

## TULIPALONALAISTEN TERÄSPILARIEN KANTOKYVYN ARVIOIMINEN

Pentti Mäkeläinen

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 14  
No. 4 1981 s. 12...30

**YHTEENVETO:** Tämä artikkeli pyrkii selvittämään tulipalo-olosuhteita vastaavissa lämpötiloissa olevien teräspilarien kantokyvyn analysointia. Tarkastelujen lähtökohtana on rakenneteräksen jännitys-muodonmuutoskäyttäytymisen lämpötilariippuvuus, mikä on esitetty yleiseurooppalaisen teräsrakennealan yhteistyöjärjestön ECCS (European Convention for Constructional Steelwork) nk. palokomitean laajojen kansainvälisten tutkimusten tuloksiin nojaavan ehdotuksen mukaisena. Teräspilarien nurjahdustarkastelun perustaksi on esitetty niinikään ECCS:n laajan tutkimus- ja kehitystoiminnan piirissä syntynyt nykyaikainen teräspilarien kantokyvyn analysointimenetelmä. Tämän menetelmän soveltamista tulipalolämpötiloissa olevien teräspilarien nurjahdustarkasteluun on selvitetty ECCS:ssä valmistumassa olevien yleiseurooppalaisien teräsrakenteiden palomitoitusohjeiden mukaisesti.

### JOHDANTO

Teräsrakenteiden suunnittelussa tulee usein esiin kysymys teräspilarin kantokyvystä tulipalo-olosuhteissa. Tulipalonalaiden teräspilarien nurjahdustarkastelu onkin täten keskeinen kohta teräsrakenteiden palotekniseen suunnitteluun kuuluvassa ns. palomitoituksessa, jossa on siirrytty viime vuosina yhä enenevässä määrin analyttisiin menetelmiin tulipalovaaralle alttiiksi joutuvien teräsrakenteiden palonkestävyyden arvioinnissa. Tämä kehitys on seurausta yleiseurooppalaisen teräsrakennealan yhteistyöjärjestön ECCS (European Convention for Constructional Steelwork) nk. palokomiteassa (Committee T3-Fire Safety of Steel Structures) yli 15 vuoden aikana tehdystä mittavasta tutkimus- ja kehitystyöstä, minkä tiivistettynä tulokseina ovat pian lopullisesti valmistumassa olevat yleiseurooppalaiset tulipalonalaiden teräsrakenteiden laskenta- ja mitoitussuosituks [1]. Näissä palomitoitusohjeissa teräspilarien nurjahdustarkastelu tulipalo-olosuhteissa pohjautuu toisaalta pilarin materiaalin, rakenneteräksen, todelliseen mekaanisten ominaisuuksien lämpötilariippuvuuksiin ilmaistuun käyttäytymiseen ja toisaalta nykyaikaisin rakenteiden analysointimenetelmin toteutettuun pilarin todellisia olosuhteita vastaavan toiminnan analysointiin. Tällöin nurjahdustarkastelujen peruslähtökohtana on teräspilareilla käytännössä esiintyvä jonkinasteinen geometrinen epätäydellisyys, alkukäyryys tai kuorman epäkeskisyys sekä teräspoikkileikkauksessa vallitsevat jäännösjännitykset. Tämä merkitsee puolestaan sitä, että nurjahdustarkastelu suoritetaan pilarin suurimman reunajännityksen kriittisen, myötörajaa vastaavan, arvon perusteella eli siis itse asiassa jännitystarkasteluna. Kaiken kaikkiaan

tämä vastaa teräspilarien mitoituksessa viime vuosina omaksuttua kansainvälistä käytäntöä.

Seuraavassa esityksessä pyritään selvittämään tulipalonalaiden teräspilarien kantokyvyn arvioimisperusteita ja erityisesti teräspilarien nurjahdusta tulipalolämpötiloissa. Esityksen taustana on ECCS:n eri komiteoissa (varsinkin T3 - Fire Safety ja T8 - Structural Stability) tehdyistä laajoista tutkimus- ja selvitystöistä julkaistu kirjallinen aineisto.

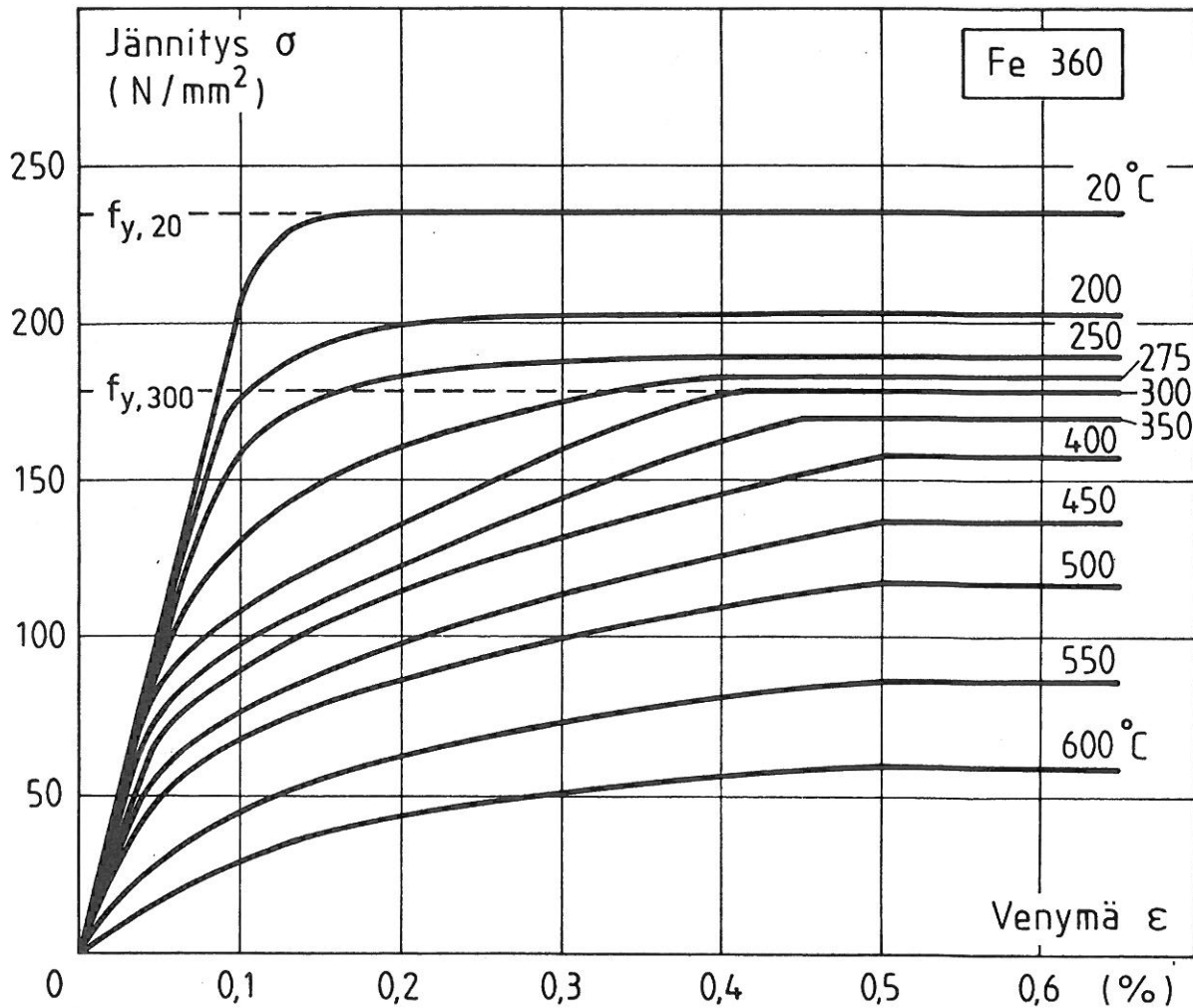
#### RAKENNETERÄKSEN MEKAANISTEN OMINAISUUKSIEN LÄMPÖTILARIIPPUVUUS

Aksiaalisiä kuormia kantavien teräspilarien kantokyky tulipalo-olosuhteita vastaavissa lämpötiloissa riippuu ratkaisevasti teräksen mekaanisten ominaisuuksien muuttumisesta korkeissa lämpötiloissa. Rakenneteräksen mekaanisia ominaisuuksia voidaan pitää käytännöllisesti katsoen lämpötilasta riippumattomina normaaleissa huoneen- ja ulkoilman lämpötiloissa. Rakenneteräksen jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen on teräksen käyttötiloja vastaavissa kuormitusolosuhteissa lämpötiloihin 300-400 °C asti ajasta ja lämpötilasta suoranaisesti (eksplisiittisesti) riippumaton. Tämä tarkoittaa toisin sanoen sitä, että rakenneteräkselle standardivetokokeilla eri vakio- lämpötiloissa määritetyt jännitys-venymäkäyrät ovat alle 300-400 °C lämpötiloissa yksikäsitteisiä eivätkä sisällä ajasta riippuvaa virumismuodonmuutosta tai nk. termisen aktivoitumisen kautta syntyneitä plastista muodonmuutosta. Yli 400 °C:n lämpötiloissa vetojännityksen alaisen rakenneteräksen viruminen ja termisen aktivoitumisen seurauksena syntyvä plastinen virtaus on jo niin merkittävää, että jännitys-venymäyhteyden yksikäsitteinen määrittäminen ei ole mahdollista ilman ajan vaikutuksen huomioonottamista kuormitus- ja lämpötilahistorian avulla.

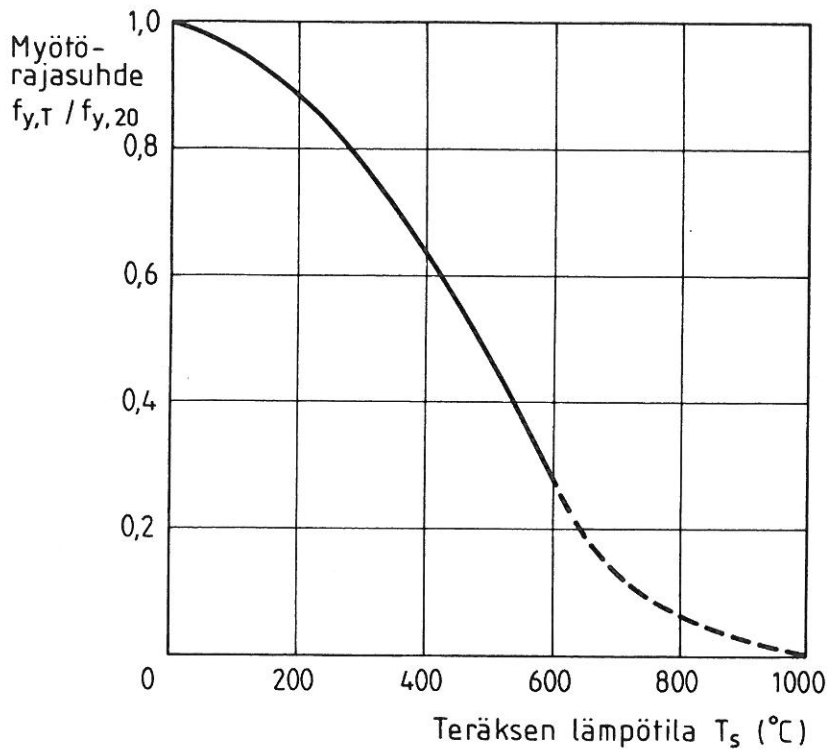
Rakenneteräksen korkeita lämpötiloja vastaavien jännitys-venymäkäyrien määrittäminen edellyttää siis koesauvan vetojännityksen ja lämpötilan historian eli niiden aikariippuvuuden huomioonottamista koetuloksissa. Tämä voidaan periaatteessa tehdä soveltamalla korkeissa lämpötiloissa tapahtuvan teräksen virumisen kuvaamiseen ns. aika-lämpötilasuperpositioperiaatetta. Ajan ja lämpötilan yhteisvaikutus teräksen virumisprosessissa otetaan tällöin huomioon siten, että todellinen aika korvataan lämpötilan vaikutuksen sisältävällä nk. redusoidulla aikamuuttujalla. Tällaisen menettelyn soveltaminen on käytännössä liian monimutkaista, ja niinpä rakenneteräksen jännitys-venymäkäyrät korkeissa lämpötiloissa joudutaan määrittämään yksinkertaistetulla, käytännön suunnittelua ja mitoitusta varten riittävän tarkalla likimääräistarkastelulla. Tämä tarkastelu perustuu laajoihin rakenneteräkselle tehtyihin virumiskokeisiin [2] erilaisilla lämpötilan nousunopeuksilla. Näiden kokeiden tulosten perusteella on todettu, että rakenneteräksen jännitys-venymäyhteyttä voidaan pitää käytännössä aina 600 °C:een saakka riippumattomana lämpötilan muuttumisnopeudesta (tulipalotilanteita vastaa-

vien muuttumisnopeuksien alueella) ja virumisen vaikutus voidaan sisällyttää implisiittisesti rakenneteräksen jännitys-venymäkäyriin lämpötila-alueella 400-600 °C.

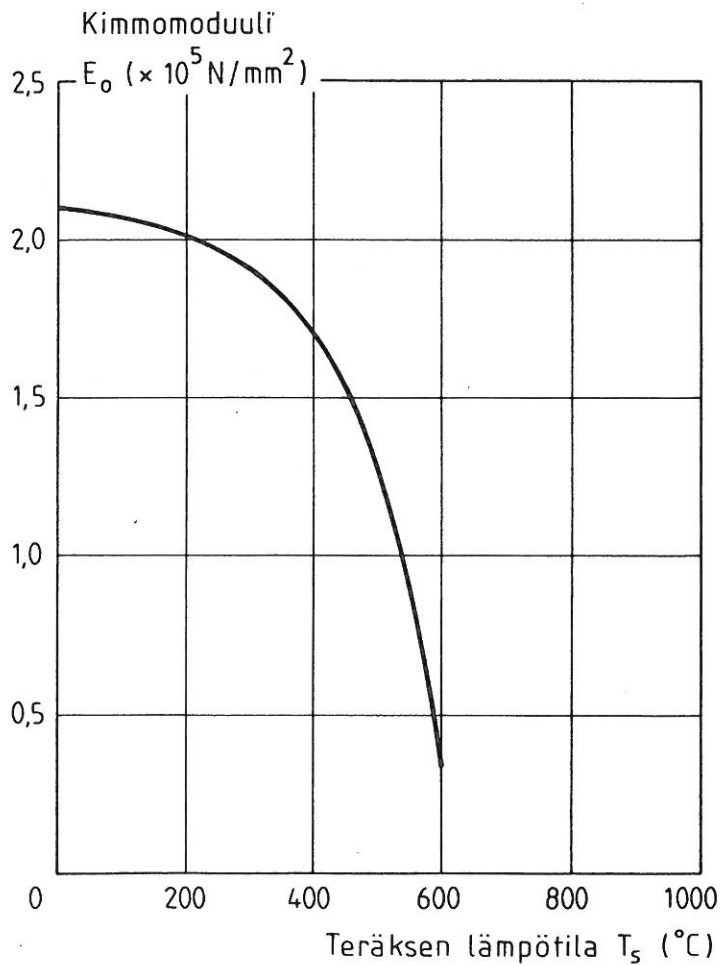
Rakenneterästen jännitys-venymäkäyrien määrittelyä eri lämpötiloissa huoneenlämpötilan 20 °C:sta 600 °C:een saakka tarkastelujen perustaksi on valittu teräslaatu Fe 360 (huoneenlämpötilan myötöraja  $f_{y,20} = 235 \text{ N/mm}^2$ ). Sille on saatu kokeellisesti kuvassa 1 esitetyt jännitys-venymäkäyrät lämpötila-alueella 20-600 °C. Käyrien kaarevat osat on lopetettu nk. efektiivisen myötörajän ilmaisevan jännitystason kohdalle, minkä jälkeen käyrien loppuosat on korvattu vaakasuorilla viivoilla. Tämän nk. efektiivisen myötörajän kohta on määritetty eri lämpötiloissa aiemmin mainittujen virumisko-keiden tulosten perusteella teräksen termistä aktivoitumista vastaavan plas-tisen muodonmuutoksen alkamiskohdasta. Kuvassa 2 on esitetty lämpötilaa  $T$  (°C) vastaavan efektiivisen myötörajän  $f_{y,T}$  ja huoneenlämpötilan myötö-rajän  $f_{y,20}$  suhde  $f_{y,T}/f_{y,20}$  teräslämpötilan  $T_s$  funktiona. Myötöra-ajan lämpötilariippuvuudelle on löydetty välillä  $0 \text{ °C} \leq T_s \leq 600 \text{ °C}$  seuraava analyyttinen lausekemuoto:



Kuva 1. Rakenneteräksen Fe 360 jännitys-venymäkäyrät korkeissa lämpötiloissa.



Kuva 2. Rakenneterästen myötörajan lämpötilariippuvuus.



Kuva 3. Rakenneterästen kimmomoduulin lämpötilariippuvuus.

$$f_{y,T}/f_{y,20} = 1 + \frac{T_s(^{\circ}\text{C})/767(^{\circ}\text{C})}{\ln[T_s(^{\circ}\text{C})/1750(^{\circ}\text{C})]} \quad (1)$$

Teräslaaduille Fe 310 ( $f_{y,20} = 175 \text{ N/mm}^2$ ), Fe 430 ( $f_{y,20} = 275 \text{ N/mm}^2$ ) ja Fe 510 ( $f_{y,20} = 355 \text{ N/mm}^2$ ) jännitys-venymäkäyrät muodostetaan yksinkertaisesti muuntamalla Fe 360:n peruskäyrät kullekin teräslaadulle huoneenlämpötilan myötöraja-arvojen suhteessa affiinisiksi käyräparviksi, jolloin kaikille rakenneteräslaaduille otaksutaan pätevän kaavamuoto (1). Lisäksi kaikilla teräslaaduilla otaksutaan olevan lämpötilassa  $20^{\circ}\text{C}$  sama kimmomoduulin  $E_0 (= E_0(20^{\circ}\text{C}))$  arvo eli huoneenlämpötilan jännitys-venymäkäyrillä on kaikilla sama kaltevuus origossa. Rakenneterästen kimmomoduulin  $E_0$  riippuvuus teräslämpötilasta  $T_s$  on kuvan 3 laskevan käyrän mukainen. Se voidaan esittää lämpötila-alueella  $0 \leq T_s \leq 600^{\circ}\text{C}$  kaavalla

$$E_0(T_s) = E_0(20^{\circ}\text{C})[1 + 15.9 \times 10^{-5}T_s - 34.5 \times 10^{-7}T_s^2 + 11.8 \times 10^{-9}T_s^3 - 17.2 \times 10^{-12}T_s^4] \text{ (N/mm}^2\text{)}, \quad (2)$$

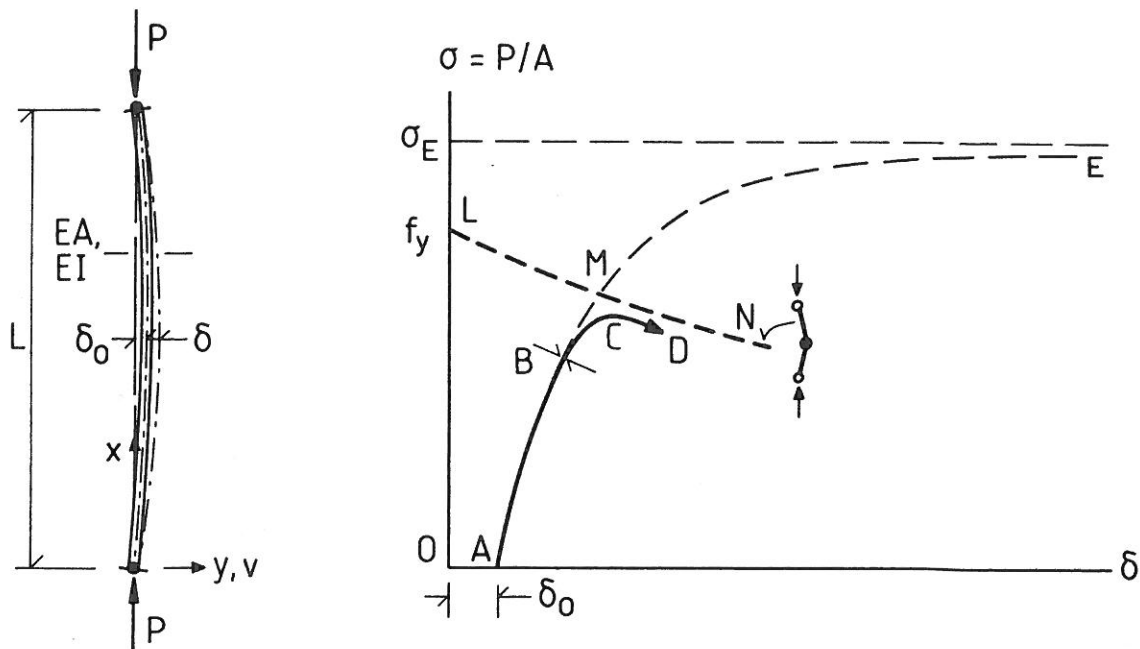
missä huoneenlämpötilan kimmomoduulilla  $E_0(20^{\circ}\text{C})$  on arvo  $2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ . Yli  $600^{\circ}\text{C}$ :n lämpötiloissa rakenneteräksen kimmomoduulin yksikäsitteinen määrittäminen ei ole enää mahdollista virumis- ja virtausilmiöiden takia.

#### TERÄSPILARIN NURJAHDUSTARKASTELU NYKYAIKAISESSA MITOITUKSESSA

Teräspilarien nurjahdustarkastelua ja sen periaatteita nykykäytännön mukaisessa mitoituksessa voidaan selvittää parhaiten lähtemällä liikkeelle kuvan 4 mukaisesta perustilanteesta, missä keskisellä kuormalla (P) aksiaalisesti kuormitetussa teräspilarissa on valmistustoleranssirajojen sallima alkukäyryys. Tämä alkukäyryys voidaan aina esittää kaikissa tapauksissa Fourierin sarjakehitelmän avulla, jolloin teräspilarin poikkileikkausten painopisteiden alkupoikkeamaa puristavien kuormien vaikutussuorasta (x-akselista) ilmaisevalle alkutaipumalle  $v_0(x)$  pätee kaava

$$v_0(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \delta_{0i} \sin \frac{i\pi x}{L}, \quad (3)$$

missä kertoimet  $\delta_{0i}$  ovat tunnettuja tai mittausten avulla määritettäviä amplitudeja. Kun teräspilarin päissä vaikuttavaa keskistä puristusvoimaa P kasvatetaan tasaisesti nolasta lähtien, pilarin taipuma  $v(x)$  kasvaa ja samalla myös pilarin poikkileikkauksiin kohdistuva taivutusmomentti  $M(x) = Pv(x)$ . Tämä on taas puolestaan suoraan verrannollinen pilarin käyryyden muutokseen  $\kappa(x) - \kappa_0(x) = -(v_0''(x))$  kuormittamattomaan alkutilaan nähden



Kuva 4. Keskisesti puristetun teräspilarin kuorma-siirtymäyhteydet

seuraavan tunnetun kaavan mukaisesti

$$M(x) = Pv(x) = -EI(v''(x) - v_0''(x)). \quad (4)$$

Kuormitetun pilarin taipuma  $v(x)$  voidaan myös esittää yleisesti kaavaa (3) vastaavalla Fourierin sarjakehitelmällä

$$v(x) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{v}_i \sin \frac{i\pi x}{L}. \quad (5)$$

Sijoittamalla tämä sarjakehitelmä yhdessä kaavan (3) kanssa yhtälöön (4) kertoimien  $\bar{v}_i$  ja  $\delta_{0i}$  väliseksi yhteydeksi saadaan

$$\bar{v}_i = \frac{\delta_{0i}}{1 - P L^2 / i^2 \pi^2 EI} = \frac{\delta_{0i}}{1 - P/P_i}; \quad P_i = i^2 \pi^2 EI / L^2. \quad (6)$$

Tarkasteltaessa tilannetta, missä kuormaa  $P$  kasvatetaan tasaisesti nollassa lähtien, kuorman arvon lähestyessä ensimmäistä ( $i = 1$ ) kriittistä arvoansa  $P_1 = \pi^2 EI / L^2 = P_E$  pilarin vastaava taipuman 1. ominaismuoto (sini-aallon puolikas) kasvaa amplitudiltaan hyvin voimakkaasti muiden ominaismuotojen jäädessä amplitudeiltaan merkityksettömiksi. Näin ollen puristavan kuorman  $P$  ollessa lähellä nk. Euler-kuormaa  $P_E$  teräspilarin taipuma  $v(x)$  voidaan kirjoittaa muotoon

$$v(x) = \frac{\delta_0}{1 - P/P_E} \sin \frac{\pi x}{L} = \delta \sin \frac{\pi x}{L}, \quad (7)$$

missä  $\delta_0$  ja  $\delta$  ovat kuormittamattoman ja kuormitetun teräspilarin keski-kohdan taipumia.

Kuvan 4 diagrammiin on hahmoteltu alkuaan käyrän, päistään keskisesti pu-

ristetun teräspilarin poikkileikkauksessa (pinta-ala  $A$ ) vallitsevan keskimääräisen puristusjännityksen  $\sigma = P/A$  ja pilarin keskikohdan taipuman  $\delta$  välistä riippuvuutta. Puristavan kuorman  $P$  lähtiessä kasvamaan nolosta taipuma  $\delta$  kasvaa alkutaipumasta  $\delta_0$  lähtien aluksi lineaarisesti kasvun "alkunopeuden" (kasvusuoran kulmakertoimen) ollessa  $P_E/\delta_0$  pisteessä  $A$ .  $P$ :n kasvaessa edelleen taipuneessa teräspilarissa, jonka aineen jännitysvenyämyhteys on kuvan 1 huoneenlämpötilan ( $20^\circ\text{C}$ ) käyrän mukainen, koveralla puolella keskikohdan poikkileikkauksen reunajännitys lähestyy vähitellen myötörajan ( $f_{y,20}$ ) arvoa. Pisteessä  $B$  reunajännitys  $\sigma_{\max}$  on saavuttanut myötörajan, jolloin siis pätee yhtälö

$$\sigma_{\max} = \frac{P}{A} + \frac{P\delta}{W} = \frac{P}{A} + P \frac{\delta_0}{1 - P/P_E} \cdot \frac{h}{I} = \sigma \left( 1 + \frac{1}{1 - \sigma/\sigma_E} \cdot \frac{\delta_0 h}{i^2} \right). \quad (8)$$

Kaavassa (8)  $h$  on poikkileikkauksen reunan etäisyys neutraaliakselista pilarin koveralla puolella ja  $i$  ( $= \sqrt{I/A}$ ) poikkileikkauksen jäyhyyssäde. Kuorman  $P$  kasvaessa edelleen taipuma  $\delta$  alkaa kasvaa voimakkaasti plastisoitumisen levitessä pilarin keskikohdan poikkileikkauksissa keskelle kohti neutraaliakselia. Tämä kasvu huipentuu nopeasti nk. rajapisteen  $C$  kohdalla, missä kuorma-siirtymäkäyrä saavuttaa huippukohtansa. Tämän jälkeen pilarin keskikohdan taipuman ja keskimääräisen puristusjännityksen välistä yhteyttä kuvaa jyrkästi laskeva käyränosa  $CD$ .

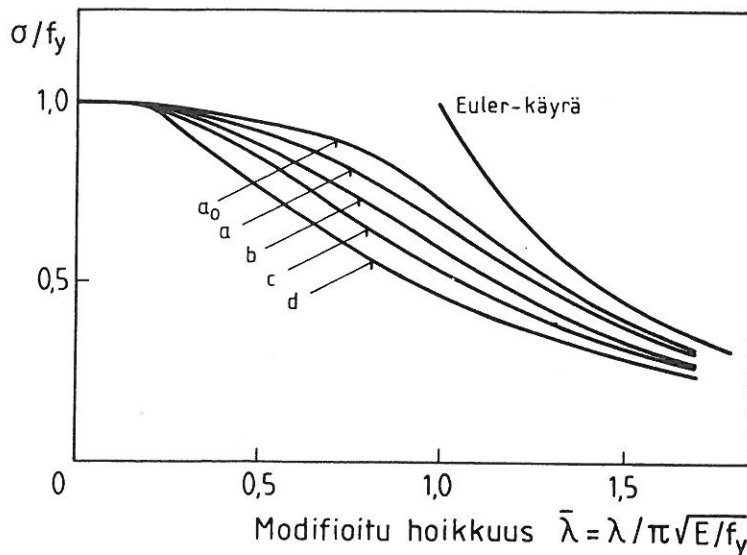
Kuvaan 4 on piirretty alkuaan käyrän pilarin kuorman  $P$  ja keskikohdan taipuman  $\delta$  välinen yhteys myös kahdessa äärimmäisen idealisoidussa tilanteessa. Käyrä  $ABME$  vastaa pilarin käyttäytymistä, kun pilarin aine noudattaa rajatta ideaalista kimmoisuutta. Kuorma-siirtymäkäyrän asymptoottina on tällöin hypoteettista Euler-nurjahdusta vastaava rajasuora  $P = P_E$  (tai  $\sigma = \sigma_E = \pi^2 EI/AL^2 = \pi^2 E i^2/L^2 = \pi^2 E/\lambda^2$ ). Oletettaessa pilarin aine jäykäksi ideaaliplastiseksi kuorma-siirtymäkäyräksi saadaan hieman alaspäin kaareutuva laskeva käyrä  $LMN$ . Piste  $L$  vastaa tällöin pilarin keskikohdalle muodostuvan myötönivelen syntymishetkeä, minkä jälkeen pilari toimii mekaniismina käyrän  $LMN$  ilmaisemalla tavalla. Käyrän kohtaa  $M$ , missä kahta ääri-idealisoitua vastaavat pilarin kuorma-siirtymäkäyrät leikkaavat toisensa, voidaan pitää mitoituksen kannalta teräspilarin kantokyvyn "saavuttamattomana" ylärajana. Teräspilarin kantokyvyn alarajana voidaan pitää mitoituksessa todellisen kuorma-siirtymäkäyrän pistettä  $B$ , missä taipuneen pilarin poikkileikkauksen reunajännitys saavuttaa myötörajan arvon ensimmäisen kerran keskikohdan koveraksi taipuneella puolella. Tätä tilannetta vastaava teräspilarin keskimääräinen jännitys  $\sigma$  voidaan ratkaista merkittävällä yhtälössä (8) reunajännitys  $\sigma_{\max}$  yhtä suureksi kuin myötöraja  $f_y$  ( $= f_{y,20}$ ). Tällöin saadaan toisen asteen yhtälö  $\sigma$ :n suhteen, ja tämän yhtälön ratkaisu (ns. Perry-Robertsonin kaava) on

$$\sigma = \frac{(1+\eta)\sigma_E + f_y}{2} - \sqrt{\left[\frac{(1+\eta)\sigma_E + f_y}{2}\right]^2 - \sigma_E f_y} . \quad (9)$$

Kaavassa (9) esiintyvä dimensioton parametri  $\eta = \delta_0 h/i^2$  kuvaa teräspilarin geometrian epätäydellisyyttä. Se voidaan periaatteessa määrittää todellisen teräspilarin mittauksilla. Myötörajan  $f_y$  ollessa materiaalivakio kaava (9) määrittelee silloin  $\sigma$ :n ratkaisun yksinomaan hoikkuudesta  $\lambda = L/i$  riippuvana, koska  $\lambda$  sisältyy Euler-jännityksen  $\sigma_E$  lausekkeeseen  $\sigma_E = \pi^2 E/\lambda^2$ .

Teräspilarien mitoituksessa kaavamuotoa (9) käytetään niin, että paramet-  
rille  $\eta$  pyritään löytämään sellainen sopiva arvo, jolla todelliset teräs-  
pilarien nurjahduskokeiden tulokset saadaan mahdollisimman hyvin yhtymään  
kaavan (9) esittämään  $\sigma$ - $\lambda$ -käyrään. Poikkileikkauksiltaan yhdenmuotoisille  
teräspilareille, joiden alkutaipuma  $\delta_0$  on suoraan verrannollinen pilarin  
pituuteen,  $\eta$ :n arvo on suoraan hoikkuuteen  $\lambda = L/i$  verrannollinen, ja ko-  
keellisissa vertailuissa sen on havaittu vaihtelevan välillä  $\eta = 0.001\lambda \dots$   
 $0.003\lambda$ . Yleiseurooppalaisissa teräsrakenteiden mitoitusohjeissa [3] teräs-  
pilarien nurjahdustarkastelu perustuu kaavamuodon (9) hyväksikäyttöön yhdes-  
sä kokeellisen tutkimusaineiston kanssa (yhteensä 1067 erilaisilla täysimit-  
taisilla teräspilareilla seitsemässä eri Euroopan maassa tehtyjen nurjahdus-  
kokeiden aineisto). Poikkileikkauksiltaan erityyppisten teräspilarien puo-  
likokeellisissa nurjahdustarkasteluissa lähtökohdaksi on otettu pilarin kes-  
kikohdan alkutaipuma  $\delta_0 = L/1000$  yhdessä teräspoikkileikkauksessa valmistuk-  
likokeellisissa nurjahdustarkasteluissa lähtökohdaksi on otettu valmistuk-  
sesta (muokkauksesta) peräisin olevan parabolisen jäännösjännitysjakautuman  
kanssa. Suhteellisen lyhyiden,  $\lambda$ -arvoltaan alle noin 20 ( $\lambda < 20$ ) olevien  
teräspilarien tarkastelussa on päädytty lisäksi koetulosten pohjalta siihen,  
että  $\sigma$ - $\lambda$ -käyrä on käytännössä pienien hoikkuuksien alueella ( $0 < \lambda < 20$ )  
vaakasuora  $\sigma = f_y$  ts. tällöin pilari on niin "paksu", että sen puristuksen  
alainen poikkileikkaus ehtii täysin plastisoitua ennen rajakuormitustilan-  
netta. Yleiseurooppalaisissa ECCS:n teräsrakenteiden mitoitusohjeissa [3]  
teräspilarien nurjahduskäyrät on esitetty kuvan 5 mukaisesti dimensiottomien  
muuttujien  $\sigma/f_y$  ja  $\bar{\lambda} = \lambda/\pi\sqrt{E/f_y}$  avulla otaksumalla parametrille  $\eta$  muo-  
to  $\eta = 0.001\alpha(\bar{\lambda} - 0.2)$ . Kerroimen  $\alpha$  erilaisilla arvoilla erityyppisten  
teräspilarien koetulokset on sovitettu kolmeksi peruskäyräksi a, b ja c  
niin, että  $\alpha = 0.206$  pätee a-käyrälle,  $\alpha = 0.339$  b-käyrälle ja  $\alpha = 0.489$   
c-käyrälle. Peruskäyrät a, b ja c vastaavat kukin erilaisia teräspoikki-  
leikkaustyyppejä huomioonotettuna myös samalla teräsprofiilin valmistusta-  
vasta aiheutuvien jäännösjännitysjakautumien vaikutukset. Esimerkiksi käy-  
rä c vastaa tyypillisimmillään kuumavalssatun leveälapaisen I-profiilin  
nurjahdusta heikomman pääkselin suunnassa parabolisten jäännösjännitysja-  
kautumien arvojen ollessa  $0.5f_y$  (puristusta) laipan kärjissä ja  $0.4f_y$   
(vetoa) uuman ja laipan yhtymäkohdassa. Peruskäyrien yläpuolelle sijoittu-  
va lisäkäyrä  $a_0$  on tarkoitettu käytettäväksi lämpökäsitellyille korkean





Kuva 5. ECCS:n teräspilarien nurjahduskäyrät.

lujuuden ( $f_y > 430 \text{ N/mm}^2$ ) omaaville teräsprofiileille, joilla jäännösjännitysten suhteellinen osuus on vähäinen. Kuvassa 5 alimpana oleva lisäkäyrä d on tarkoitettu erityisen suurilla ( $> 40 \text{ mm}$ ) seinämänpaksuuksia omaaville teräsprofiileille.

Edellä esitettyssä teräspilarien nurjahdustarkastelussa pilarin päiden erilaisia kiinnitys- ja rajoite-ehtoja ei ole otettu vielä huomioon, vaan pilarin päihin on otaksuttu ideaaliset kitkattomat nivelet. Todellisissa teräspilareissa päiden kiinnityshedot vaihtelevat monella eri tavalla pilarin molemmissa päissä, ja useimmiten päiden kiinnitykset ovat sellaisia, että ne eivät vastaa täysin kumpaakaan ideaalista ääritapausta - niveltä tai täysin jäykkää kiinnitystä - vaan tapausta näiden väliltä. Mitoituksessa on siis pystyttävä arvioimaan erilaiset päiden kiinnityshedot omaavalle teräspilarille nk. efektiivinen pituus  $L_k = kL$  (eli pilarin ns. redusoitu nurjahduspituus). Tämä määrittelee todelliselle teräspilarille sellaisen redusoidun pituuden, jolla ekvivalenttinen nivelpäinen teräspilari nurjahtaa samalla kriittisen kuorman arvolla kuin todellinen mitoitetettava teräspilari. Teräspilarin päiden ideaalisten kiinnitysheitojen neljän peruskombinaation tapauksessa efektiivisten pituuksien teoreettiset arvot ovat yleisesti tunnetut. Mitoituksessa näitä teoreettisia arvoja joudutaan kuitenkin monessa tapauksessa arvioimaan uudelleen teräspilarin päiden kiinnityksen poiketesä käytännössä idealisoiduista kiinnitysohaksumista. Esimerkiksi molemmista päistään täysin jäykästi kiinnitetyn pilarin teoreettista efektiivisen pituuden kerrointa  $k = 0.5$  ei voida käytännössä soveltaa, vaan tavallisesti arvo  $k = 0.7$  vastaa mitoitusohjeiden mukaan todellisia tilanteita. Toisesta päästään jäykästi ja toisesta nivelisesti kiinnitetyn teräspilarin teoreettista kerroinarvoa  $k = 0.7$  ei niinkään voi soveltaa mitoituksessa, vaan sitä on korotettava 15-20 % ts. arvoihin  $k = 0.80 \dots 0.85$ . Teräspilarien päiden kiinnitys- tai rajoite-ehtojen tarkastelussa tulee lisäksi

usein esille tapaus, missä pilarin pää on ns. kimmoisesti kiinnitetty, toisin sanoen pilarin pään kiertymistä vastustaa kimmoisen kiertojousen lailla toimiva rajoite. Tällainen tilanne on tavallinen teräspilarin pään ja vaakapalkin välisessä liitoksessa. Kitka- tai hitsiliitoksena toteutettu kiinnitys sinänsä toimii yleensä liitososien kiertymiseen nähden lähes "jäykkänä". Sen sijaan itse vaakapalkin toimintaa pilarin pään kiertymisen rajoittajana kuvaa äärellisen jousivakion arvon omaava kiertojousi, jäykienkin vaakapalkkien ollessa kyseessä. Tämän kiertojousivakion määrittämisen jälkeen teräspilarille saadaan nurjahdusanalyysin tuloksena efektiivinen pituus  $L_k$  ja siitä edelleen nurjahduskäyrästä vaaka-akselilta vallittavan dimensiottoman hoikkuuden  $\bar{\lambda}$  ( $= L_k / \pi \sqrt{EI / f_y A}$ ) arvo. Tätä arvoa vastaavan  $\sigma / f_y$ -arvon perusteella teräspilarin kantokyky tarkistetaan mitoituksessa niin, että kuormakertoimella (tavallisimmin noin 1.7) kerrottu pilarin karakteristinen kuorma suunnittelukuormituksena antaa teräspilarin poikkileikkauksen keskimääräisen jännityksen ja myötörajan suhteeksi korkeintaan nurjahduskäyrältä luetun arvon.

#### AKSIAALISESTI KUORMITETUN TERÄSPILARIN NURJAHDUS TULIPALOLÄMPÖTILOISSA

Tulipalolämpötilojen alaisena olevan teräspilarin toiminnan ja kantokyvyn tarkka arvioiminen on yleisessä tapauksessa hyvin monimutkainen tehtävä. Teräspilarin nurjahduksen analysointi hyvin nopeasti kohoavien (ja vaihtelevien) lämpötilojen aikana edellyttää sekä pilarin geometrian että varsinkin pilarin materiaalin, rakenneteräksen, mekaanisten ominaisuuksien lämpötilariippuvuuksien tarkkaa tuntemista. Tämän lisäksi on tiedettävä, kuten teräspilarin normaalissa nurjahdustarkastelussakin, teräsprofiilissa alkuaan vallitsevat jäännösjännitykset ja niiden jakaantuminen. Tulipalolämpötilojen ollessa kyseessä lisäksi olisi tiedettävä siis myös, miten nämä jäännösjännitykset muuttuvat lämpötilan nousun aikana! Todellisissa tulipalo-olosuhteissa olevan teräspilarin tarkassa analysoinnissa on otettava huomioon myös pilariin sen pituus- ja poikkisuunnassa syntyvien lämpötilajakautumien vaikutus nurjahdukseen. Teräspilarin poikkileikkauksessa ja/tai aksiaalisessa suunnassa syntyvät lämpötilagradientit nimittäin vaikuttavat voimakkaasti nurjahduserkkyyteen, ja epäedullisesti teräspilariin sijoittuessaan lämpötilagradientti saattaa tulla merkittävimmäksi pilarin stabiiliuden menetykseen johtavista tekijöistä tulipalon aikana. Teräspilarin päiden tuenta- ja rajoite-ehdoilla on niinikään merkittävä vaikutus nurjahduserkkyyteen korkeissa lämpötiloissa. Tämä tulee erityisen selvästi esille teräspilarin päiden aksiaalisen muodonmuutoksen ollessa kokonaan tai osittain estetty tai rajoitettu lämpötilan nousun aikana. Tällöin teräspilariin syntyy sen lämpöpitenemisestä lämpötilan nousun mukana jatkuvasti kasvava aksiaalinen lisäpuristus, joka voi aiheuttaa pilarin nurjah-

duksen jo lämpötilan nousun aikaisessa vaiheessa. Teräspilarin päiden kiertymärajoitteiden toimintatavalla ja sen muuttumisella lämpötilan nousun eri vaiheissa on myös olennainen merkitys teräspilarin tulipalonaikaisen nurjahduksen analysoinnissa. Teräspilarin päiden kiertymärajoitteet toimivat tavallisesti lämpötilan nousun alkuvaiheessa kimmoisen kiertojousen tapaan kiertojousen jousivakion pienetessä vähitellen lämpötilan nousun mukana, jolloin siis pilarin pään kiinnitys muuttuu ajan ja lämpötilan funktiona. Teräspilarin pään kiinnittyessä teräksiseen välipohja- tai yläpohjapalkkiin pilarin pään kiinnitys voi muuttua tulipalon aikana lämpötilan noususta liitoskohtaan aiheutuvan plastisoitumisen seurauksena, lopulta jopa nivelkiinnitystä vastaavaksi.

Kaikkien edellä lueteltujen tekijöiden huomioonottaminen tulipalonalaisen teräspilarin nurjahdustarkastelussa on luonnollisesti ylivoimaisen vaikeaa ja jopa käytännössä mahdotonta. Tästä syystä tulipalon alaisena olevan teräspilarin nurjahdustarkastelussa on tehtävä hyvin paljon laskelmia yksinkertaistavia alkuotaksumia. Nurjahdustarkastelun lähtökohdaksi otetaan tällöin lämpötilan täysin tasainen jakaantuminen teräspilarin pituus- ja poikkisuunnassa koko tulipalolämpötilan nousun aikana. Lämpötila-gradienttien vaikutus arvioidaan teräspilarin mitoituksessa erikseen suunnitelukuormaan liitetyn erillisen korjauskertoimen ( $\kappa$ ) avulla. Teräspilarin päiden kiinnitys- ja tuentaehdot ja siis samalla näistä riippuva pilarin efektiivinen pituus  $L_k$  määritetään tavallisimmin pelkästään pilarin huoneenlämpötilaa vastaavista päiden kiinnitys- ja tuentaehdoista. Näin tulipalon alaisen teräspilarin nurjahdusta voidaan analysoida yksinkertaisella menetelmällä, joka perustuu suoraan normaaliin nurjahdustarkasteluun huoneenlämpötilassa. Tällöin lähtökohdaksi otetaan kaavasta (9) saatava esitysmuoto

$$\sigma_{kr}/f_y = \frac{1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2} - \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \sqrt{[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2]^2 - 4\bar{\lambda}^2}, \quad (10)$$

joka määrittelee teräspilarin nurjahdusjännityksen ( $\sigma_{kr}$ ) ja myötörajan ( $f_y$ ) suhteen huoneenlämpötilassa dimensiottoman (modifioidun) hoikkuuden  $\bar{\lambda}$  ( $= \lambda/\pi\sqrt{E/f_y} = L_k/\pi\sqrt{EI/f_y A}$ ,  $\bar{\lambda} \geq 0.2$ ) funktiona. Kohonnessa tulipalolämpötilassa  $T$  ( $= T_s$ ) teräspilarin nurjahdusjännityksen  $\sigma_{kr,T}$  ja kohonnutta lämpötilaa vastaavan rakenneteräksen myötörajan  $f_{y,T}$  suhde voidaan periaatteessa otaksua kaavan (10) oikean puolen lausekkeen muotoiseksi, kun siinä  $\bar{\lambda}$  on korvattu  $\bar{\lambda}_T$ :llä eli  $\bar{\lambda}$ :ssa kimmomoduulin  $E$  ( $= E_0$ ) ja myötörajan  $f_y$  ( $= f_{y,20}$ ) paikalle on sijoitettu niiden lämpötilaa  $T$  vastaavat arvot  $E_T$  ( $= E_0(T_s)$ ) ja  $f_{y,T}$ . Nämä puolestaan saadaan kaavoista (2) ja (1). Tällainen sijoitus antaisi kuitenkin hyvin monimutkaisen lausekemuodon haetulle suhteelle, jolloin sitä ei voisi käyttää käytännössä. Niinpä tarkastelua yksinkertaistetaan, ja se tapahtuu melko karkealla likimääräistyksellä  $\bar{\lambda}_T \approx \bar{\lambda}$  eli sellaisella otaksumalla, että teräspilarin

dimensioton hoikkuus on lämpötilan suhteen invarianttinen suure. Tämä tarkoittaa siis sitä, että  $\bar{\lambda}_T$ :n ja  $\bar{\lambda}$ :n välisessä yhteydessä

$$\bar{\lambda}_T = \bar{\lambda} \sqrt{\frac{E_0/E_T}{f_{y,20}/f_{y,T}}} \quad (11)$$

neliöjuuressa osoittajan termi  $E_0/E_T$  ja nimittäjän termi  $f_{y,20}/f_{y,T}$  vaihtelevat samalla tavalla lämpötilan muuttuessa. Sijoittamalla neliöjuuren termeihin eri lämpötiloja vastaavia  $E$ - ja  $f_y$ -arvoja kaavoista (2) ja (1) voidaan todeta, että likimääräistys  $\bar{\lambda}_T \approx \bar{\lambda}$  on hieman karkea: lämpötiloissa 100, 200, 300, 400, 500 ja 600 °C suhteen  $\bar{\lambda}_T/\bar{\lambda}$  arvot ovat 0,986, 0,958, 0,921, 0,879, 0,875 ja 1,192. Jos  $\bar{\lambda}_T$  ja  $\bar{\lambda}$  kuitenkin otaksutaan yhtäsuuriksi, siitä seuraa, että osamäärät  $\sigma_{kr,T}/f_{y,T}$  ja  $\sigma_{kr,20}/f_{y,20}$  ovat yhtä suuret ja niiden yhteisen arvon ilmaisee kaavan (10) oikea puoli. Näin teräspilarin nurjahdus eri tulipalolämpötiloissa voidaan esittää kaava muodossa

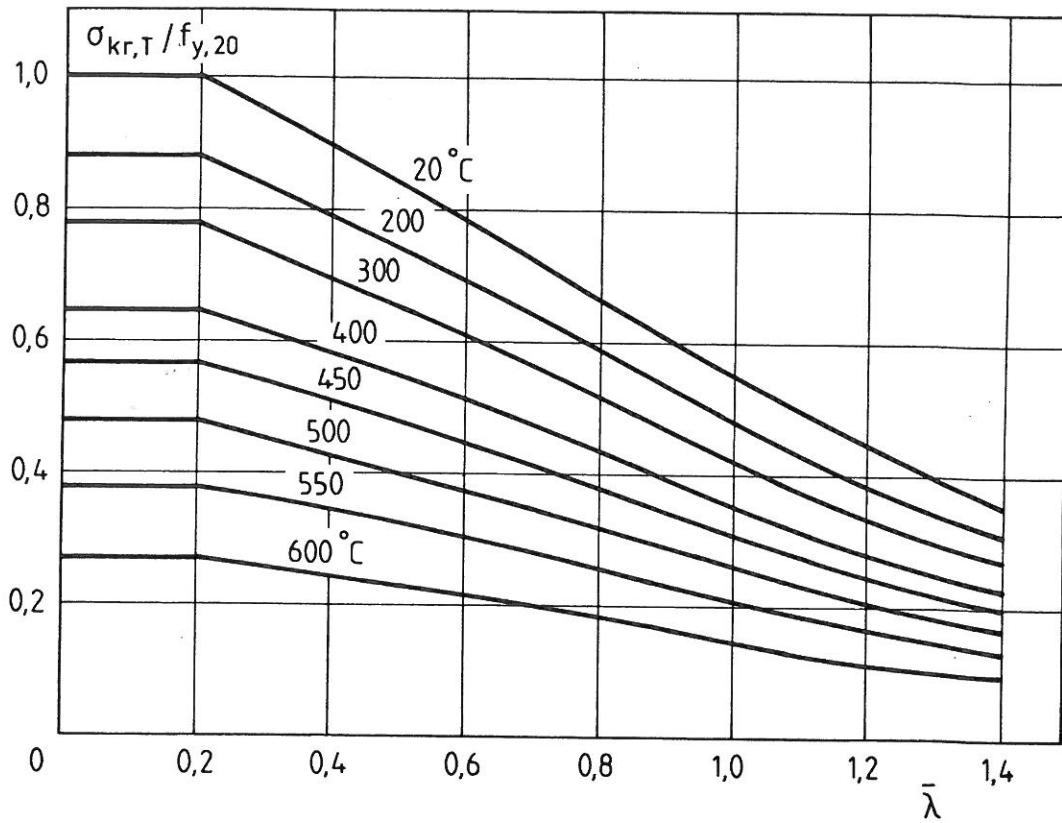
$$\sigma_{kr,T}/f_{y,20} = \frac{f_{y,T}}{f_{y,20}} \left[ \frac{1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2} - \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \sqrt{[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]^2 - 4\bar{\lambda}^2} \right], \quad (12)$$

missä kertoimelle  $\alpha$  käytetään toistaiseksi vain yhtä, kuvan 5 c-käyrää vastaavaa, "konservatiivista" arvoa  $\alpha = 0,489$ .

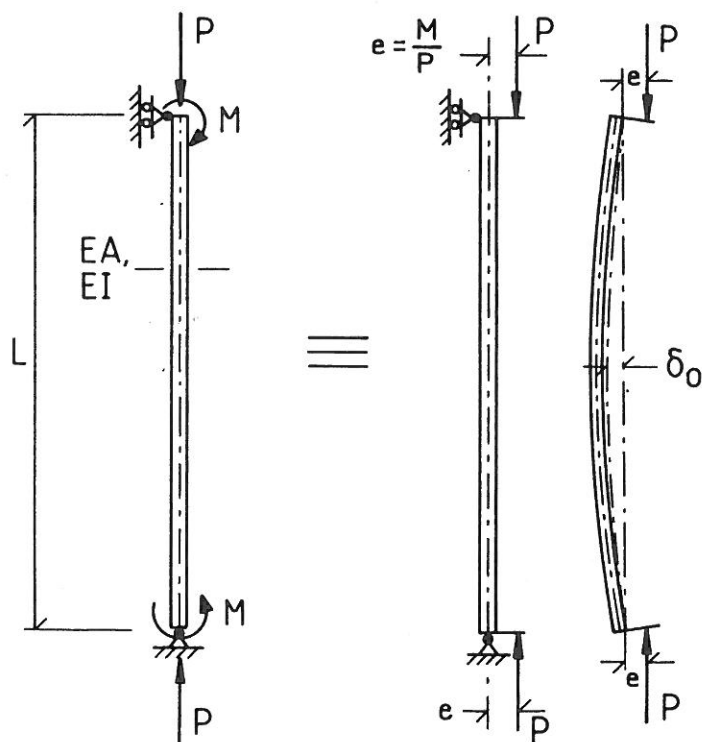
Kuvassa 6 on esitetty kaavasta (12)  $\alpha$ -arvolla 0,489 saatavien dimensiotomien nurjahduskäyrien kuvaajia eri lämpötiloissa huoneenlämpötilasta 20 °C lämpötilaan 600 °C asti. Näiden käyrien käyttökelpoisuutta on testattu laajoilla täysimittaisten teräspilarien nurjahduskokeilla, joita on tehty Belgiassa (Ghent) ja Tanskassa (Aalborg) [4]. Nurjahduskokeissa erityyppiset (HEA-, HEB- ja IPE-profiiliset) teräspilarit (hoikkuudet välillä 25-167) ovat olleet joko nk. standardikäyrän (ISO-834) mukaisesti kohoavan lämpötilan alaisina vakiosuuruisessa aksiaalissa kuormituksessa tai teräspilarin lämpötila on kohotettu eri vakiolämpötiloihin (200, 400, 500 °C jne.) ja kuormitusta on lisätty tämän jälkeen tasaisella vakionopeudella nurjahdustilanteeseen asti. Nurjahduskokeiden antamat tulokset ovat osoittautuneet suhteellisen hyvin kuvan 6 nurjahduskäyriä vastaaviksi. Kokeista saadut nurjahdusjännitysten arvot ovat olleet kauttaaltaan 10-30 % kaavasta (12) laskettuja arvoja suurempia. Näin ollen kuvan 6 nurjahduskäyrät ovat "varmalla puolella" ajateltaessa niiden käyttöä teräspilarien palomitoituksessa.

#### TERÄSKEHÄPILARIEN KRIITTISTEN LÄMPÖTILOJEN MÄÄRITTÄMISPERUSTEET

Teräspilarin ollessa kehän osana sen toimintaa ja kantokykyä on lähdeittävä tarkastelemaan kuvan 7 mukaisesta tilanteesta, missä teräspilarin päihin vaikuttaa keskisen puristuksen ohella myös pilarin päiden kiinnityksistä



Kuva 6. Teräspilarien nurjhduskäyrät tulipalolämpötiloissa.



Kuva 7. Teräskehäpilarin nurjhdustarkastelun perustilanne.

johtuvat taivutusmomentit. Pelkistetyimmässä tapauksessa, missä päiden taivutusmomentit ovat samansuuruiset ( $M$ ) ja taivuttavat pilaria samaan suuntaan, teräspilarin tarkastelu vastaa kuvan 7 mukaisesti päistään epäkeskisesti (epäkeskisyys  $e = M/P$ ) puristetun pilarin perustapausta. Tällaisessa pilarissa keskikohdan taivutusmomentille  $M_{\max}$  pätee kaava

$$M_{\max} = M \sec\left(\frac{L}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}}\right) = P e \sec\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_E}}\right) \cong P e \frac{1 + 0.26 P/P_E}{1 - P/P_E}, \quad (13)$$

missä likiyhteys on johdettu  $\sec (= 1/\cos)$ :n sarjakehitelmää hyväksikäyttämällä. Jos pilariin otaksutaan lisäksi aiemman esityksen mukaisesti alkukäyryys niin, että keskikohdan alkutaipuma on  $\delta_0$ , keskikohdan taivutusmomentille tulee lausekkeeksi

$$M_{\max} = P e \sec\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_E}}\right) + P \frac{\delta_0}{1 - P/P_E} \cong P \frac{e(1 + 0.26 P/P_E) + \delta_0}{1 - P/P_E} = P \frac{e+e^*}{1 - P/P_E}. \quad (14)$$

Kaavan (14) esitysmuotoon sisältyvä suure  $e^*$  ( $= \delta_0 + 0.26eP/P_E$  tässä) on yleisessä tapauksessa nk. epätäydellisyysparametri tai nk. efektiivinen epätäydellisyys. Sen avulla todellisen teräshepäpilarin nurjahdustarkastelussa voidaan ottaa huomioon alkukäyryyden ja alku- (jäännös-) jännitysten vaikutukset. Teräspilarin kantokyvyn kriittisen vaiheen määrittämisessä on nimitäin taas realistisimpana lähtökohtana se tilanne, kun pilarin keskikohdan koveran puolen reunajännitys saavuttaa teräksen myötörajan  $f_y$  ts.

$$\frac{P}{A} + \frac{P}{1 - P/P_E} \cdot \frac{e+e^*}{W} = f_y. \quad (15)$$

Kaavan (15) esitysmuodosta tulee jälleen korostetusti esiin se seikka, että pilarin stabiiliuden arvioimisessa nk. toisen kertaluvun vaikutusten eli tässä kaavan termien  $1/(1 - P/P_E)$  ja  $e^* = \delta_0 + 0.26eP/P_E$  merkitys on ratkaiseva.

Teräshepäpilarien kantokyvyn arvioimisessa ovat perinteisesti käytössä myös nk. yhteisvaikutusdiagrammit, joissa pilarin kantokyky on esitetty päiden kuormitusten ( $P$  ja  $M$ ) suhteellisten arvojen  $P/P_p$  ja  $M/M_p$  välisenä riippuvuuskäyränä pilarin hoikkuuden  $\lambda$  eri arvoilla  $P_p$ :n ja  $M_p$ :n ollessa pilarin poikkileikkauksen täysplastisen normaalivoiman ja taivutusmomentin arvoja. Erikoistapauksen  $\lambda = 0$  käyrä esittää tällöin pilarissa normaalivoiman vaikutusta täysplastiseen taivutusmomenttiin  $M_p$ . Yhteisvaikutusdiagrammeja on pyritty sittemmin kehittämään sellaisiksi, että ne voidaan esittää yhdellä ainoalla kaavalla. Tällaisen kehittelyn lähtökohtana voi olla kaavasta (15) puolittain  $f_y$ :llä jakamalla saatava kaavamuoto

$$\frac{P}{P_{kr}} + \frac{1}{1 - P/P_E} \cdot \frac{M}{M_p} = 1. \quad (16)$$

Tämä siis vastaa sellaisia pilarin päiden kiinnityksiä, joissa päiden yhtä-

suuret taivutusmomentit (M) taivuttavat pilaria samaan suuntaan. Jos pilarin päiden taivutusmomentit ovat erisuuret ja/tai pilaria vastakkaisiin suuntiin taivuttavia, kaavamuotoa (16) voidaan käyttää tällöin niin, että kaavaan M:n paikalle sijoitetaan nk. ekvivalenttinen pilarin päiden momentti  $M_{ekv}$ . Tämä  $M_{ekv}$  voidaan määrittää sillä perusteella, että se pilaria molemmissa päissä samaan suuntaan taivuttaessaan synnyttää saman suurimman taivutusmomentin arvon kuin erisuuret ja erimerkkiset pilarin päiden momentit  $M_1$  ja  $M_2$  ( $|M_2| > |M_1|$ ). Ekvivalenttisen pilarinpäämomentin  $M_{ekv}$  likimääräisiä laskukaavoja on esitetty useita. Yksinkertaisin pilarien mitoitukseen tarkoitettu kaava (Austinin kaava) on muotoa

$$\begin{aligned} M_{ekv} &= 0.6M_2 + 0.4M_1, & -1/2 \leq M_1/M_2 \leq 1 \\ M_{ekv} &= 0.4M_2, & -1 \leq M_1/M_2 \leq -1/2 \end{aligned} \quad (17)$$

Toisen mitoituksessa käytetyn (Campus-Massonnet'in) kaavan

$$M_{ekv} = \sqrt{0.3(M_1^2 + M_2^2) + 0.4M_1M_2} \quad (18)$$

esittämä käyrä kulkee lähellä kaavaa (17) vastaavia suoria. Käytettäessä kaavamuotoa (16) pilarien mitoitukseen yleensä tehdään vielä lisäksi erillinen tarkistus puristus- ja taivutusjännitysten yhteisvaikutuksesta kaavalla

$$\frac{N}{N_p} + \phi \frac{M_2}{M_p} \leq 1, \quad (19)$$

missä  $\phi$  on poikkileikkauksen muotokerroin. Vääntönurjahduksena poikisuuntaan tapahtuva pilarin kiepahtaminen (engl. lateral-torsional buckling) otaksutaan tällöin aina täysin estetyksi.

Teräskehäpilarien mitoituksessa on omaksuttu viime vuosina etupäässä kaavamuotoon (15) perustuva nurjahdustarkastelu, missä lähtökohdaksi otetaan todellisessa kehäpilarissa aina esiintyvät epätäydellisyydet sen geometrias- ja kuormituksessa, ja näiden yhteisvaikutus ilmaistaan nk. epätäydellisyysparametrin  $e^*$  avulla. Tällöin kehäpilarin on oltava liittyneenä sivusuunnassa siirtymättömään kehään tai ainakin erillisellä sivuttaisjäykistyk- sellä jäykistettyyn kehään (eng. braced frame).  $N_s$  sivusiirtyvien kehien tai sivusuuntaan jäykistämättömien kehien (engl. unbraced frames) pilarit mitoitetaan myös periaatteessa puristettuina nivelpäisinä sauvoina, joiden päissä vaikuttavat pilarin päiden kiinnityksistä aiheutuvat taivutusmomentit. Siirtyvien kehien tapauksessa kehäpilarin päihin syntyvien momenttien määrittäminen on kuitenkin huomattavasti vaikeampaa ja monimutkaisempaa kuin siirtymättömien kehien tapauksessa.

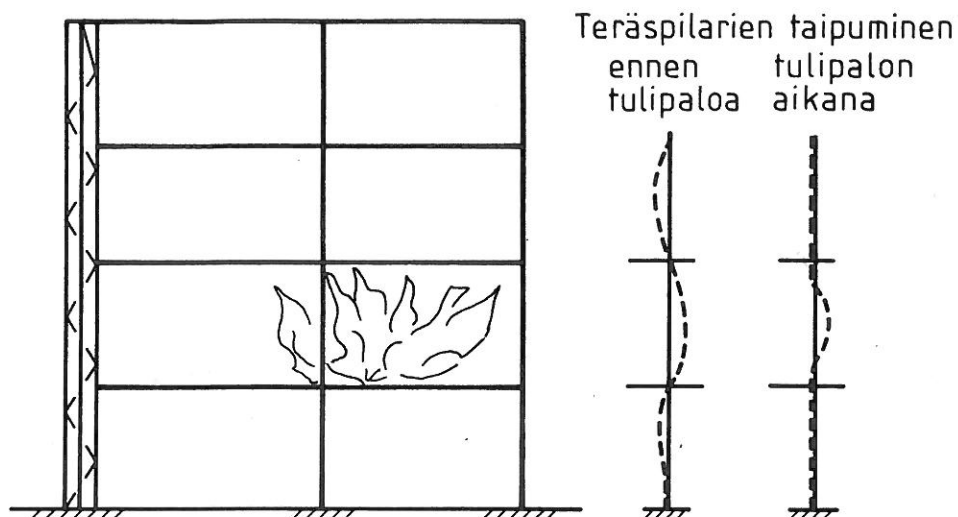
Tulipalo-olosuhteissa olevien teräskehäpilarien kantokyvyn tarkka analysointi edellyttää edellä esitettyjen normaalimitoitukseen kuuluvien tarkastelujen lisäksi toisaalta kehäpilareihin syntyvien pituus- ja poikkisuuntaisten lämpötilajakautumien määrittämistä ja toisaalta kehäpilarien päiden kiin-

nitys- ja rajoite-ehtojen lämpötilan nousun mukana tapahtuvan muuttumisen huomioonottamista. Palomitoituksessa tällaisen monimutkaisen analysoinnin suorittaminen on kuitenkin käytännössä mahdotonta. Niinpä tulipalonalaisen teräskehäpilarin kantokyvyn arvioinnissa on tyydyttävä yksinkertaistettuun tarkasteluun, joka perustuu kuvassa 6 esitettyihin ja kaavamuodosta (12) johdettuihin nurjahduskäyriin eri tulipalolämpötiloissa. Tulipalonalaisen teräskehäpilarin kantokyvyn rajakohta määritellään tällöin ns. kriittisen lämpötilan ( $T_{kr}$ ) avulla. Tämä  $T_{kr}$  tarkoittaa sitä lämpötilaa, missä käyttötilaa vastaavan kuormituksen (pysyvä ja nk. karakteristinen muuttuva kuormitus) alainen kehäpilari joutuu sortumisrajaan (engl. limit state of failure). Teräskehäpilarin kriittisen lämpötilan  $T_{kr}$  määrittäminen kuvan 6 mukaisista käyristä tapahtuu niin, että käyrästä pystyakselin  $\sigma_{kr, T_{kr}^{f_y, 20}}$ -arvoa vastaavaksi osamääräksi lasketaan erityisellä korjauskertoimella  $\kappa$  (= 0.85 pilareilla) kerrotun käyttötilan suunnittelukuorman  $P_{d, 20}$  ja rajakuorman  $P_{u, 20} = f_y A$  suhde  $\kappa P_{d, 20} / P_{u, 20}$ . Korjauskertoimella  $\kappa$  pyritään erityisesti ottamaan huomioon pilarin poikki- ja pituussuunnassa syntyvien epätasaisten lämpötilajakautumien vaikutus. Käyrästä vaakaa-kselin modifioitun hoikkuuden  $\bar{\lambda}$  arvon, jota varten tarvittava kehäpilarin efektiivinen pituus  $L_k$  (=  $kL = \lambda/i$ ) määritetään yleensä yksinkertaisesti huoneenlämpötilan olosuhteiden perusteella, tultua määritetyksi teräskehäpilarin kriittinen lämpötila  $T_{kr}$  saadaan  $\kappa P_{d, 20} / P_{u, 20} - \bar{\lambda}$ -arvoparia vastaavaan nurjahduskäyrään liittyvästä lämpötilasta. Näin saatavalle  $T_{kr}$ :n arvolle asetetaan palomitoituksessa ylärajaksi 550 °C.

Määrittäessä palomitoituksessa monikerroskehien teräspilareille kriittisen lämpötilan arvoja lähtökohdaksi tulee usein se tosiasia, että tulipalo alkaa yleensä jonkun kerroksen yhdestä huoneesta ja rajoittuu pitkään pelkästään yhteen kerrokseen, jolloin ylä- ja alapuolisten kerrosten teräspilareissa lämpötilan nousu jää vähäiseksi. Niinpä esimerkiksi kuvan 8 mukaisessa sivusuuntaan jäykistetyssä monikerroskehässä toiseen kerrokseen rajoittuvassa tulipalossa tämän kerroksen teräspilarin päiden kiinnityksiä voidaan pitää täysin jäykkänä "kylmien" ylä- ja alapuolisten teräsrakenteiden jäykistävän vaikutuksen perusteella. Siten laskettaessa teräspilarin hoikkuutta efektiivisenä pituutena käytetään tällöin puolta kerroskorkeudesta. Sen sijaan ylimpään kerrokseen rajoittuvan tulipalon tapauksessa teräspilarin yläpohjapalkkeihin liittyvään päähän on otaksuttava nivel, koska yläpohja ei pysty enää liekkien vaikutuksen alaisena jäykistämään tarpeeksi pilarin yläpään kiinnitystä.

Kriittisen lämpötilan määrittäminen sivusuuntaan siirtyvien monikerroskehien teräspilareille edellyttää yleensä hyvin mutkikkaita rakenneanalyysijä, joissa erityisesti nk. toisen kertaluvun vaikutuksilla (kuten mm. kuorma-siirtymäyhteyden epälineaarisuudella) on merkittävä osuus koko kehän stabiiliuden menetykseen jo suhteellisen pienillä kuormituksilla tulipalolosuhteissa. Tästä syystä yli kaksikerroksisten siirtyvien monikerroske-





Kuva 8. Sivujäykistetyin monikerroskehän teräspilarien tulipalonaikainen toiminta.

hien teräspilareille kuvan 6 mukaisten nurjaduskäyrien perusteella määritetty  $T_{kr}$ :n mitoitusarvon ylärajaksi asetetaan  $300^{\circ}\text{C}$ , ellei kehan teräspilareille pystytä osoittamaan tarkoin laskelmin tai kokeellisesti suurempaa kriittisen lämpötilan arvoa. Matalissa yksi- ja kaksikerroksisissa siirtävissä kehisissä tällaiset epästabiiliusilmiöt eivät ole enää hallitsevia, ja niin näiden kehiin teräspilareille  $T_{kr}$  voidaan määrittää kuvan 6 nurjaduskäyrien perusteella.

#### LOPPUSANAT

Edellä esitetty katsaus tulipalonalaisen teräspilarien toiminnan ja kantokyvyn analysointiin ja sen perusteisiin osoittaa, että teräspilarien ja yleensä teräsrakenteiden käytännön palomitoitusta varten on jo olemassa analyttisiin menetelmiin perustuva mitoitus tapa. Tämän avulla niin teräspilarien kuin muidenkin teräsrakenteiden palotekninen mitoitus voidaan suorittaa samanlaisten rakennelaskelmien pohjalta kuin muukin rakenteiden mitoitus. Teräspilarien palomitoituksella on tällöin erityisen tärkeä merkitys, koska teräspilarien toiminta ja kantokyky tulipalon aikana ratkaisee yleensä koko teräsrakennuksen rungon toimintatavan ja kestävyuden tulipalolosuhteissa.

#### MERKINNÄT

A	teräspilarin poikkileikkauksen pinta-ala
$E_0$	teräksen kimmomoduuli huoneenlämpötilassa
$E_T$	teräksen kimmomoduuli lämpötilassa T
e	puristavan kuorman epäkeskisyys

$e^*$	teräspilarin epätäydellisyysparametri eli efektiivinen epätäydellisyys
$f_{y,20}$	teräksen myötöraja huoneenlämpötilassa
$f_{y,T}$	teräksen myötöraja lämpötilassa T
$h$	teräspilarin poikkileikkauksen reunan etäisyys neutraaliakselista pilarin koveralla puolella
$I$	poikkileikkauksen jäyhyysmomentti
$i$	poikkileikkauksen jäyhyyssäde
$L$	teräspilarin pituus
$L_k$	teräspilarin efektiivinen pituus (eli ns. redusoitu nurjahduspituus)
$M$	taivutusmomentti
$M_1, M_2$	teräskehäpilarin päiden taivutusmomentit
$M_{ekv}$	ekvivalenttinen teräskehäpilarin päiden taivutusmomentti
$M_{max}$	teräspilarin keskikohdan taivutusmomentti
$M_p$	teräskehäpilarin täysplastinen taivutusmomentti
$N$	teräskehäpilarin normaalivoima
$N_p$	teräskehäpilarin täysplastinen normaalivoima
$P$	teräspilaria kuormittava aksiaalinen puristusvoima
$P_E$	teräspilarin nk. Euler-kuorma
$P_{kr}$	teräspilarin nurjahduskuorma
$P_{d,20}$	teräspilarin käyttötilan mukainen suunnittelukuorma
$P_p$	teräspilarin poikkileikkauksen täyden plastisoitumisen aiheuttava puristuskuorma
$P_{u,20}$	teräspilarin rajakuorma huoneenlämpötilassa
$T$	lämpötila
$T_s$	teräksen lämpötila
$T_{kr}$	teräspilarin kriittinen lämpötila
$v$	teräspilarin taipuma
$W$	teräspilarin poikkileikkauksen taivutusvastus
$\alpha$	parametrin $\eta$ lausekkeeseen sisältyvä kerroin
$\delta$	kuormitetun teräspilarin keskikohdan taipuma
$\delta_o$	kuormittamattoman teräspilarin keskikohdan taipuma
$\epsilon$	teräksen venymä
$\eta$	teräspilarin geometrian epätäydellisyyttä kuvaava dimensioton parametri
$\kappa$	taipuneen teräspilarin käyryys, korjauskerroin
$\lambda$	teräspilarin hoikkuus
$\bar{\lambda}$	teräspilarin modifioitu hoikkuus huoneenlämpötilassa
$\bar{\lambda}_T$	teräspilarin modifioitu hoikkuus lämpötilassa T
$\sigma$	teräspilarin poikkileikkauksen keskimääräinen puristusjännitys
$\phi$	teräspilarin poikkileikkauksen muotokerroin

## KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] European Convention for Constructional Steelwork, Committee T3-Fire Safety of Steel Structures, European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures. Level 1: Calculation of the Fire Resistance of Load Bearing Elements and Structural Assemblies Exposed to the Standard Fire. May 1981. (Epävirallinen painokappale, ilmestyy virallisena keväällä 1982).
- [2] Witteveen, J., An Introduction to the European Recommendations for the Design of Steelstructures Exposed to the Standard Fire. CIB, Symposium on Systems Approach to Fire Safety in Buildings. Tokio 1980.
- [3] European Convention for Constructional Steelwork, European Recommendations for Steel Construction. March 1978.
- [4] Vandamme, M. & Janss, J., Buckling of Axially Loaded Steel Columns in Fire Conditions. IABSE Proceedings P-43/81, IABSE Periodica 3/1981, s. 81-95.
- [5] Allen, H.G. & Bulson, P.S., Background to buckling. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited, Lontoo 1980.
- [6] Kirby, P.A. & Nethercot, D.A., Design for Structural Stability. Constrado Monographs, Granada Publishing Limited, Lontoo 1979.
- [7] Kruppa, J., Collapse Temperature of Steel Structures. Journal of the Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. ST9, September, 1979, s. 1769-1787.
- [8] European Convention for Constructional Steelwork, Manual of Stability of Steel Structures (Second Edition). June, 1976.
- [9] Mäkeläinen, P., Teräsrakenteiden tulipalonkestävyyden arviointi ja paloteknisen mitoituksen perusteet. Teräsrakenne 4 (1981)3, s. 10-18.

*Pentti Mäkeläinen, tekn.tri, Teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööriosasto*