leikkauskestävyydessä teräksen myötöraja on suoraan verrannollinen teräsosan palotilanteen kestävyteen. Jos voidaan olettaa teräsosan poikkileikkauksen lämpötila tasan jakautuneeksi, niin sama pätee myös taivutuskestävyyteen silloin kun kiepahdusta ei tarkastella. Stabiiliustarkasteluissa teräksen myötöraja ja palotilanteen kimmokerroin vaikuttavat teräsosan kestävyden lisäksi myös stabiiliuden menetystä kuvaaviin ehtoihin, jolloin teräksen lämpiämisen vaikutus ei ole enää selkeästi nähtävillä.

### **12.3 Staattisen systeemin vaikutus**

Teräsputkiristikon staattinen malli vaikuttaa ristikon palotekniseen mitoitukseen. Staattisesti määrätyn teräsputkiristikon palonkesto-aika ja ristikon tarvitsema liikuntavara voidaan määrittää riittävällä tarkkuudella. Kun palotilanteessa staattisesti määrätyn ristikon kantokyvyn menetykseen riittää yleensä jo yhdenkin terässauvan stabiliteetin menetys, niin staattisesti määräämättömässä ristikossa on usein ylimääräistäkin kapasiteettia, mutta sen hyödyntäminen palomitoituksessa on kuitenkin hankalaa. Lisäksi staattisesti määräämättömissä ristikoissa tukien siirtymättömyys ja ristikon eri osien epätasaisen lämpeneminen aiheuttaa pakkovoimia, joita ei muodostu staattisesti määrättyyn ristikkoon. Staattisesti määräämättömän teräsputkiristikon kriittinen lämpötila ja palonkesto-aika ovat yleensä suurempia kuin staattisesti määrättyllä ristikolla. (62). Rakenteiden mekaniikan perusoletus on, että estetty muodonmuutos aiheuttaa jännityksen. Lämpötilan kohotessa teräsosa lämpölaajenee, mikä osittain tai kokonaan estettyinä aiheuttaa osaan jännitys jakauman. Muodostuvaan pakkovoimaan vaikuttavat teräsosan lämpötilan muutos, kiinnitysaste ja jäykkyys sekä mahdollinen poikittainen

kuorma. Käytännössä kaikissa teräsosissa tukien siirtyminen on ainakin osittain estynyt ja toisaalta täysin jäykkiä kiinnityksiä on käytännössä hankala toteuttaa, koska tuella esiintyy rakenteen joustosta tai plastisista muodonmuutoksista johtuvaa siirtymistä ja kiertymistä. Lämpötilaerosta  $\Delta\theta_a$  johtuvan osittain tai kokonaan estyneen muodonmuutoksen aiheuttama lisäjännitys  $\Delta\sigma_a$  on (58)

$$\Delta\sigma_a = k\alpha_a E_{a,\theta} \Delta\theta_a \quad (91)$$

jossa  $k$  on teräsosan kiinnitysaste, jonka arvo vaihtelee välillä 0...1 ja se saa täysin estyneessä lämpölaajenemisessa arvon yksi (75). Paikallisessa palossa lämpöpitenemisen vaikutus ei ole niin suuri kuin nimelliseen aika-lämpötilakäyrään perustuvassa palotarkastelussa. Vapaasti tuettu staattisesti määrätty ristikko pääsee lämpölaajenemaan pystysuunnassa alaspäin melko vapaasti, mutta pituussuuntainen lämpölaajeneminen on yläpaarteen osalta osittain estynyt. Tällöin ristikon taipuma kuitenkin vähentää lämpölaajenemisen vaikutusta. Kehänurkkaisissa staattisesti määräämättömissä ristikoissa lämpöpitenemisen vaikutus on jo huomattavasti hankalampi huomioida. Vaikka estetystä lämpöpitenemisestä aiheutuva lisäjännitys voi olla erittäin suuri, niin käytännön kokeissa ei ole havaittu teräsrakenteiden murtumista lämpöpitenemisen vaikutuksesta. Sen sijaan on havaittu teräsrakenteissa lämpöpitenemisen johdosta voimasuureiden uudelleen jakautumista, rakenteiden joustoa kokonaisuudessaan ja jonkinasteista tyssäytymistä erittäin jäykällä tuella. Teräsrakenteiden suunnittelussa palolle alttiit rakenteet suunnitellaan aina kokonaisuutena siten, että lämpöpiteneminen pääsee purkautumaan johonkin suuntaan. Tällöin staattisesti määrättyjen rakenteiden käyttö tuottaa helpommin sopivan rakennemallin. Myös teräsrakenteeseen liittyvät rakennusosat pitää huomioida suunnittelussa, jolloin yhtenäistä teräsrakennusosaa ei saa tukea molemmista päistään esimerkiksi erittäin jäykkien teräsbetonirakennusosien väliin ilman riittävää liikuntavaraa. Lämpöpitenemisen vaikutus pitää huomioida myös palon hiipumisen aikana etteivät rakennusosat putoa tueltaan, kun lämpöpitenemisen muodonmuutokset alkavat osittain palautua. Eurocoden teräsrakenteiden mitoitusmenetelmistä rakenneosan analyysissä lämpöpitenemisen vaikutusta ei tarvitse huomioida, mutta myös tällöin rakennetta pitää tarkastella lämpöpitenemisen

suhteen myös kokonaisuutena. Osarakenteen analyysissä ja kokonaisanalyysissä rakenteen lämpölaajeneminen pitää normin mukaan huomioida (64,78).

#### 12.4 Palotilanteen rajatilat

Teräsputkiristikon palonkestävyys arvioidaan sortumis- tai taipumisrajatiloilla, jotka muodostavat Robertsonin ja Ryan kriteerin. Sortumisrajatilassa koko ristikon kriittinen lämpötila on sama kuin ristikon yksittäisen terässauvan matalin kriittinen lämpötila. Taipumisrajatilassa ristikon kriittinen lämpötila määräytyy ristikon taipumiskriteerin perusteella (75). Vesander tutki diplomityössään teräsristikon kantokykyä palo-olosuhteissa. Laskettujen ristikoiden kriittiset lämpötilat olivat 400...550 °C siten, että korkeammat kriittiset lämpötilat saatiin tasaisella lämpötilarasituksella, kun taas ristikon pituus- ja pystysuuntaiset lämpötilaerot laskivat kriittistä lämpötilaa. Työssä ristikon palorasitusta kuvattiin pystysuuntaisella 200 °C:n lämpötilaerolla siten, että alapaarre oli kuumempi. Työn tuloksissa todettiin teräsristikon palotilanteen kantokyvyn määräytyvän sortumisrajatilan mukaan yksittäisen puristussauvan nurjahduksesta ennen kuin taipumarajatila ehti ylittyä (75). CIDECT:n ohjeiden mukaan normaalilämpötilassa kylmämuovatuille neliö- ja suorakaideteräsputkille käytetään joko nurjahduskäyrää b yhdessä perusaineen myötörajan kanssa tai nurjahduskäyrää c yhdessä muokkauslujittuneen myötörajan kanssa (10,14,51). Putkipalkkikäsikirjassa esitetään kuitenkin, että Putkipalkkien kanssa käytetään nurjahduskäyrää c yhdessä perusaineen myötörajan kanssa, jolloin mitoitus on varmalla puolella. Palomitoituksessa kylmämuovatuilla teräsputkilla käytetään nurjahduskäyrää c (50,69). Ilman tarkempaa tarkastelua teräsputkiristikon puristettujen sauvojen nurjahduspituuskertoimeksi voidaan valita 1,0. Todellisuudessa kerroin on kuitenkin pienempi (39). Taulukossa 11 esitetään Teräsnormikortin N:o 13/2000 mukaiset ristikon eri osien nurjahduspituuskertoimet normaalilämpötilassa ja palotilanteessa. Kertoimia käytettäessä sauvan systeempituus on tasossa ristikon solmupisteiden väli ja tasosta ulospäin ulkoisten tukien väli. Kertoimien käytön edellytyksenä on, että sauvojen liitokset ympärihitsataan ja että uumasauvojen päät eivät ole litistetyjä eikä liitoksia limitetä yli 30 %:a (69). Teräsputkiristikon uumasauvan nurjahduspituuteen vaikuttaa uumasauvan ja paarteiden jäykkyyksien suhde, joka palotilanteessa kasvaa

entisestään (77). Taulukon 11 palotilanteen nurjahduspituuskertoimet vastaavat CIDECT:n ohjeissa esitettyjä kertoimia normaalilämpötilassa (39).

**Taulukko 11**

TERÄSPUTKIRISTIKON OSIEN NURJAHDUSPITUUSKERTOIMET (69)

Rakenneosa	Nurjahduspituuskerroin normaalilämpötilassa		Nurjahduspituuskerroin palotilanteessa	
	Tasossa	Tasosta ulospäin	Tasossa	Tasosta ulospäin
Paarre	1	1	0,9	0,9
Uumasauva	0,9	0,9	0,75	0,75

Teräspuutkiristikon mitoituksessa yksittäisten terässauvojen lisäksi tarkistetaan myös ristikon kokonaisstabiliteetti. Kokonaisstabiliteetti saattaa muodostua mitoittavaksi, jos ristikko tuetaan painopisteensä alapuolelta tai jos puristettu paarre on sivusuunnassa tukematon (77). Kun käytetään vapaavälisiä liitoksia ja rakennemalliksi otaksutaan sauvarakenne, jossa kaikkien sauvojen liitokset toimivat nivelinä, niin laskettu taipuma jää liitosten jouston takia noin 12...15 % liian pieneksi. Koska laskettu taipuma on epävarmalla puolella, niin CIDECT:n ohjeiden mukaan laskettuun taipumaan lisätään 15 %. Kun käytetään limitettyjä liitoksia ja rakennemalliksi otaksutaan sauvarakenne, jossa kaikkien sauvojen liitokset toimivat nivelinä, niin taipumaksi saadaan melko konservatiivinen arvo. Tällöin rakennemalli toimii paremmin, jos otaksutaan paarteet jatkuviksi sauvoiksi sekä uumasauvojen ja paarteiden liitokset niveliksi (39). Polttokokeissa teräsosaa ei kuormiteta romahtamiseen asti. Käytännössä teräsosan kantokyvyn menetystä edeltää plastisen nivelen muodostama huomattava muodonmuutos, jonka seurauksena osa menettää stabiliteettinsa. Teräsosan katsotaankin menettäneen kantokykynsä jo määrätyn muodonmuutoksen tapahtuessa. Jos teräsosa kuormitettaisiin polttokokeissa romahtamiseen asti, niin se saattaisi romahtaessaan vaurioittaa polttouunia sekä kuormitus- ja mittauslaitteistoja. Standardipolttokokeessa käytetäänkin teräsosan kantokyvyn menetyksen määrittämiseen rinnakkain taipuma- ja

taipumanopeusrajatiloja. Teräsosan taipuman raja-arvo on  $L/20$  ja vaihtoehtoisesti taipumanopeuden raja-arvo on (43)

$$\dot{\delta} = \frac{L^2}{9000H} \quad (92)$$

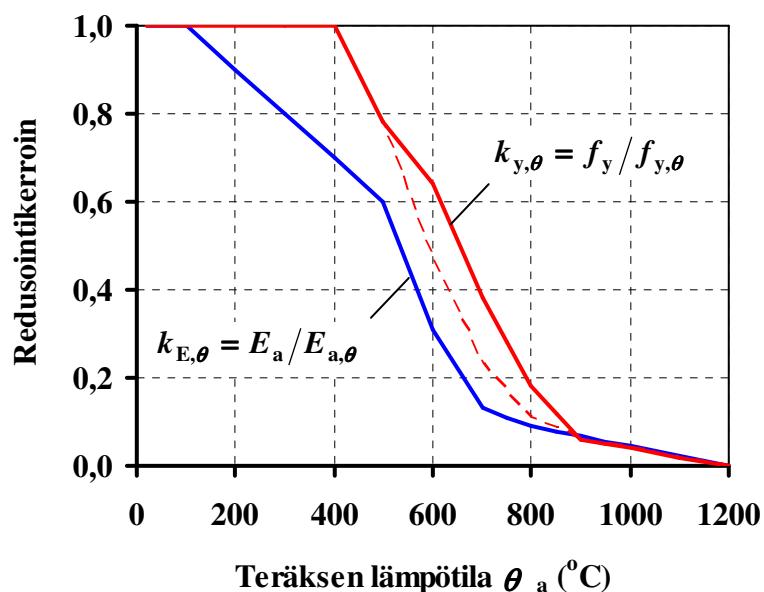
jossa  $\dot{\delta}$  on taipumanopeus yksikkönä mm/min,  $L$  on rakennusosan jänneväli ja  $H$  on teräsputkiristikon rakennekorkeus. Taipumanopeusrajatila astuu kuitenkin voimaan vasta, kun teräsosan taipuma on ylittänyt arvon  $L/30$  (75).

## 12.5 Teräsputkiristikon palonkestävyyden parantaminen

Teräsputkiristikon palokestävyyttä voidaan parantaa nostamalla osien kriittistä lämpötilaa tai hidastamalla teräksen lämpiämistä. Teräsosan kriittistä lämpötilaa voidaan korottaa yllimitoittamalla osa, jolloin yleensä myös osan lämpiäminen palossa hidastuu, kun teräsosan poikkileikkaustekijä pienenee. Teräsosan kriittisen lämpötilan nostaminen yllimitoittamalla on taloudellista vain, kun osan käyttöaste on normaalilämpötilassa alhainen. Teräksen lämpiämisen myötä yllimitoittamalla saatu lisäkapasiteetti on suhteessa huomattavasti pienempi kuin yllimitoittaessa normaalilämpötilamitoituksessa. Esimerkiksi EN 1363-1 –standardin aika-lämpötilakäyrään perustuvassa palomitoituksessa teräsputkiristikko on taloudellista tehdä suojaamattomana vain paloluokkaan R15.

Japanissa ja Keski-Euroopassa on tutkittu palotilanteeseen kehitettyjä Fire-Resistant Structural Steel –teräslaatuja, kuten saksalainen ThyssenKrupp Steel, joiden lujuusominaisuudet ovat korkeissa lämpötiloissa paremmat kuin tavallisella teräksellä. Kuvassa 38 esitetään Fire-Resistant Structural Steel –teräksen oletetun jännitys-venymäyhteyden pienennystekijät. Kuvaan 38 on myös katkoviivalla merkitty tavallisen teräksen myötörajan pienennystekijät.





**Kuva 38. Fire-Resistant Structural Steel –teräksen oletetun jännitys-venymäyhteyden pienennystekijät korkeissa lämpötiloissa.**

Aiemmin teräsrakenteiden palonkestävyyttä parannettiin lähes yksinomaan hidastamalla teräsosan lämpenemistä palosuojauksella. Palosuojauksessa teräsosa peitetään lämpöä eristävällä palamattomalla palosuojamateriaalilla, joka teräsputkiristikoidilla on käytännössä palosuojamaali tai -ruiskute. Palosuojamaaleilla on tietty kuivakalvopaksuuden raja-arvo, jota paksummat maalikerrokset irtoavat palon aikana, jolloin palosuojamaalien toiminta yli tunnin palossa on hieman epävarmaa. Teräsputkien lämpiämistä voidaan hidastaa myös kierrättämällä vettä teräsputkessa, jolloin lämpöenergia siirtyy pois teräsputkesta veden virtauksen mukana. Vesikierron pitää kuitenkin olla riittävän nopeaa, jottei vesi pääse höyrystymään putken sisällä (50). Teräsputkiristikko voidaan suojata palolta myös rakenteellisin keinoin. Hallirakennuksissa kantava kattoristikko voidaan sijoittaa esimerkiksi vesikatteen yläpuolelle, jolloin kate kiinnitetään ristikon alaparteen alapuolelle. Alaslasketun katon käyttö ristikon rakenteellisessa palosuojauksessa ei kuitenkaan ole suotavaa, koska alaslasketun katon yläpuolelle muodostuu erittäin helposti paloa kiihdyttävä hormi. Tämä on erittäin vaarallinen ilmiö halleissa, joissa on kaaren muotoinen kattorakenne (78).

## 12.6 Winrami –teräsrakenteiden mitoitusohjelmisto

Winrami on tasossa olevien sauvarakenteiden laskentaan luotu FEM-ohjelma, johon kuuluu teräsputkien mitoittamisen suorittava Profiiliohjelma. Profiiliohjelmassa terässauvat mitoitetaan SRMK:n osan B7-1996 tai Eurocoden 1993 mukaan ja liitokset CIDECT:n ohjeiden mukaan. Eurocoden liitosten mitoitusohjeet poikkeavat hieman CIDECT:n ohjeista, mutta kokonaisuutena molempien ohjeiden lopputulos on hyvin samanlainen (78). Winramissa palomitoitus tehdään EN 1363-1 -standardin aika-lämpötilakäyrän perusteella (76). Profiiliohjelman palotilanteen tarkasteluissa rezultoiva emissiivisyys 0,5. Lisäksi teräsosien stabiiliusmitoitusehdoissa huomioidaan polttokokeiden ja teräksen palotilanteen materiaalmallin välisen yhteyden korjaava osavarmuuskerroin 1,2 (14). Tätä kerrointa ei kuitenkaan enää esitetä Eurocoden 1993 osassa 1-2. Profiiliohjelmassa nurjahdusehdossa alkutaipuman ja jäännösjännitysten vaikutuksen huomioivan kertoimen  $\alpha$  arvo nurjahdusluokassa c on 0,49. Eurocoden 1993 osassa 1-2 kerroin kuitenkin korvataan termillä  $0,65\sqrt{235/f_y}$ , jonka arvo teräslaadulla S355J2H on 0,53.

## 13 LIITOSTEN PALOMITOITUS

### 13.1 Liitosalueen lämpeneminen tulipalossa

Tampereen teknillisellä korkeakoululla (TTKK) tehtiin teräsputkiristikon polttokoe, jossa tutkittiin ristikon eri osien lämpötilaa ISO-834 –standardipalossa 15 ja 30 minuutin kohdalla. Ristikon pituus oli 3,6 m ja korkeus 1,2 m (21,69). Kokeessa havaittiin teräksen lämpötilan vaihtelevan yksittäisten teräsosien eri kohdissa, minkä syyksi arveltiin näkyvyyden vaihtelua lieskoihin. 15 minuutin kohdalla todetut lämpötilaerot kuitenkin tasoittuivat 30 minuutin kohdalla (21). Ristikon alapaarteen ja uumasauvojen lämpötilojen todettiin noudattavan melko hyvin laskettuja lämpötiloja, mutta yläpaarteen ja liitosalueen lämpötilat jäivät keskimäärin 50 °C:ta laskettua alhaisemmaksi. Yläpaarteen alhaisempi lämpötila selittyy osittain yläpaarteeseen kiinnitetyn profiilipellin varjostuksella. Tämä lisää yläpaarteen ja uumasauvojen välistä jäykkyyseroa, mutta samalla se parantaa yläpaarteen varmuutta palotilanteessa. Liitosalueen alhaisempi lämpötila selittyy luultavasti liitosalueen paikallisesti pienemmällä poikkileikkaustekijällä. Tämä lisää liitoksen varmuutta palotilanteessa ja tukee käsitystä liitosten uumasauvoja tukevasta vaikutuksesta (69). Kokeen tulosten keskiarvoja esitetään taulukossa 12.

**Taulukko 12**

TTKK:SSA TEHDYN RISTIKON POLTTOKOKEEN TULOSTEN KESKIARVOJA (69)

Sauva	Profiili	Laskettu lämpötila	Lämpötila liitos-alueella	Lämpötila keskellä sauvaa	Liitos- ja keskiosan erotus
DG2	P80×80×5	661	677	726	50
VT3	P60×60×4	686	668	712	44
DG4	P80×80×4	684	623	684	61
AP	P100×100×5	659	-	651	-
YP	P100×100×5	659	-	604	-

Taulukossa 12 käytetään lyhennysmerkintöjä: alapaarre (AP), yläpaarre (YP), diagonaalisauva (DG) ja vertikaalisauva (VT). Kokeessa sauvat DG2 ja VT3 sijaitsivat lähellä poltinta, mikä vaikutti hieman niiden lämpötiloihin. Liitosalueella on enemmän terästä ja vähemmän palolle altista pintaa kuin liitokseen liittyvillä sauvoilla keskimäärin, joten liitosalueella on paikallisesti pienempi poikkileikkaustekijä kuin liitoksen sauvoilla. Liitoksen sauvat myös varjostavat liitosaluetta, jolloin liitoksen näkyvyys liekkeihin nähden on pienempi kuin liitoksen sauvoilla. Pienemmän poikkileikkaustekijän ja varjostuksen vaikutuksesta liitosalue lämpenee hitaammin kuin liitoksen sauvat. Eurocodessa liitosalueen lämpötila voidaan arvioida liitosalueen paikallisella poikkileikkaustekijällä tai hieman konservatiivisemmin otaksumalla liitokseen tasan jakautunut lämpötila, joka lasketaan liitoksen terässauvojen suurimmalla poikkileikkaustekijällä (12). Koska ristikon liitosalueen lämpötila jää palossa laskettua alhaisemmaksi, niin liitoksen kestävyys on vastaavasti hieman laskettua parempi. Ristikon teräsosien jäähtyessä liitoksiin saattaa kuitenkin muodostua huomattava vetojännitystila, koska liitoksen terässauvojen lämpöpitenemisestä aiheutuvat muodonmuutokset palautuvat. Joustavissa liitoksissa muodostuva lisäjännitys ei ole niin merkittävä, kuin jäykissä ja hauraissa liitoksissa, joissa jäähtymisvaihe voi olla liitoksen kannalta mitoittava. Palon jälkeen teräsrakenteen liitosten kunto pitääkin aina tarkastaa huolellisesti ennen rakenteen ottamista uudelleen käyttöön.

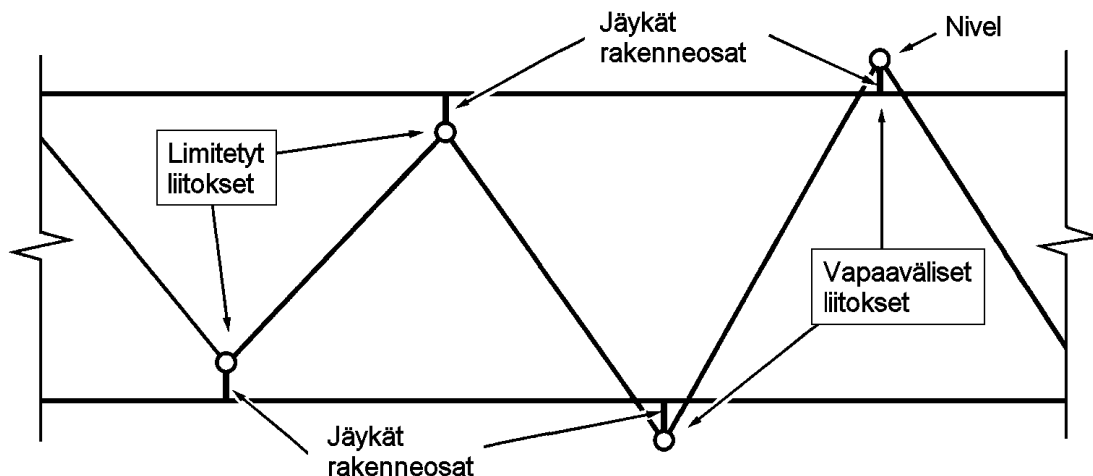
### 13.2 Liitosten geometriset ehdot ja kestävyys ehdot

Liitoksen epäkeskisyys  $e$  on liitoksen todellisen solmupisteen poikkeama teoreettisesta asemastaan, mikä aiheuttaa liitokseen lisämomentin, joka huomioidaan paarteiden ja liitosten voimasuureissa. Momenttia ei kuitenkaan tarvitse huomioida liitoksen voimasuureissa, jos seuraava ehto täyttyy (50)

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \quad (93)$$

jossa  $h_0$  on paarteen poikkileikkauksen korkeus. Liitosten epäkeskisyden vaikutusta ristikon staattiseen malliin havainnollistetaan kuvassa 39. Winramissa

ristikon FEM-malliin yhdistetään liitosmakroilla tieto liitoksen epäkeskisyydestä, jolloin Winramin liitosten mukaisella mitoituksella voidaan huomioida epäkeskisyydestä aiheutuva lisätaivutusmomentti ristikon sauvojen ja liitosten voimasuureissa.



**Kuva 39. Teräspuistikristikon vapaavälisten ja limitettyjen liitosten epäkeskisyyden vaikutus ristikon staattiseen malliin (39).**

Liitokset toteutetaan aina ristikon staattisen mallin mukaisesti. Ristikon staattiseksi malliksi valitaan yleensä jatkuvat paarteet, joihin uumasauvat liittyvät nivelliitoksella, jolloin liitosten pitää pystyä siirtämään aksiaaliset rasitukset paarteille. Liitosten pitää kuitenkin olla joustavia, jotta paarteiden taivutusmomentit eivät välity uumasauvoille.

Liitosten mitoitus ehdot perustuvat pääosin kokeisiin. Kokeita ei kuitenkaan ole tehty kaikille profiiliyhdistelmille, joten liitosten mitoitus ehtojen hyväksyttävyyttä tarkistetaan liitoksen geometrisilla ehdoilla. Ehdot myös varmistavat, että suunnittelu pysyy asetettujen raja-arvojen sisällä, koska liitoksen toiminta saattaa muuttua oleellisesti mentäessä raja-arvojen ulkopuolelle (77). Liitosten geometristen ehtojen pätevyys todetaan yleensä vain normaalilämpötilassa, koska puristettujen uumasauvojen kohdalla geometriin ehtoihin liittyy teräksen kimmokertoimen ja myötörajan suhde, jonka arvo on normaalilämpötilassa vakio, mutta joka palossa vaihtelee laajasti teräksen lämpötilan mukaan.

Liitoksen kestävyys ehdot tarkistetaan palotilanteessa liitosalueen lämpötilan mukaisilla palotilanteen materiaaliarvoilla. Jos normaalilämpötilassa liitoksen terässauvojen käyttöaste on matala ja liitoksen käyttöaste on korkea, niin liitoksen palotilanteen kestävyys voi muodostua paikallisesti mitoittavaksi (47).

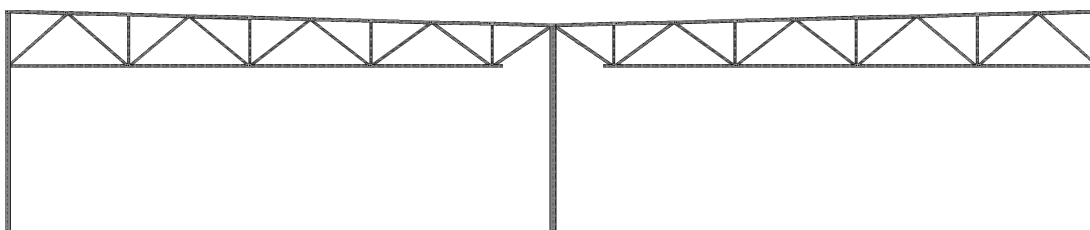
### **13.3 Hitsi- ja ruuviliitosten palomitoitus**

Teräsputkiristikoiden uumasauvojen ja paarteen väliset liitokset ovat hitsiliitoksia. Tulipaloissa ja polttokokeissa on havaittu, että ristikon teräsputkien murtuminen sijoittuu hitsatun liitosalueeseen ulkopuolelle. Hitsiliitokset mitoitetaan palossa palotilanteen materiaaliarvoilla. Paarteen ja uumasauvojen väliset liitokset hitsataan tasalujiksi liitoksen sauvojen kanssa. Normaalilämpötilassa hitsi on tasaluja, jos se on päittäisliitoksessa täysin läpihitsattu V-hitsi tai S355 teräksellä pienahitsin a-mitta on vähintään 7 % liitoksen sauvojen pienintä ainevahvuutta suurempi (39,50). Palotilanteessa hitsit mitoitetaan käyttämällä palotilanteen materiaaliarvoja, jotka määritetään Eurocoden 1993 osassa 1-2 esitetyillä pienahitsien pienennystekijöillä. Täysin läpihitsatulla päittäisliitoksella voidaan kuitenkin 700 °C:n lämpötilaan saakka käyttää heikomman liitettävän osan lujuutta soveltaen perusaineen pienennystekijää (64).

Teräsputkiristikkojen tukiliitokset ja asennuslohkojen väliset liitokset ovat yleensä ruuviliitoksia. Palotilanteessa hitsi- ja ruuviliitokset käyttäytyvät hieman eri tavoilla eikä ruuviliitosten palomitoitus ole niin yksiselitteinen kuin hitsiliitosten (74). Ruuviliitoksessa ruuvin otaksutaan olevan samassa lämpötilassa kuin liitosalue. Ruuvin leikkaus-, reunapuristus- ja vetokestävyys lasketaan käyttämällä ruuvin lämpötilan mukaista lujuuden pienennystekijää, jotka esitetään Eurocoden 1993 osassa 1-2. Teräsputkiristikon lämpölaajenemisen vaatima ruuviliitosten liikuntavara huomioidaan käyttämällä toisessa liitososassa soikeita reikiä, joiden liikuntavara lasketaan rakennusosan mittojen mukaan. Kun normaalilämpötila-alueella riittävä liikuntavara on luokkaa  $\pm 20$  mm, niin palotilanteessa tarvittava liikuntavara on huomattavasti suurempi. Liukumisen kestävien ruuviliitosten otaksutaan liukuvan palossa, jolloin nämä ruuvit mitoitetaan palossa reunapuristukselle (11,75).

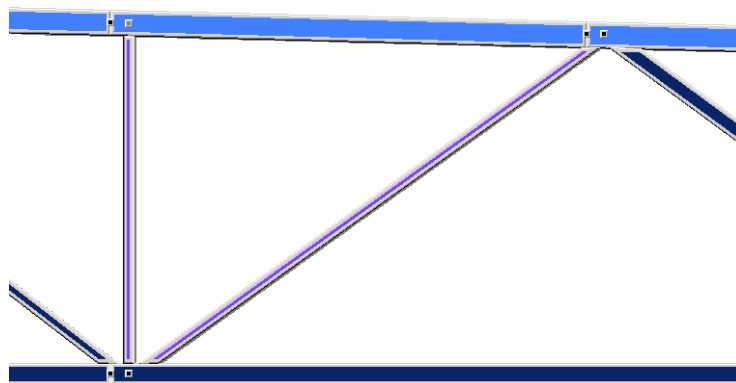
## 14 ESIMERKKI

Esimerkkinä tarkasteltiin teollisuushallin teräsputkiristikkoa, joka on osa hallin kattorakennetta. Hallin pituus on 102 m, leveys 47 m ja vapaa korkeus ristikon kohdalla 7,05 m. Ristikkoa tukevat pilarit on kiinnitetty alaosaan jäykästi. Ristikon ja pilarin välinen liitos on reunapilarilla jäykkä ja keskipilarilla nivel. Ristikon yläpaarten kaltevuus on 1:40 ja alapaarre on vaakasuora. Kuvassa 40 esitetään hallin kehärakenne. Kehäväli on 6 m ja yhden ristikon jänneväli 23,385 m. Ristikon kokonaiskorkeus on reunapilarilla 2,450 m ja keskipilarilla 1,863 m.



**Kuva 40. Teollisuuden tuotantohallin teräsputkiristikko.**

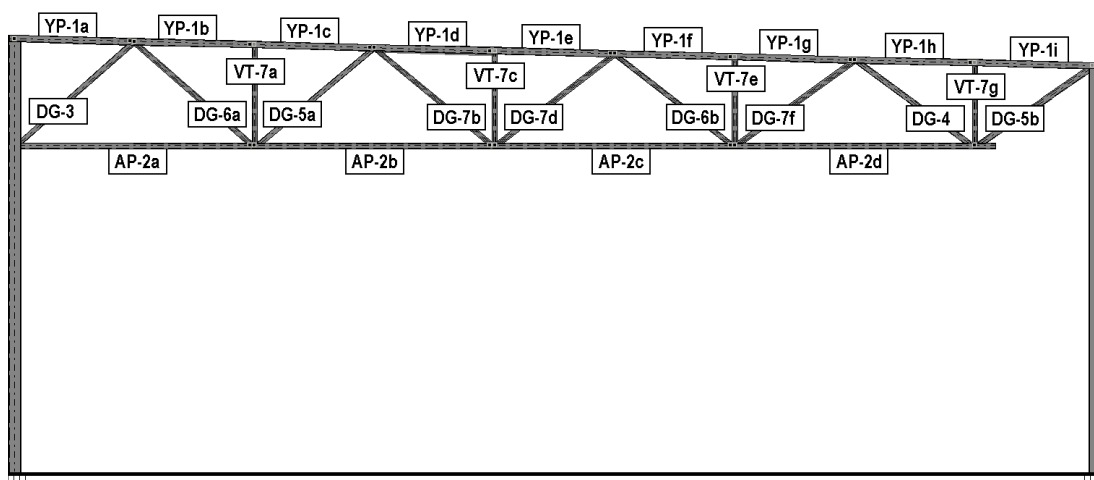
Ristikkoa kuormittaa omapainon lisäksi 4 kN/m kattorakenteen paino ja 12 kN/m lumikuorma. Ristikon yläpaarten kuormat sijoitettiin katto-orsien mukaisesti pistekuormina ristikon solmupisteisiin. Orsien otaksuttiin myös toimivan yläpaarten nurjahdustukina. Kuormia käsiteltiin Suomen kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan. Teräsputkiristikkoa tarkasteltiin paikallisessa palossa mitoituspaloilla, jonka sijaintia muutettiin ristikon pituussuunnassa. Mitoituspalo oli kuormalavapallopalo, jonka palorasitus laskettiin taulukkolaskentaohjelmalla ja CFAST -ohjelmistolla. Ristikko mitoitettiin Winramilla. Palomitoituksessa ei huomioitu pilareiden lämpiämistä, vaikka niiden lämpiäminen vaikuttaisi hieman ristikon voimasuureisiin reunapilarin puolella. Ristikon terässauvat ovat kylmämuovattuja teräsputkia, joiden teräslaji on S355J2H. Voimasuureet laskettiin Winramissa liitosten mukaisella mallilla. Paarteiden pituussuuntainen lämpötilajakauma huomioitiin jakamalla paarteet solmupisteiden välisiin osiin. Osan katkaisupiste sijoitettiin kuvan 41 mukaisesti teoreettisen solmupisteen viereen, koska Winramissa uumasauvan ja paarten välistä liitoskomponenttia ei voi sijoittaa solmupisteeseen.



**Kuva 41. Paarteen katkaisupisteen ja liitoskomponentin sijainti.**

*Murto- ja käyttörajatilamitoitus*

Teräsputkiristikon paino ilman varusteluosia on 1518 kg. Ristikon sauvojen numerointi, profiilit, murtorajatilan voimasuureet, käyttöasteet ja kaavan 90 mukaiset kriittiset lämpötilat esitetään taulukossa 13. Ristikon sauvojen numerointi esitetään myös kuvassa 42. Kun murtorajatilamitoituksessa vertikaalisauvojen kapasiteetista on käytössä alle 50 %, niin paarteiden kapasiteetista on käytetty yli 90 %. Diagonaalisauvoista jokaisen profiilityypin rasitettuimman sauvan kapasiteetista saadaan käyttöön keskimäärin yli 90 % käyttöön, mutta kaikkien seuraavien samaa profiilia olevien sauvojen käyttöasteet jäävät yleensä melko alhaisiksi.



**Kuva 42. Teräsputkiristikon sauvanumerointi.**



Taulukko 13

MURTORAJATILAMITOITUKSEN TULOKSIA

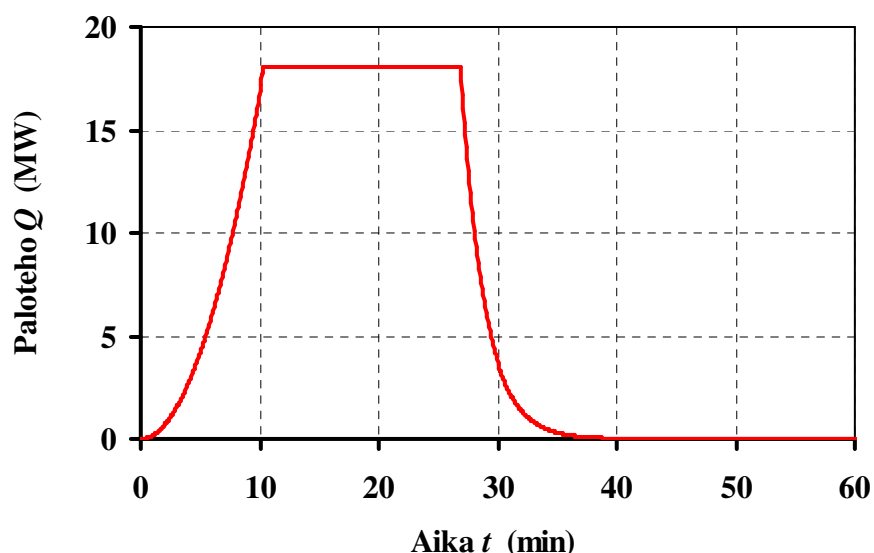
Osa	Profiili	Voimasuureet			Käyttöaste $\mu$	Kriittinen lämpötila $\theta_{a,cr}$ °C
		$N_d$ kN	$M_d$ kNm	$V_d$ kN		
YP-1a	P140×140×7,1	6	-2	0	0,04	1101
YP-1b	P140×140×7,1	-499	4	-62	0,67	677
YP-1c	P140×140×7,1	-500	5	2	0,67	677
YP-1d	P140×140×7,1	-766	4	-61	0,97	620
YP-1e	P140×140×7,1	-766	4	-1	0,97	620
YP-1f	P140×140×7,1	-766	4	21	0,91	630
YP-1g	P140×140×7,1	-741	5	2	0,95	624
YP-1h	P140×140×7,1	-743	2	61	0,87	637
YP-1i	P140×140×7,1	-346	4	244	0,73	664
AP-2a	P120×120×7,1	272	-9	-247	0,87	637
AP-2b	P120×120×7,1	663	9	-195	0,69	672
AP-2c	P120×120×7,1	792	-2	-80	0,81	648
AP-2d	P120×120×7,1	792	-23	236	0,93	627
DG-3	P100×100×6	-374	0	0	0,97	620
DG-6a	P70×70×4	299	0	0	0,91	630
VT-7a	P60×60×4	-56	0	0	0,44	740
DG-5a	P100×100×4	-217	0	0	0,84	643
DG-7b	P60×60×4	130	0	0	0,47	730
VT-7c	P60×60×4	-58	0	0	0,42	747
DG-7d	P60×60×4	-36	0	0	0,52	715
DG-6b	P70×70×4	-67	0	0	0,63	686
VT-7e	P60×60×4	-58	0	0	0,39	758
DG-7f	P60×60×4	184	0	0	0,67	677
DG-4	P100×100×5	-304	0	0	0,92	629
VT-7g	P60×60×4	-61	0	0	0,38	762
DG-5b	P100×100×4	418	0	0	0,79	652

Ristikön määrävän muuttuvan ja pysyvän kuorman suhde on 2,58. Palotilanteen kuormitussuhde on 0,45 ja palotilanteen käyttöaste palon alussa 41 % murtorajatilán käyttöasteesta. Taulukossa 13 olevat terässauvojen kriittiset lämpötilat laskettiin kaavalla 90.

Ristikön sallittu taipuma on  $L/200$ , josta muuttuvan kuorman aiheuttamaa taipumaa saa olla korkeintaan  $L/250$ . Käyttörajatilassa laskettu ristikon kokonaistaipuma on noin 62 mm, mikä toteuttaa taipumaehdon.

### *Mitoituspalo*

Yhden kuormalavapinon peittämä lattiapinta-ala on  $1,2 \text{ m}^2$ . Kuormalavoja on neljässä pinossa ja pinojen korkeus on 2 m, jolloin mitoituspalon maksimipaloteho on 18 MW ja kokonaislämpöenergia noin 23760 MJ. Kuormalavapinopalo kehittyy nopeasti, joten valitaan ominaiskasvuajaksi 150 s ja hiipumisaikavakioksi 120 s. Palotehon konvektiivinen osuus on 70 %. Kuormalavapinon palotehokäyrä esitetään kuvassa 43. Palopatsaan karakteristinen mitta on 2,5 m ja lieskan korkeus noin 7,7 m eli lieskat ulottuvat ristikon alapaarteeseen.



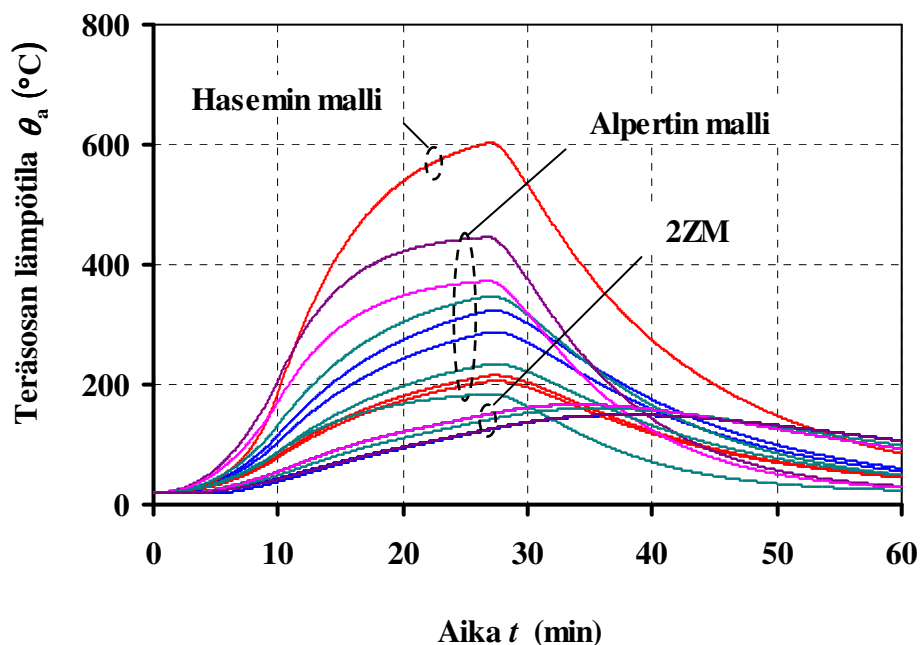
**Kuva 43. Kuormalavapinon palotehokäyrä.**

### *Kaksivyöhykemallisimulointi*

Kaksivyöhykemallin vyöhykkeiden lämpiäminen ja vyöhykkeiden välisen rajapinnan laskeutumisenopeus simuloitiin CFAST –ohjelmistolla. Vaikka halli muodostaakin yhden suuren palo-osaston, niin simuloinnissa tila jaettiin keinotekoisesti kolmeen pienempään palotilaan, joiden sivumitat olivat 34 m ja 47 m sekä keskimääräinen korkeus 9,210 m. Mitoituspalo sijoitettiin keskimmäiseen palotilaan. Hallin pitkien sivujen yläreuniin otaksuttiin ikkunarivistö, joissa ikkunan korkeus on 1,0 m ja ikkunan alapinnan korkeus lattiatasosta 5,5 m. Ikkunoiden otaksuttiin rikkoutuvan palon aikana vain keskimmäisessä palotilassa palopatsaan läheisyydessä. Hallin vaipan pinnoista lämpöhäviö otaksuttiin vain hallin kattorakenteisiin.

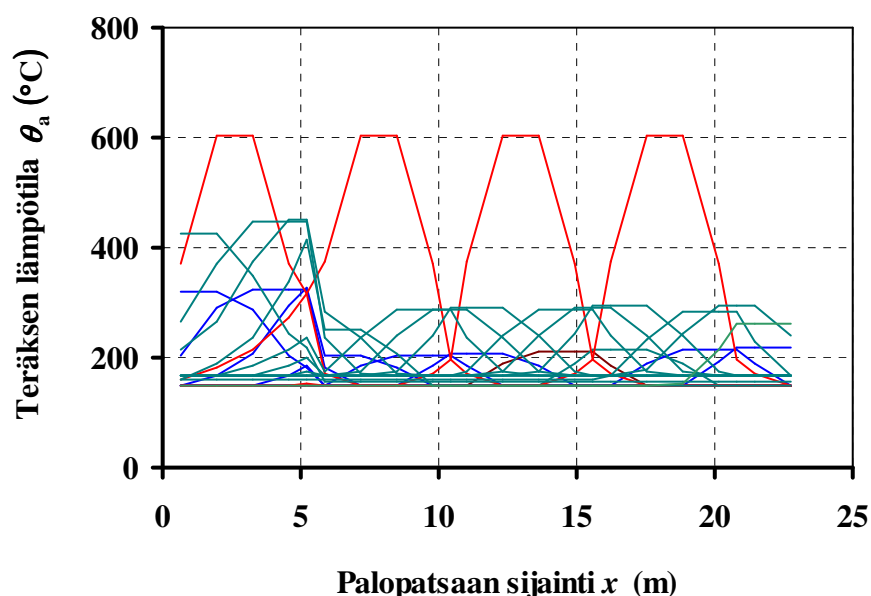
### *Laskennan tuloksia*

Kuvassa 44 esitetään esimerkki teräspuistikristikon kaikkien sauvojen lämpiämisestä paikallisessa palossa. Kuvasta 44 havaitaan, että esimerkin mitotuspalossa vain alapaarteen lämpötila nousee merkittävästi. Tämä johtuu lieskojen vaikutuksesta.



**Kuva 44. Esimerkki teräspuistikristikon sauvojen lämpiämisestä.**

Tarkasteltaessa koko ristikko paikallisessa palossa vain joidenkin terässauvojen lämpiäminen lasketaan kattosuihkumalleilla, kun suurin osa sauvoista lasketaan kaksivyöhykemallin palorasituksella. Kuvassa 45 esitetään ristikon terässauvojen lämpiäminen paikallisessa palossa, kun mitoituspalon sijaintia muutetaan ristikon pituussuunnassa.



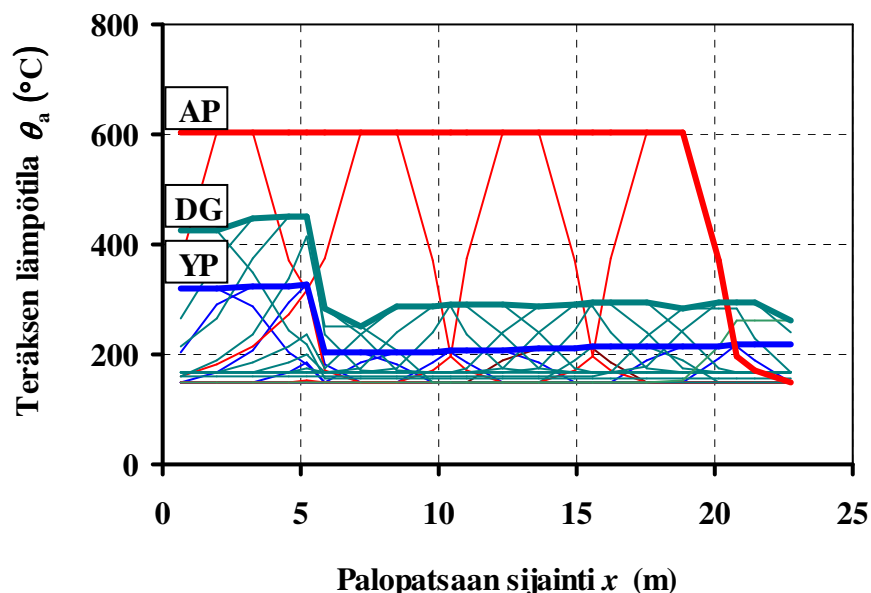
**Kuva 45. Mitoituspalon sijainnin vaikutus teräsputkien lämpiämiseen.**

Kuvassa 45 alapaarteen lämpötila esitetään punaisilla viivoilla, yläpaarteiden sinisillä ja uumasauvojen vihreällä. Kuvasta 45 voidaan havaita teräsputkiristikon sauvojen lämpiäminen esimerkin paikallisessa palossa:

- Alapaarre lämpiää palopatsaan kohdalla noin 600 °C:een.
- Yläpaarre ja uumasauvat lämpiävät palopatsaan kohdalla lähellä ulkoseinää 300...450 °C:een.
- Yläpaarre ja uumasauvat lämpiävät palopatsaan kohdalla kauempana ulkoseinästä 200...300 °C:een
- Kauempana palopatsaasta sauvojen lämpötila jää alle 200 °C:n.

Kuvassa 46 esitetään teräsputkiristikon ala- ja yläpaarteiden sekä uumasauvojen maksimilämpötilajakauma palopatsaan sijainnin funktiona. Kuvasta 45 poiketen alapaarteiden lämpötila otaksuttiin tasaiseksi. Alapaarteiden lämpötilan laskeminen

ristikon oikeassa reunassa johtuu siitä, ettei alapaarre jatku keskipilariin asti. Yläpaarteen ja uumasauvojen korkeat lämpötilat ristikon vasemmalla reunalla johtuvat Alperin kattosuihkumallin palopatsasta jäädyttävän ilmavirran häiriintymisestä.



**Kuva 46. Suojaamattoman teräsputkiristikon yläpaarteen (YP), alapaarteen (AP) ja uumasauvojen (DG) maksimilämpötila palopatsaan sijainnin funktiona.**

Jos lieskat ulottuvat palopatsaan kohdalla terässauvaan, niin Hasemin malli on määräävä. Alperin malli mitoittaa palopatsaan välittömässä läheisyydessä olevat teräsputket, joihin lieskat eivät ulotu ja kaksivyöhykemalli mitoittaa loput. Taulukossa 14 esitetään ristikon terässauvojen maksimilämpötilat, kun mitoituspalon sijaintia muutetaan ristikon pituussuunnassa. Laskelmien perusteella paikallisessa palossa ristikon alapaarre ja koko ristikon seinän puoleinen osa ovat kestävyyskannalta kriittisiä. Herkkyysanalyysissä laskelmat toistettaisiin siten, että palotehon säteilevää osuutta ja palotehon maksimiarvoa muuteltaisiin (40). Esimerkissä tarkasteltiin mitoituspaloa 22 eri paikassa, joista jokaisessa lasketaan 26 terässauvaelementin lämpiäminen kolmella eri palomallilla. Herkkyysanalyysin vaatima laskentatyömäärä olisi niin mittava, että sitä ei tehdä tässä yhteydessä.

Taulukko 14

RISTIKON TERÄSSAUVOJEN MAKSIMILÄMPÖTILAT KUORMALAVAPINOPALLOSSA

Osa	Profiili	Maksimi lämpötila $\theta_{a,max}$ °C	Käyttö- aste $\mu_0$	Käyttö- aste $\mu_{max}$	Mitoittava palomalli
YP-1a	P140×140×7,1	320	0,02	0,01	Alpert
YP-1b	P140×140×7,1	324	0,30	0,30	Alpert
YP-1c	P140×140×7,1	328	0,30	0,33	Alpert
YP-1d	P140×140×7,1	205	0,44	0,48	Alpert
YP-1e	P140×140×7,1	208	0,44	0,51	Alpert
YP-1f	P140×140×7,1	210	0,43	0,51	Alpert
YP-1g	P140×140×7,1	213	0,43	0,48	Alpert
YP-1h	P140×140×7,1	215	0,40	0,49	Alpert
YP-1i	P140×140×7,1	218	0,24	0,24	Alpert
AP-2a	P120×120×7,1	604	0,28	0,29	Hasemi
AP-2b	P120×120×7,1	604	0,28	0,59	Hasemi
AP-2c	P120×120×7,1	605	0,33	0,71	Hasemi
AP-2d	P120×120×7,1	605	0,33	0,78	Hasemi
DG-3	P100×100×6	424	0,37	0,57	Alpert
DG-6a	P70×70×4	446	0,38	0,42	Alpert
VT-7a	P60×60×4	449	0,17	0,25	Alpert
DG-5a	P100×100×4	415	0,35	0,42	Alpert
DG-7b	P60×60×4	286	0,19	0,21	Alpert
VT-7c	P60×60×4	287	0,17	0,22	Alpert
DG-7d	P60×60×4	289	0,20	0,20	Alpert
DG-6b	P70×70×4	289	0,24	0,24	Alpert
VT-7e	P60×60×4	291	0,16	0,21	Alpert
DG-7f	P60×60×4	293	0,28	0,28	Alpert
DG-4	P100×100×5	282	0,39	0,41	Alpert
VT-7g	P60×60×4	295	0,16	0,19	Alpert
DG-5b	P100×100×4	262	0,36	0,42	Alpert

## 15 JOHTOPÄÄTÖKSET

Suojaamattoman teräsputkiristikon sauvojen lämpötilat jäivät paikallisessa palossa keskimäärin erittäin alhaisiksi. Ainoastaan ristikon alapaarten lämpötila kohosi lieskojen vaikutuksesta noin 600 °C:een, mutta senkin palotilanteen käyttöaste jäi vielä kohtuullisen alhaiseksi. Esimerkin teräsputkiristikon palonkestävyyttä voitaisiinkin parantaa palosuojaamalla pelkästään ristikon alapaarre.

Paikallisessa palossa esiintyy pienellä alueella huomattavan suuria lämpötilaeroja. Kun palopatsaan välittömässä läheisyydessä terässauvat lämpiävät jonkin verran, niin hieman toisaalla sauvojen lämpötila on kohonnut vain hieman huoneenlämpötilaa korkeammaksi. Varsinkin palopatsaan lieskat kasvattavat lämpötilaeroja huomattavasti ulottuessaan rakenteisiin. Lieskan vaikutus näyttäisikin olevan mitoittava silloin, kun lieskat ulottuvat teräsosaan. Palolähteen konvektiivinen paloteho ja palopatsaan karakteristinen mitta vaikuttavat huomattavasti lieskan korkeuteen, jolloin esimerkiksi kuormalavapinopalossa samalla lavamäärällä saadaan hyvin eri korkuisia lieskoja riippuen lavojen pinoamisesta. Käytännössä tavaran varastointia ei kuitenkaan suunnitella pelkästään paloturvallisuuden suhteen, koska yleensä paloturvallisin tapa pinota tavaroita ei ole taloudellisin. Mitoituspalon sijainnilla on erittäin suuri merkitys teräsputkien lämpiämiseen. Ristikon reunalla lähellä seinää palopatsaan jäähtyminen on hitaampaa kuin vapaassa tilassa, jolloin myös kattosuihkun palokaasujen lämpötila on korkeampi kuin palopatsaan palaessa vapaasti keskellä tilaa. Myös ristikon terässauvan tarkastelupisteen erilainen valinta tuotti hyvin erilaisia keskimääräisiä lämpötiloja terässauvaan.

Teräsputkiristikon terässauvojen käyttöaste ristikon reunalla on uumasauvoilla korkea, mutta paarteilla alhainen. Paarteiden käyttöaste leikkausvoiman suhteen voi kuitenkin korkea ristikon reunalla. Terässauvojen käyttöaste ristikon keskiosassa on taas uumasauvoilla alhainen ja paarteilla korkea. Tavallisesti paikallisessa palossa suojaamattoman teräsosan mitoittava palorasitus saadaan Hasemin tai Alperin kattosuihkumallilla, jolloin kriittisin sauva on yleensä ristikon alapaarre palopatsaan kohdalla. Kaksivyöhykemallin palorasitus voi kuitenkin muodostua mitoittavaksi palotilan korkeuden kasvaessa, jolloin ristikon kuumin osa saattaa olla myös ristikon

yläpaarre tai joku uumasauva. Joten jos palo pysyy paikallisena ja savupatjan lämpötila jää alle 400 °C:n, niin staattisesti määrätyn teräspuutkiristikon palomitoituksessa näyttäisi riittävän teräspuutkien lämpiämisen laskeminen pelkästään kattosuihkumalleilla. Jotta teräspuutkiristikko voidaan mitoittaa kaikille mahdollisille mitoituspalon sijainneille, niin mitoituspalo pitäisi tarkastella jokaisen terässauvan kohdalla. Käytännön suunnittelutyöhön tämä ei sovi, koska se vaatii erittäin paljon laskentatyötä. Tähän voisi olla ratkaisuna todennäköisyyslaskentaan perustuva palomitoitusrutiini. Tällaista menetelmää onkin käsitelty mm. lähteessä (17).

Paikallisen palon mallin mitoituspalot ovat melko pitkäaikaisia, jolloin paloon kuluu huomattavan paljon aikaa. Palokunnat kuitenkin ehtivät paikalle ottamaan palon haltuun jo huomattavasti ennen palon hiipumista. Tällöin ei ole enää niin oleellista, että mitoitetaanko rakenteet kestäämään paikallista paloa koko paikallisen palokuorman palon ajan. Oleellisempaa olisi keskittyä suunnittelemaan palo-osastot siten, etteivät ne pääsisi lieskahtamaan tai edes leviämään tiettyinä aikana, jolloin palokunnalla olisi riittävästi aikaa ja paremmat mahdollisuudet rajata ja sammuttaa palo sen ollessa vielä paikallinen. Paikallinen palo tuottaa yleensä paljon savua palotilaan. Kun palotilan keskimääräinen lämpötila jää alhaiseksi, niin palotilan ikkunat eivät rikkoudu niin helposti kuin lieskahtavassa palossa. Jos palotilassa ei ole toimivaa savunpoistojärjestelmää, niin savupatjan alareuna laskeutuu hyvin nopeasti lähelle palotilan lattiaa. Tämä haittaa oleellisesti tilasta poistumista ja palokunnan toimintaa. Paikallisen palon leviämisen ja lieskahtamisen estämisen ohella paloturvallisuussuunnittelussa pitäisi keskittyä myös tehokkaaseen savunpoistoon.



**16 LÄHDELUETTELO**

- 1 Ala-Outinen T. *Ruostumattomien kantavien teräsrakenteiden palomitoitus*.
- 2 Çengel, Y. A. *Heat Transfer – A Practical Approach* (International Edition).  
WCB/McGraw-Hill, Inc., 1998. ISBN 0-07-011505-2.
- 3 Cox G. (toim.). *Combustion Fundamental of Fire*. Academic Press Limited,  
London, UK, 1995. ISBN 0-12-194230-9.
- 4 Cronvall O. *Kaksipaarretasoisten teräksisten avaruusristikoiden  
palotekninen mitoitus* (Diplomityö). Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja  
maanmittaustekniikan osasto, Espoo, 2000.
- 5 Drysdale D. *An Introduction to Fire Dynamics, 2<sup>nd</sup> Ed.* John Wiley & Sons,  
1985. ISBN 0-471-90613-1.
- 6 ECCS – Technical Committee 3 – Fire Safety of Steel Structures. *European  
Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures: Calculation of the  
Fire Resistance of Load Bearing Elements and Structural Assemblies  
Exposed to the Standard Fire*. Elsevier Scientific Publishing Company,  
Amsterdam, The Netherlands, 1983. ISBN 0-444-42120-3.
- 7 ECCS – Technical Committee 3 – Fire Safety of Steel Structures. *ECCS N<sup>o</sup>  
89, Fire Resistance of Steel Structures*. 1995.
- 8 European Committee for Standardisation (CEN), Eurocode. *Basis of  
Structural Design*. European Committee for Standardisation, Draft prEN  
1990 (Stage 34, 23.1.2001), Brussels, BE, 2001.
- 9 European Committee for Standardisation (CEN), Eurocode 1, part 1-2.  
*General Actions. Actions on Structures Exposed to Fire*. European  
Committee for Standardisation, Draft prEN 1991-1-2 (Stage 49, 10.1.2002),  
Brussels, BE, 2002.
- 10 European Committee for Standardisation (CEN), Eurocode 1, part 1-5.  
*General Actions. Thermal Actions*. European Committee for  
Standardisation, Draft prEN 1991-1-5 (Stage 34, 6.2.2002), Brussels, BE,  
2002.

- 11 European Committee for Standardisation (CEN), Eurocode 3, part 1-1. *Design of Steel Structures. General Structural Rules*. European Committee for Standardisation, prEN 1993-1-1 (25.2.2002), Brussels, BE, 2002.
- 12 European Committee for Standardisation (CEN), Eurocode 3, part 1-2. *Design of Steel Structures. General Structural Rules. Structural Fire Design*. European Committee for Standardisation, Draft prEN 1993-1-2 (X.10.2001), Brussels, BE, 2001.
- 13 European Committee for Standardisation (CEN), Eurocode 3, part 1-8. *Design of Steel Structures. Design of joints*. European Committee for Standardisation, prEN 1993-1-8 (26.2.2002), Brussels, BE, 2002.
- 14 European Steel Design Education Programme, ESDEP. *Eurooppalainen teräsrakenteiden suunnittelun koulutusohjelma*.
- 15 Hakanen V. *Poistumisturvallisuus teräsrakenteisessa teollisuushallissa* (Diplomityö). Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto, Espoo, 1999.
- 16 Hemilä S., Utriainen J. *Lämpöoppi, 2. painos*. Suomen fyysikkoseuran julkaisuja 3, Fysiikan kustannus Oy, Gummerus kirjapaino, Jyväskylä, 1991. ISBN 951-96117-2-X.
- 17 Hietaniemi J., Baroudi D., Korhonen T., Björkman J., Kokkala M. & Lappi E. *VTT tiedotteita 2123, Yksikerroksisen teollisuushallin rakenteiden palonkestävyyden vaikutus paloturvallisuuteen*. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Otamedia Oy, Espoo, 2002. ISBN 951-38-5935-5.
- 18 Hietaniemi J., Hostikka S., Lindberg L. & Kokkala M. *VTT tiedotteita 2027 Vyöhykemalliohjelman CFAST kelpoisuuden arviointi*, VTT Rakennustekniikka. Otamedia Oy, Espoo, 2000. ISBN 951-38-5664-5, ISSN 1235-0605.
- 19 Hostikka, S. *Palopatsasmallit tulipalon simuloinnissa* (Diplomityö). Teknillinen korkeakoulu, Teknillisen fysiikan ja matematiikan osasto, Espoo, 1997.
- 20 Inha T., Mattila J. *Teräsrakenteiden palosuojauksen suunnittelu*. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikan laitos, Raportti 55, Tampere, 1991. ISBN 951-721-658-0, ISSN 0358-8378.

- 21 Iso-Mustajärvi P. *Tutkimusselostus N:o 404/99/207, Teräsristikon lämpötilan nousu 30 minuutin standardipalorasituksessa*. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Palolaboratorio, Tampere, 1999.
- 22 Iso-Mustajärvi P., Inha T. *Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus*. Teräsrakenneyhdistys TRY ry., Rakennustieto Oy, Helsinki, 1999. ISBN 951-682-542-7.
- 23 Juhola M. *Teollisuusrakennusten palokuormat* (Diplomityö). Espoo, Teknillinen Korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, 1996.
- 24 Kallioniemi P. Sähköpostihaastattelu, 19.11.2002.
- 25 Keski-Rahkonen O. *Palodynamiikka* (luonnos 6, 30.9.2002), TKK:n kurssin Rak-54.511 Tulipalon dynamiikka ja simulointi opetusmoniste. Espoo, 2002.
- 26 Keski-Rahkonen O. *Rakennusten toiminnallinen palotekninen mitoitus* (luonnos 2, 3.12.2002), TKK:n kurssin Rak-54.511 Tulipalon dynamiikka ja simulointi opetusmoniste. Espoo, 2002.
- 27 Keski-Rahkonen O. *Suojaamaton teräsrakenne suuren tilan tulipalossa* (lehtiartikkeli). *Teräsrakenne*, 4/1996. s. 34-36.
- 28 Keski-Rahkonen O., Björkman J. *VTT tiedotteita 1990 Palotilastoja Suomesta ja ulkomailta toiminnallisten palosäädösten perusteiksi*, VTT Rakennustekniikka. Libella Painopalvelut Oy, Espoo, 1999. ISBN 951-38-5497-3, ISSN 1235-0605.
- 29 Kivilahti E-P. *Paperitehtaan teräsrakenteisen rakennusrungon palotekninen mitoitus* (Diplomityö). Espoo, Teknillinen Korkeakoulu, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan osasto, 1997.
- 30 Kokkala M. *VTT tiedotteita 2028, Rakennusten paloturvallisuussuunnittelu, toiminnallinen lähestymistapa*. VTT Rakennustekniikka, Espoo, 2000.
- 31 Korhonen E. *Natural Fire Modelling of Large Spaces* (Diplomityö). Espoo. Teknillinen Korkeakoulu, Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto, 2000.
- 32 Linkova P. *Palotehokäyrien aikavakioiden määrittäminen* (Diplomityö). Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Espoo, 1999.

- 33 Myllymäki J. *Teräsrakenne todellisessa palossa (TTP), Osaprojekti: Rautaruukin putkipalkkien palonkestävyyskokeet* (Tutkimusraportti Nro RTE2506/00). VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, 2000.
- 34 Narinen P. *Rakenneteräksen mekaaniset ominaisuudet palolämpötiloissa* (Diplomityö). Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Espoo, 1994.
- 35 Oletetun palonkehityksen kirja (tekeillä). 2003.
- 36 Orrainen M. *Urheiluhallin palotekninen suunnittelu* (lehtiartikkeli). *Teräsrakenne*, 2/1989. s. 22-25.
- 37 Outinen J., Kaitila O. & Mäkeläinen P. *TKK-TER-23: High-Temperature Testing of Structural Steel and Modelling of Structures at Fire Temperatures*. Espoo, 2001. ISBN 951-22-5625-8.
- 38 Paavilainen A. *Teollisuusrakennuksen palonkestoajat vaatimuksen täytyminen käytettäessä kantavana rakenteena palosuojaamatonta terästä* (Diplomityö). Espoo, Teknillinen Korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. 1996.
- 39 Packer J. A., Wardenier J., Kurobane Y., Dutta D. & Yeomans N. *Construction with Hollow Steel Sections – Design Guide for Rectangular Hollow Section (RHS) Joints Under Predominantly Static Loading / CIDECT*. Verlag TÜV Rheinland GmbH. Köln, 1992. ISBN 3-8249-0089-0.
- 40 Paloposki T., Keski-Rahkonen O. *Urheiluhallien teräsrakenteiden palotekninen suunnittelu*. Palontorjuntatekniikka 3-4/2001. Palo- ja pelastustieto ry., Helsinki. s. 75-78. ISSN 0031-0476.
- 41 Peacock R., Forney G., Reneke P., Portier R. & Jones W. *CFAST, the Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*, NIST Technical Note 1299. National Institute of Standards and Technology, NIST. U.S. Department of Commerce.
- 42 Peacock R., Reneke P., Jones W., Bukowski R. & Forney G. *A User's Guide for FAST: Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport*, Special Publication 921, 2000 Edition. National Institute of Standards and Technology, NIST. U.S. Department of Commerce, 2000.

- 43 Purkins J.A. *Fire Safety Engineering, Design of Structures*. Butterworth & Heinemann, Oxford, 1996.
- 44 *Puuhallin suunnittelu, esisuunnittelu ja arkkitehtoniset valinnat*. Wood Focus Oy, Vammalan kirjapaino Oy. ISBN 952-15-0703-9.
- 45 Rahikainen J. *Poliisiammattikorkeakoulun tutkimuksia 4/1998: Palokuolemat Suomessa vuosina 1988-97*. Oy Edita Ab, Espoo, 1998. ISBN 951-815-010-9. ISSN 1455-8262.
- 46 Rak-43.521 Paloturvallisuustekniikka, kurssin opetusmoniste, kevät 2003.
- 47 Ranby A., Inha T., Myllymäki J. *Structural Steel Fire Design*. SBI Publication 134. FCSA, NS, SBI. Tryckeri AB Småland Quebecor, 2000. ISBN 91-7127-029-9.
- 48 Rautaruukki Oyj Metform. MEF 5/98: *Rautaruukin putkipalkit EN 10219* (tuote-esite). Hämeenlinna, 1998.
- 49 Rautaruukki Oyj Steel, Huhdankoski E. *Rautaruukin teräkset ääriolosuhteissa 2000*. Otava, Keuruu, 2000. ISBN 952-5010-29-5
- 50 Rautaruukki Oyj, Vainio H. *Rautaruukin putkipalkkikäsikirja*. Otavan kirjapaino Oy, Keuruu, 2000. ISBN 952-5010-46-5.
- 51 Rondal J., Würker K-G., Dutta D., Wardenier J. & Yeomans N. *Construction with Hollow Steel Sections - Structural Stability of Hollow Sections / CIDECT*. Verlag TÜV Rheinland GmbH. Köln, 1992. ISBN 3-8249-0075-0.
- 52 Saarni R. (toim.). *Teräsrakentaminen, 3. painos*. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustieto Oy, Helsinki, 1996. ISBN 951-682-372-6.
- 53 Salonen S., Kouhi J. *Eurocode-sanasto*. 2003.
- 54 Schaumann P. *Fire Design Methods of Steel and Composite Structures* (kesäkurssi). Espoo, Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorio, 29.-30.6.2002.
- 55 *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2<sup>nd</sup> Edition*. Society of Fire Protection Engineers. National Fire Protection Association, 1995.
- 56 SFS-EN 10219-1. *Kylmämuovattut hitsatut seostamattomat rakenne- ja hienorakenneteräspankkipalkit. Osa 1: Tekniset toimitusehdot*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., Helsinki, 1998.

- 57 SFS-EN 10219-2. *Kylmämuovattut hitsatut seostamattomat rakenne- ja hienorakenneteräsputkipalkit. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet*. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry., Helsinki, 1998.
- 58 Siirilä R., Nakari P. & Viljakainen S. *Teräsrakenteiden palotekninen mitoitus*, Teräsrakenneyhdistys TRY ry. K. J. Gummerus, Jyväskylä, 1978.
- 59 Soininen R. *Ovatko kylmämuovatuista putkipalkeista valmistetut teräsrakenteet turvallisia?* (lehtiartikkeli). *Teräsrakenne*, 3/1997. s. 16-19.
- 60 Structural Steelwork Eurocodes – Development of a Trans-national Approach, SSEDTA. *A Training Package for the Teaching of Eurocode 3*.
- 61 Suojeluohje B7, *Savunpoisto*. If Vahinkovakuutusyhtiö Oy, Industrial.
- 62 Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry. RIL 135-1981, *Rakenteellinen palontorjunta*. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry., Helsinki, 1981. ISBN 951-758-023-1.
- 63 Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B. Kansallinen soveltamisasiakirja, *Eurocode 1: Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat*. Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto, Helsinki, 1995. ISBN 951-37-1751-8.
- 64 Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B7 (tekeillä). 2003.
- 65 Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa B7. *Teräsrakenteet, ohjeet 1996*. Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto, Helsinki, 1996.
- 66 Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E1. *Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet 2002*. Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto, Helsinki, 2002.
- 67 Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E1. *Rakennusten paloturvallisuus, määräykset ja ohjeet 1997*. Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto, Helsinki, 1997.
- 68 Suomen rakentamismääräyskokoelma, osa E2. *Tuotanto- ja varastorakennusten paloturvallisuus, ohjeet 1997*. Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto, Helsinki, 1997.

- 69 Teräsnormikortti N:o 13/2000. *Teräksen materiaalimallit mitoitettaessa palosuojaamattomia teräsrakenteita*. Teräsrakenneyhdistys TRY ry., Helsinki, 2000.
- 70 Teräsrakenneyhdistys TRY ry. *Hitsatut profiilit – käsikirja*. Otavan kirjapaino Oy, Keuruu, 2000. ISBN 952-9683-01-4.
- 71 Tillander K., Keski-Rahkonen O. *VTT tiedotteita 2119, Rakennusten syttymistapaajuudet PRONTO-tietokannasta 1996-1999*. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo, 2001.
- 72 Tillander K., Lindblom T. & Keski-Rahkonen O. *VTT Tiedotteita 2159, Taloudelliset vahingot rakennuspaloissa*, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Otamedia Oy, Espoo, 2002.
- 73 Twilt L., Klingsch W., Edwards M. & Dutta D. *Construction with Hollow Steel Sections – Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire / CIDECT*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1994. ISBN 3-8249-0171-4.
- 74 Wardenier J. *Hollow Sections In Structural Applications*. Rotterdam, Bouwen met Staal, 2002. ISBN 90-72830-39-3.
- 75 Vesander A. *Teräsristikoiden rakenteellinen toiminta ja kantokyky palo-olosuhteissa* (Diplomityö). Espoo, Teknillinen Korkeakoulu, Maanmittaus- ja rakennustekniikan osasto, 1987.
- 76 Winrami v3.0: *Putkipalkki- ja hitsattujen rakenteiden mitoitusohjelma, käyttöohje*. Rautaruukki Oyj, 2002.
- 77 Witting K. *Putkipalkkiristikoiden mitoitus*. Rakentajain kalenteri 2002, s. 589-594.
- 78 Witting K. Keskustelut välillä 13.4.2002-13.8.2003.