

---

**Teräksen materiaalimallit mitoitettaessa palosuojaamattomia teräsrakenteita**

---

Yhteyshenkilö: Kristian Witting  
Rautaruukki Oyj  
PL 860, 00101 HELSINKI  
puh. 09-41776354, fax 09-41776373  
e-mail kristian.witting@rautaruukki.fi

---

**Menetelmän kuvaus:**

Tässä ohjeessa esitetään palosuojaamattomien teräsrakenteiden palomitoitukseen tarkoitettujen teräksen materiaalimallit. Materiaalimalleja voidaan käyttää mitoitettaessa staattisesti kuormitettuja palosuojaamattomia teräsrakenteita ISO 834:n mukaisessa standarditulipalossa. Ohjeita voidaan käyttää sekä ohjeiden B7 että standardin SFS-ENV 1993-1-2:n mukaiseen palomitoitukseen.

**Menetelmän rajoitukset:**

Tätä ohjetta voidaan käyttää seuraavin edellytyksin:

- Rakenne on staattisesti kuormitettu
- Teräsrakenteet ovat palosuojaamattomia
- Rakenneseosien poikkileikkausluokka on 1,2 tai 3. Köysirakenteena mitoitettavien taivutettujen poimulevyrakenteiden poikkileikkausluokka voi olla myös 4
- Mitoitus tehdään joko Suomen rakentamismääräyskokoelman tai Eurocode järjestelmän mukaan

---

Teräsrakenneyhdistyksen Normitoimikunta on käsitellyt ja hyväksynyt 21.2.2000 Teräsnormikortin. Teräsnormikortin käyttäjällä on vastuu kortin ohjeiden käytöstä.

Tämä Teräsnormikortti on voimassa toistaiseksi.

Helsingissä maaliskuun 22. päivänä 2000

TERÄSRAKENNEYHDISTYS R.Y.

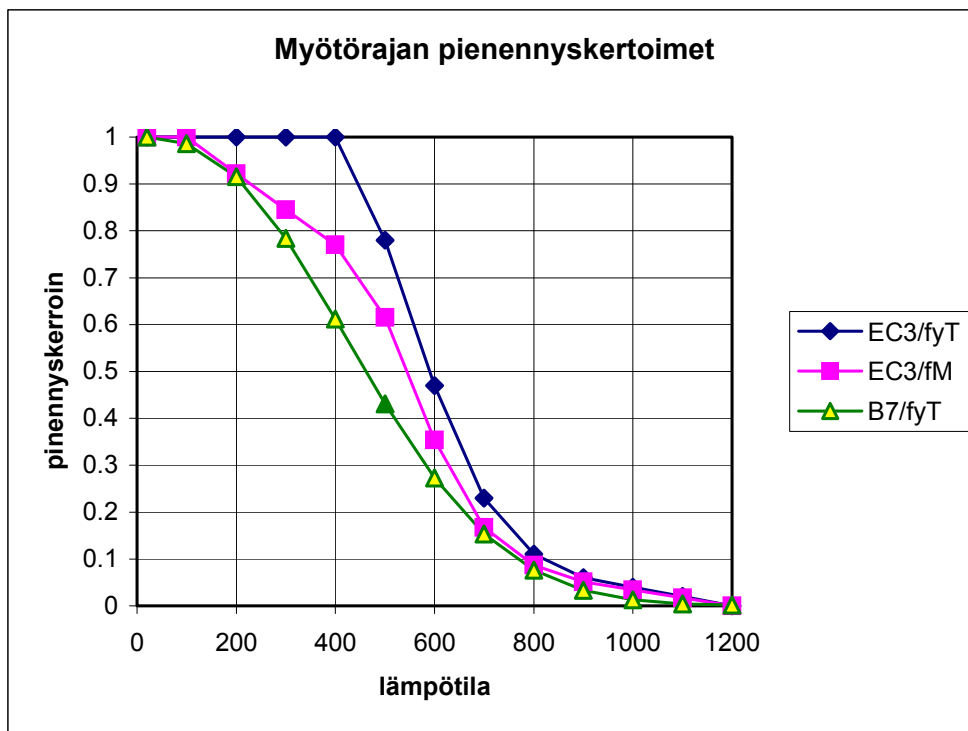
Pertti Sandberg  
puheenjohtaja

Kai Rätty  
toimitusjohtaja

## 1 TAUSTA

Rakenneteräksen palomitoituksessa käytävillä materiaalimalleilla pyritään kuvaamaan teräksen ja teräs-rakenteen käyttäytymistä korkeissa lämpötiloissa. Eurocode kehitystyötä tehtäessä nämä materiaalimallit ovat kehittyneet huomattavasti. Eurocode 3 osassa 1.2 on esitetty kaksi mallia materiaalien käsittelyyn; tehollinen myötöraja ja muunnettu kerroin. Muunnettua kerrointa käytetään silloin, kun rakenteille asetetaan muodonmuutuskriteereitä esim. palosuojaamateriaalien kiinnipysymisen vuoksi. Tehollista myötörajaa voidaan käyttää palosuojaamattomien teräsrakenteiden mitoittamiseen tai silloin kuin muodonmuutuskriteerit otetaan huomioon muulla tavoin.

Suomen rakentamismääräyskokoelman ohjeiden osassa B7 esitetty materiaalimalli on peräisin 80-luvulta ja tarkoitettu lähinnä palosuojattujen rakenteiden mitoittamiseen. Se vastaa siten Eurocoden muunnettua kerrointa.



**Kuva 1:** Myötörajan pienennyskerroimen vertailu B7:n ja EC3:n välillä

## 2 RAKENTEIDEN PALOLUOKITUS

Rakenteiden paloluokitus tehdään Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan. Rakennusten paloluokitus tapahtuu lähinnä seuraavien osien perusteella:

- E1 Rakennusten paloturvallisuus
- E2 Tuotanto- ja varastorakennusten paloturvallisuus
- E4 Autosuojien paloturvallisuus

## 2.1 Rakenteet, joita ei tarvitse mitoittaa R15 luokkaan

Seuraavissa tapauksissa teräsrakenteille ei tarvitse suorittaa erillistä palomitoitusta, vaan niiden katsotaan palosuojaamattomina täyttävän R15 palonkestoluokan ilman erillistä mitoitus.

Yksikerroksisissa tuotanto- ja varastorakennuksissa voidaan suojaamattomia teräsrakenteita käyttää R15-luokassa ilman erillistä laskentaa seuraavasti (SRmk B7 kohta 8.6):

- koko rungossa, kun rakennus on varustettu vesisprinklauslaitteistolla, jonka suunnittelussa on otettu huomioon rakenteiden jäähdytys
- kattorakenteissa palovaarallisuusluokan 1 rakennuksissa, jotka ovat yli 14 m korkeita ja katon välittömässä läheisyydessä ei ole huomattavaa määrää palokuormaa
- Pilareissa, joiden poikkileikkaustekijä  $A_m/V$  on enintään  $180 \text{ m}^{-1}$

## 3 PALOSUOJAAMATTOMIEN TERÄSRAKENTEIDEN PALOMITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIMALLIT

### 3.1 Kuumavalssatun rakenneteräksen myötöraja ja kimmokerroin

Laskennassa käytettävät kimmokertoimen ja tehollisen myötörajan pienennyskerroimet korkeissa lämpötiloissa lasketaan taulukon 1 mukaan /3/ väliarvot voidaan interpoloida.

**Taulukko 1:** Myötörajan ja kimmokertoimen riippuvuus teräksen lämpötilasta

Teräksen lämpötila $^{\circ}\text{C}$	Tehollisen myötörajan pienennyskerroin (suhteessa arvoon $f_y$ )	Lineaarisen kimmoisen osan kulmakertoimen pienennyskerroin (suhteessa arvoon $E_a=210\,000 \text{ MPa}$ )
20	1.000	1.0000
100	1.000	1.0000
200	1.000	0.9000
300	1.000	0.8000
400	1.000	0.7000
500	0.780	0.6000
600	0.470	0.3100
700	0.230	0.1300
800	0.110	0.0900
900	0.060	0.0675
1000	0.040	0.0450
1100	0.020	0.0225
1200	0.000	0.0000

### 3.2 Kylmävalssatun rakenneteräksen myötöraja ja kimmokerroin

Laskennassa käytettävät kimmokertoimen ja tehollisen myötörajän pienennyskerroimet korkeissa lämpötiloissa lasketaan taulukon 2 mukaan /liite 2/ väliarvot voidaan interpoloida.

**Taulukko2 :** Myötörajän ja kimmokertoimen riippuvuus ohutlevyteräksen lämpötilasta

Teräksen lämpötila °C	Tehollisen myötörajän pienennyskerroin (suhteessa arvoon fy)	Lineaarisen kimmoisen osan kulmakertoimen pienennyskerroin (suhteessa arvoon Ea)
20	1.000	1.0000
100	0.970	1.0000
200	0.932	0.9000
300	0.895	0.8000
400	0.857	0.7000
500	0.619	0.6000
600	0.381	0.3100
700	0.143	0.1300
800	0.105	0.0900
900	0.067	0.0675
1000	0.029	0.0450

### 3.3 Palomitoitus Eurocode järjestelmän mukaan

Mitoitettaessa rakenteita Eurocode-normijärjestelmän mukaan käytetään mm. seuraavia normeja sekä niihin liittyviä Kansallisia sovellutusasiakirjoja (NAD)

- Eurocode 1 (SFS-ENV 1991-1) Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat
- Eurocode 3 (SFS-ENV 1993-1-1) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
- Eurocode 3 (SFS-ENV 1993-1-2) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-2 Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus
- Eurocode 3 (SFS-ENV 1993-1-3) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-3 Yleiset säännöt. Teräsohutlevyrakenteiden mitoitus

Materiaalimallit valitaan seuraavasti:

- Kuumavalssatun rakenneteräksen materiaaliominaisuudet palotilanteessa määritellään Eurocode 3 osa 1.2:n tai tämän normikortin mukaan
- Kylmävalssatun rakenneteräksen materiaaliominaisuudet palotilanteessa määritellään tämän normikortin mukaan

Mitoitus voidaan tehdä suoraan ko. normien mukaan. Nurjahdusluokka valitaan normaalimitoituksessa Eurocode 3:n mukaan. Palomitoituksessa käytetään luokkaa C.

### 3.4 Palomitoitus Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan

Mitoitettaessa rakenteita Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan käytetään mm. seuraavia määräyksiä ja ohjeita:

- Suomen rakentamismääräyskokoelma osa B1 Kuormat
- Suomen rakentamismääräyskokoelma osa B7 Teräsrakenteet
- Suomen rakentamismääräyskokoelma osa B6 Teräsohutlevyrakenteet

Materiaalimalleiksi valitaan em. normeista poiketen:

- Kuumavalssatun rakenneteräksen materiaaliominaisuudet palotilanteessa määritellään tämän normikortin mukaan (kohta 3.1)
- Kylmävalssatun rakenneteräksen materiaaliominaisuudet palotilanteessa määritellään tämän normikortin mukaan (kohta 3.2)

Nurjahdusluokka valitaan normaalimitoituksessa ohjeen B7:n mukaan. Palomitoituksessa käytetään luokkaa C.

Laskettaessa sauvan kestävyys palotilanteessa erilaisten stabiiliusilmiöiden suhteen, on huomioitava myös kokeellinen korjauskerroin 1.2. Tämä ylimääräinen varmuuskerroin on määritelty Eurocodessa ja sillä huomioidaan monia vaikutuksia.

Teräsrakenteiden ohjeiden B7 stabiiliutta koskevat kaavat saavat siis seuraavan muodon:

Sauvan kestävyys puristavalle voimalle:

$$N_{ReT} = f_{ckT} * A / (1.2 * \gamma_m) \quad (4.9)$$

Sauvan vääntönurjahduskestävyys:

$$N_{RTT} = f_{ckT} * A / (1.2 * \gamma_m) \quad (4.17)$$

Sauvan kiepahduskestävyys:

$$M_{RIT} = \eta * f_{ckT} * W / (1.2 * \gamma_m) \quad (4.20)$$

Kaavoissa stabiiliuden suhteen redusoitua lujuutta  $f_{cxx}$  laskettaessa käytetään siis ko. lämpötilassa olevaa myötörajaa ja kimmokerrointa.

## 4 ESIMERKKI: PUTKIPALKKIRAKENTEIDEN JA -RISTIKOIDEN MITOITUS EUROCODE 3:N MUKAAN

Tässä esimerkissä käsitellään Rautaruukki Oyj:n Metform ryhmän valmistamien teräsputkien sekä niistä valmistettujen ristikoiden mitoitusta standardipalokäyrän (ISO 834) mukaisessa palossa. Putket valmistetaan kuumavalssatusta nauhasta taivuttamalla ja hitsaamalla. Taivutus tehdään huoneenlämpötilassa, joten putkia kutsutaan kylmämuovatuiksi rakenneputkiksi. Niihin sovelletaan kuitenkin kuumavalssatun teräksen materiaalialleja perusmateriaalin mukaisesti.

Esimerkissä kuvataan Eurocoden mukainen palomitoitus palosuojaamattomana R15 minuutin palonkestoajaluokkaan. Yksinkertaistetut ohjeet on esimerkissä laatikoitu. Esimerkkejä voidaan soveltaa myös B7:n mukaisessa mitoituksessa.

### 4.1 Teräsrakenteen lämpötilan nousu

Teräsrakenteen lämpötilan nousu lasketaan SFS-ENV 1993-1-2 kaavasta 4.21 (vastaava kaavat ovat B7:ssä 8.8-8.11)

$$\Delta\Theta_{a,t} = \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad (1)$$

Missä:

$A_m/V$  on poikkileikkaustekijä [1/m]

Putkiprofiilin, joka on kaikilta sivuilta alttiina palolle, poikkileikkaustekijä voidaan laskea joko tarkasti tai likimääräiskaavalla:  $A_m/V = 1/T$ , jossa T on putken seinämän paksuus

$c_a$  on teräksen ominaislämpö [600 J/kgK yksinkertaistettu arvo]

$\rho_a$  on teräksen tiheys [7850 kg/m<sup>3</sup>]

$h_{net,d}$  on pinta-alan yksikköä kohden laskettu nettolämpövuon mitoitusarvo [w/m<sup>2</sup>]

Pinta-alan yksikköä kohden laskettu nettolämpövuon mitoitusarvo lasketaan SFS-ENV 1991-2-2 mukaisesti (kaavat 4.1 ja 4.2) säteilyn ja konvektion summana. Eurocoden oletusarvoja käyttäen saadaan  $h_{net,d}$  seuraava kaava:

$$h_{net,d} = \varepsilon_{res} \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot [(\Theta_g + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] + \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m) \quad (2)$$

Missä:

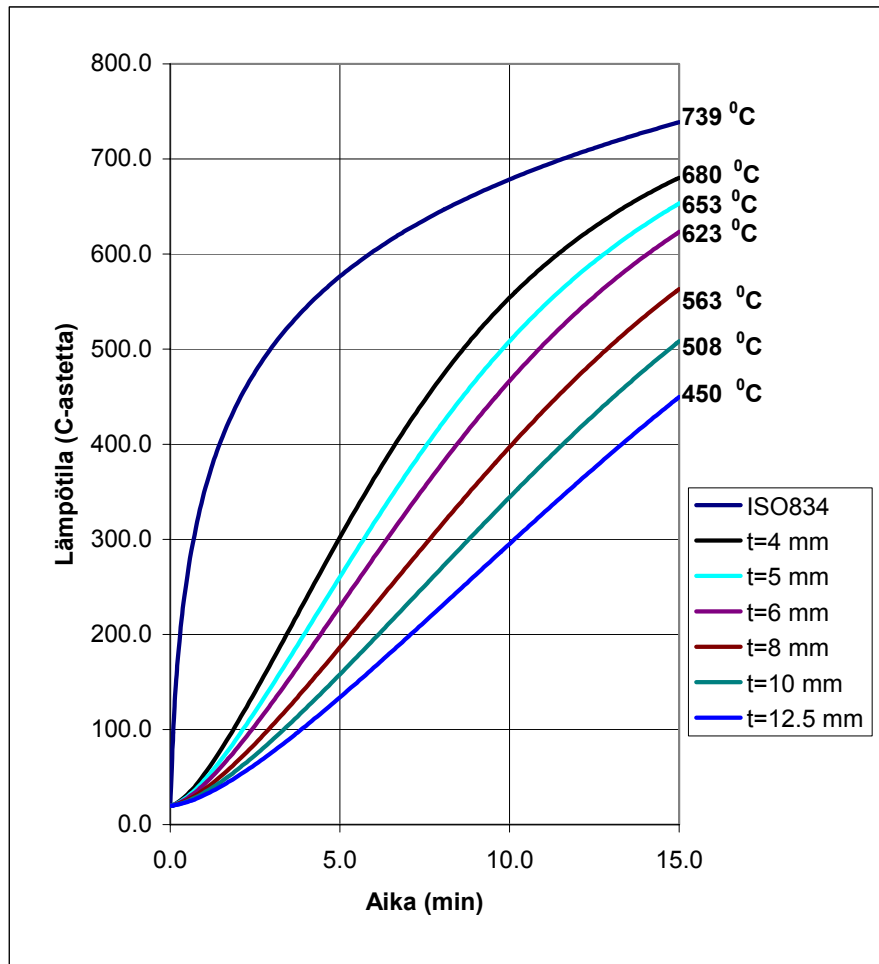
$\varepsilon_{res}$  on resuloiva emissiokerroin (oletus 0.5)

$\Theta_g$  on kaasun lämpötila [°C]

$\Theta_m$  on rakenneosan lämpötila [°C]

$\alpha_c$  on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin (oletus 25) [W/m<sup>2</sup>K]

Putkiprofiilien lämpötilan nousu voidaan 15 minuutin palonkestoajalle lukea suoraan seuraavasta kuvios-  
ta:



Kuva 2: Putkipalkin lämpötilan nousu ISO834-palossa ( $\epsilon_{res} = 0.5$ )

Taulukko 3: Putkipalkkien S355J2H myötörajat ja kimmokertoimet ainepaksuuden funktiona 15 minuutin palon jälkeen

Putkipalkin paksuus	Teräksen lämpötila	Myötörajan pienennyskerroin $f_{y,Q}$	Myötöraja kun $f_y=355\text{MPa}$	Kimmokertoimen pienennyskerroin $E_{a,Q}$	Kimmokerroin kun $E_a=210\,000\text{MPa}$
3	701.6	0.23	81.0	0.13	27166
4	680.2	0.28	98.5	0.17	34766
5	653.2	0.34	121.6	0.21	45004
6	623.2	0.41	147.1	0.27	56336
8	563.2	0.58	207.3	0.42	87512
10	508.2	0.75	267.8	0.58	120976
12.5	449.6	0.89	316.2	0.65	136578

## 4.2 Nurjahduspituudet

Nurjahduspituudet määritellään palotilanteessa pääosin kuten normaalilämpötilassa. Pilareiden, jotka jatkuvat palo-osastosta toiseen, nurjahduspituudet voidaan laskea kohdan 4.2.3.2 (3) (SFS-ENV 1993-1-2) mukaan.

Ristikoiden paarre- ja uumasauvojen nurjahduspituuksia määriteltäessä voidaan paarteiden uumasauvoja tukeva vaikutus ottaa huomioon. Tämä edellyttää kuitenkin, että käytetään normaaleja ympärihitsattuja liitoksia. Uumasauvan päät eivät myöskään saa olla litistettyjä tai limitettyjä yli 30 %:a. Systeempituus on tasossa solmupisteiden väli ja ulospäin tasosta tapahtuvassa nurjahduksessa ulkoisten tukien väli. Näillä oletuksilla nurjahduspituuskertoimet määritellään seuraavan taulukon mukaan:

**Taulukko 4:** Ristikön eri osien nurjahduspituuskertoimet

Rakenneosa	Nurjahduspituus normaalitilanteessa		Nurjahduspituus palotilanteessa	
	Tasossa	Tasosta ulospäin	Tasossa	Tasosta ulospäin
Paarre	1	1	0.9	0.9
Uumasauva	0.9	0.9	0.75	0.75

Uumasauvojen palotilanteen normaalia pienempi nurjahduspituuskertoimen johtuu paarteiden uumasauvaa tukevasta vaikutuksesta. Tämä vaikutus korostuu vielä korkeissa lämpötiloissa, sillä normaalisti massiivisemmat paarteet lämpiävät hitaammin. Lisäksi liitosalueen lämpötila nousee hitaammin kuin ympäröivässä rakenteessa, joka lisää jäykkyyseroa paarteen ja uumasauvan välillä. (liite 1)

### 4.3 Liitosmitoitus

Ristikoiden liitosten mitoituksessa pitää tarkistaa liitoksen kestävyys sekä kestävyuden laskentakaavojen ja geometrinen rajoitusten voimassaolo. Palomitoituksessa riittää, että tarkistetaan liitosten kestävyys palolämpötilassa käyttäen kyseisen lämpötilan mukaista myötörajaa ja kimmokerrointa. Geometrinen rajoitusten voimassaolon osalta riittää siis geometriarajoitusten tarkistaminen vain normaalilämpötilassa. Hoikimpien sauvojen ( $t=4$  mm) kaikki raja-arvot eivät aivan täyty, sillä  $f_{yT}$ :n ja  $E_T$  suhde muuttuu eri lämpötiloissa. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä kestävyuden kannalta.

Kokeissa mitatut liitosalueen lämpötilat ovat sauvojen lämpötiloja alhaisempia. Tämä johtuu liitosalueen massakeskittymästä sekä normaalia sauvaa suuremmasta varjostusvaikutuksesta. Tämä alhaisempi lämpötila (noin 20-40 °C) antaa osaltaan liitokselle lisävarmuutta. (liite 1)

### 4.4 Kuormat ja kuormitusyhdistelyt

Esimerkkilaskelmissa huomioon otetut kuormat ovat:

- Ristikön omapaino
- Kattorakenteet, 0.5 kN/m<sup>2</sup> eli 3 kN/m
- Lumikuorma maassa 2.5 kN/m<sup>2</sup> eli katolla 2.0 kN/m<sup>2</sup> => 12 kN/m

Kuormitusten osavarmuusluvut ja yhdistelyt on tehty Kansallisen soveltamisasiakirjan mukaan (suluissa Eurocoden perusarvot) eli:



**Taulukko 5: Eurocoden varmuusluvut ja yhdistelyt**

	Osavarmuuskertoimet		Yhdistelykertoimet		
	Normaali, $\gamma$	Palo, $\gamma_A$	Normaali, $\Psi_0$	Palo, $\Psi_1$	Palo, $\Psi_2$
Pysyvä (epäedullinen)	1.2 (1.35)	1.0	-	-	-
Pysyvä (edullinen)	1.0	1.0	-	-	-
Lumi	1.5	1.0	0.7 (0.6)	0.5 (0.2)	0.2 (0)
Tuuli	1.5	1.0	0.5 (0.6)	0.3(0.5)	0
Hyöty A-B	1.5	1.0	0.7	0.5	0.3
Hyöty C	1.5	1.0	0.7	0.7 (0.5)	0.3 (0.6)
Hyöty D	1.5	1.0	0.7	0.7	0.6
Hyöty E	1.5	1.0	1	0.9	0.8

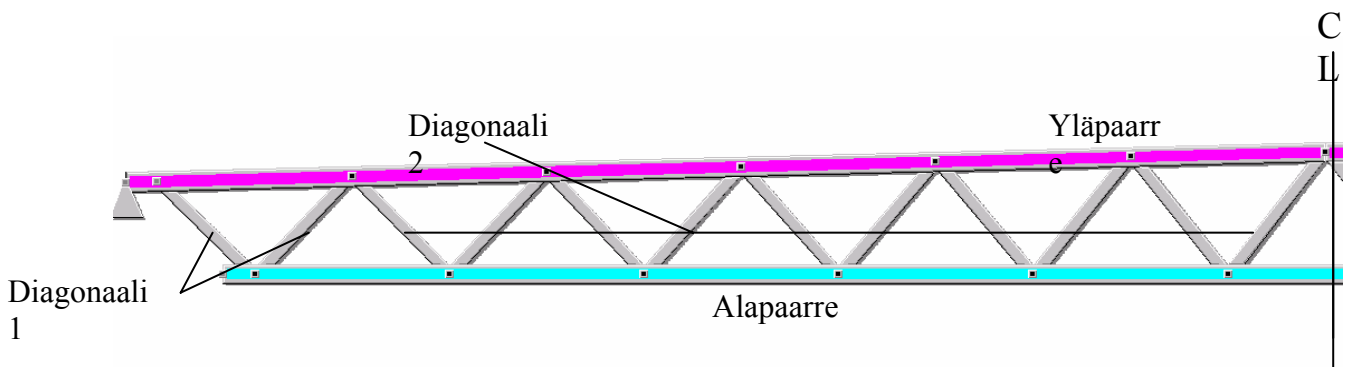
**4.5 Mitoitus-esimerkki 1**

Mitoitetaan oheinen kattoristikko neljällä eri tavalla:

1. Normaalilämpötilan mitoitus
2. R15 -mitoitus ilman muutoksia ristikkoon
3. R15 -mitoitus
4. R15 -mitoitus ottaa huomioon lyhyemmät nurjahduspituudet

Ristikön jännemitta on 18.5 m ja ristikoiden väli 6 m. Ristikön rakenteellinen korkeus keskellä on 1250 mm ja kokonaiskorkeus on siten noin 1 400 mm. Reunalla ristikön korkeus 1000 mm. Ristikko on jännemittaansa nähden aika matala, sillä normaalisti ristikön optimikorkeus on noin  $L/8 \dots L/12$  (2 300 mm ... 1 500 mm). Ristikön sauvat on valittu siten, että ylä- ja alapaarre ovat eri profiileja, ja diagonaaleissa on käytetty kahta kokoa (reunimmäiset diagonaalit ovat saman kokoisia ja muut toista kokoa). Mitoituksessa huomioon otetut kuormat:

- Ristikön omapaino
- Kattorakenteet,  $0.5 \text{ kN/m}^2$  eli  $3 \text{ kN/m}$
- Lumikuorma maassa  $2.5 \text{ kN/m}^2$  eli katolla  $2.0 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow 12 \text{ kN/m}$

**Kuva 3: Esimerkin 1 ristikkomalli ja profiilityypit**

Laskennan tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa. Tässä tapauksessa huomataan, että hoikat diagonaalisauvat eivät kestä 15 minuutin paloa (sarake 2:), vaan ne on vaihdettava suurempiin profiileihin (Sarake 3:). Nurjahduspituuden redusointikaan ei tässä tapauksessa mahdollista diagonaalien pienentämistä (Sarake 4:) verrattuna R15 minuutin palon kestävään tapaukseen (Sarake 3:). Kaikki tässä laskelmassa määritellyt liitokset kestivät myös palotilanteen mukaisen mitoituksen. Ristikön painolisäys oli noin 4 %.

**Taulukko 6: Laskelmien yhteenveto esimerkki 1**

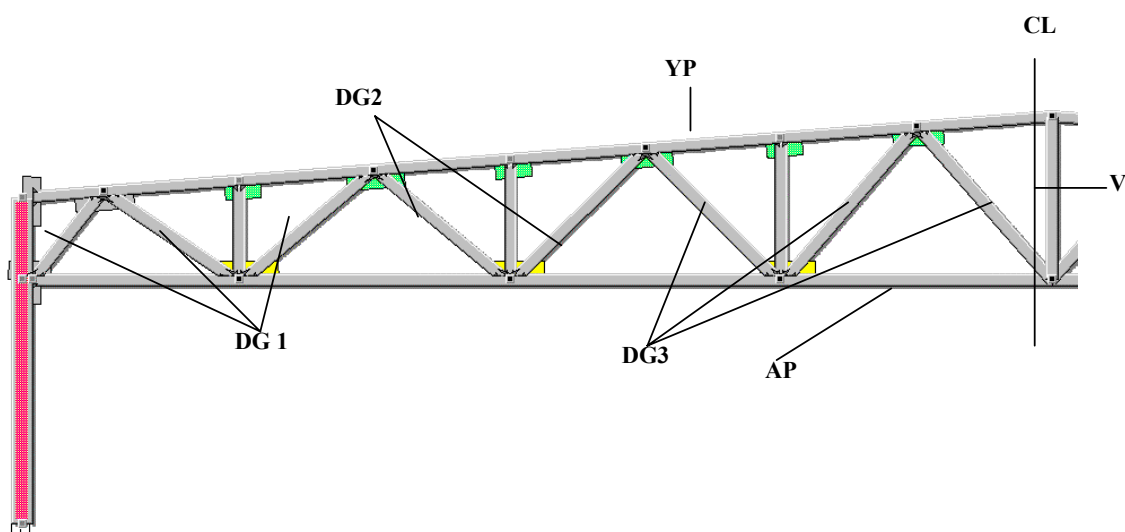
	1: R0 Normaalilämpötilan mitoitus	2: R15 normaalilämpötilan profiilit	3: R15	4: R15 nurjahduspituudet redusoitu
Paino (kg)	1243	1243	1326	1326
Yläpaarre (YP)	160*160*7.1	160*160*7.1	160*160*7.1	160*160*7.1
- käyttöaste	0.90	0.94	0.92	0.90
Alapaarre AP	150*150*6	150*150*6	150*150*6	150*150*6
- käyttöaste	0.86	0.84	0.84	0.82
Diagonaali 1 DG1	90*90*4	90*90*4	90*90*5	90*90*5
- käyttöaste	0.76	1.45	0.97	0.88
Diagonaali 2 DG2	70*70*3	70*70*3	80*80*4	80*80*4
- käyttöaste	0.77	1.78	0.95	0.84

#### 4.6 Mitoitusesimerkki 2

Mitoitetaan oheinen kehärakenne. Ristikon jännemitta on 38 m ja ristikoiden väli 6 m. Ristikon rakenteellinen korkeus keskellä on 3000 mm ja kokonaiskorkeus siten noin 3200 mm. Reunalla ristikon korkeus 1500 mm. Ristikon profiili on valittu siten, että ylä- ja alapaarre ovat eri profiileja ja diagonaaleissa on käytetty kolmea kokoa sekä yhtä vertikaalitupea. Mitoituksessa huomioon otetut kuormat:

- Ristikon omapaino
- Kattorakenteet,  $0.6 \text{ kN/m}^2$  eli  $3.6 \text{ kN/m}$
- LVIS kuorma,  $0.20 \text{ kN/m}^2$  eli  $1.2 \text{ kN/m}$
- Lumikuorma maassa  $2.5 \text{ kN/m}^2$  eli katolla  $2.0 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow 12 \text{ kN/m}$
- Tuulikuorma  $0.56 \text{ kN/m}^2$  ja painekertoimet eri seinille ja katolle  $+0.8 \dots -1.2$  Eurocode 1991-2-4 mukaan

Kuormien yhdistelyt on tehty esimerkin 1 tapaan. Todettakoon, että määräävä kuormitusyhdistely on omapainon ja lumen yhdistely, sillä tuuli aiheuttaa pääosin vain imua katolle.

**Kuva 4: Esimerkin 2 kehärakenne**

Laskennan tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa. Puristetut diagonaalisauvat muodostavat jälleen ongelman, sillä ne eivät kestä 15 minuutin paloa (sarake 2:). Toisin kuin esimerkissä 1 nurjahduspituuden redusointi auttaa tässä esimerkissä. Tämä johtuu siitä, että diagonaalit ovat huomattavasti pidempiä tässä esimerkissä. 15-minuutin huomioon ottaminen tässä esimerkissä aiheutti noin 3% painon lisäyksen. Ristikön liitokset kestivät hyvin myös palomitoituksen.

**Taulukko 7: Laskelmien yhteenveto esimerkki 2**

	1: R0 Normaalilämpötilan mitoitus	2: R15 normaalilämpötilan profiilit	3: R15	4: R15 nurjahduspituudet reduoitu
Paino (kg)	4150	4150	4376	4282
Yläpaarre YP	180*180*10	180*180*10	180*180*10	180*180*10
- käyttöaste	0.91	0.75	0.75	0.75
Alapaarre AP	150*150*8	150*150*8	150*150*8	150*150*8
- käyttöaste	0.79	0.57	0.57	0.57
Diagonaali 1 DG1	120*120*6	120*120*6	140*140*7.1	140*140*6.0
- käyttöaste	0.95	1.24	0.79	0.97
Diagonaali 2 DG2	100*100*4	100*100*4	100*100*7.1	100*100*6.0
- käyttöaste	0.84	2.44	0.89	0.80
Diagonaali 3 DG3	100*100*4	100*100*4	100*100*4	100*100*4
- käyttöaste	0.15	0.25	0.25	0.21
Vertikaali V	100*80*4	100*80*4	100*80*4	100*80*4
- käyttöaste	0.29	0.23	0.23	0.21

#### 4.7 Mitoitusesimerkki 3

Mitoitetaan oheinen kehärakenne vastaavasti kuin esimerkki 1. Ristikön jännemitta on 24.5 m ja ristikoiden väli 6 m. Ristikön rakenteellinen korkeus vasemmalla on 2500 mm ja oikealla 1900 mm. Ristikön profiili on valittu siten, että ylä- ja alapaarre ovat eri profiileja ja diagonaaleissa on käytetty useita eri kokoja, jotta on saatu mahdollisimman pieni kokonaispaino. Tällainen sauvojen "ylioptimointi" ei yleensä ole järkevää, ellei ristikoiden sarjapituus ole riittävän suuri. Mitoituksessa huomioon otetut kuormat:

- Ristikön omapaino
- Kattorakenteet,  $0.66 \text{ kN/m}^2$  eli  $4 \text{ kN/m}$
- Lumikuorma maassa  $2.5 \text{ kN/m}^2$  eli katolla  $2.0 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow 12 \text{ kN/m}$
- Tuulikuorma ei ole määräävä.

Kuormien yhdistelyt on tehty esimerkin 1 tapaan. Todettakoon, että määräävä kuormitusyhdistely on omanpainon ja lumen yhdistely, sillä tuuli aiheuttaa pääosin vain imua katolle.



**Kuva 5: Esimerkin 3 ristikko**

Laskennan tulokset on esitetty seuraavassa taulukossa. Puristetut diagonaalisauvat muodostavat jälleen ongelman, sillä ne eivät kestä 15 minuutin paloa (sarake 2:). Nurjahduspituuden redusointi auttaa tässä esimerkissä. 15-minuutin huomiointi tässä esimerkissä aiheutti noin 3 % painon lisäyksen. Ristikon liitokset kestivät hyvin myös palomitoituksen.

**Taulukko 8: Laskelmien yhteenveto esimerkki 3**

	1: R0 Normaalilämpötilan mitoitus	2: R15 normaalilämpötilan profiilit	3: R15	4: R15 nurjahduspituudet reduoitu
Paino (kg)	1651	1651	1812	1686
Yläpaarre YP	140*140*8	140*140*8	140*140*8	140*140*8
- käyttöaste	0.97	0.91	0.99	0.96
Alapaarre AP	120*120*6	120*120*6	140*140*6 Huom 1	120*120*6
- käyttöaste	0.84	0.87	0.74	0.87
Diagonaali 1 DG1	100*100*8	100*100*8	120*120*7.1	100*100*8
- käyttöaste	0.99	1.21	0.94	0.82
Diagonaali 2 DG2	100*100*4	100*100*4	100*100*4	100*100*4
- käyttöaste	0.92	0.88	0.88	0.87
Diagonaali 3 DG3	100*100*4	100*100*4	120*120*6	100*100*6
- käyttöaste	0.92	2.45	0.72	0.79
Diagonaali 4 DG4	100*100*5	100*100*5	120*120*6	100*100*6
- käyttöaste	0.94	1.99	0.88	0.97
Diagonaali 5 DG3	100*100*4	100*100*4	100*100*5	100*100*5
- käyttöaste	0.87	1.75	0.89	0.88

Huom1) Paarre muutettu diagonaalien dimensioiden kasvun takia

#### 4.8 Yhteenveto ristikon esimerkkilaskelmista

Lasketut kolme esimerkkiä ovat todellisista kohteista. Laskennassa todettiin, että tarvittavat muutokset, kun siirrytään R0 mitoituksesta R15 mitoitukseen, ovat kohtuullisen pieniä. Useimmiten ongelmaksi muodostuivat puristetut diagonaalisauvat. Näissä sauvoissa jouduttiin ainepaksuutta suurentamaan 1-2 "pykälää". Painonlisäykset lasketuissa tapauksissa vaihtelivat 2 %:n ja 4 %:n välillä.

Ristikoiden, joille asetetaan R15 -palonkestävyysvaatimus, mitoituksen peukalosääntöjä:

- Valitse ristikon korkeus mieluummin hieman matalammaksi kuin liian korkeaksi. Diagonaalien nurjahduspituus ja hoikkuus ovat tällöin hallinnassa.
- Sommittele diagonaalit siten, että puristettujen diagonaalien nurjahduspituus on pieni. Ota erityisesti huomioon kaksi eniten puristettua diagonaalia jotka useimmiten ovat kriittisiä R15 -mitoituksessa
- Uumasauvojen nurjahduspituuden redusointi R15 -mitoituksessa kannattaa tehdä aina
- Vältä liian ohuita materiaaleja. Paksumman materiaalin käyttö pienentää profiilin lämpötiloja eli laskee käyttöastetta ja nostaa lujuutta.

## 5 ESIMERKKI POIMULEVYN LASKENNASTA KÖYSIRAKENTEENA /8/

Lasketaan poimulevyn kestävyys R15 palotilanteessa. Laskenta tehdään ns. köysikäyrämallia käyttäen. Tällöin profiilipellin annetaan palotilanteessa roikkua siten, että kuormat siirtyvät vetojännityksillä tuelle.

Poimulevyn jännemitta on 6 m. Kuormitus palotilanteessa on:

- Kattorakenteet ja profiilipelti,  $0.60 \text{ kN/m}^2$
- Lumikuorma katolla  $2.0 \text{ kN/m}^2 \Rightarrow$  eli palotilanteessa  $1.0 \text{ kN/m}^2$

Profiilipellin poikkileikkaustekijä lasketaan kaavasta:

$$F/V = 1/T, \text{ missä } T \text{ on materiaalin paksuus}$$

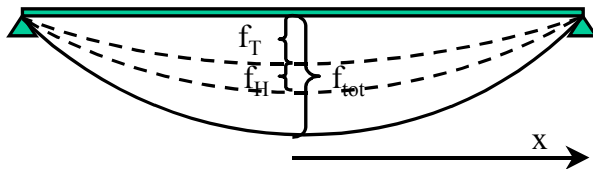
Toisaalta profiilipellit ovat niin ohutta terästä, että teräksen lämpötila on lähes sama kuin kaasun lämpötila, joten laskentaa voi yksinkertaistaa käyttämällä teräksenlämpötilana ISO 834 mukaista kaasun lämpötilaa (ero  $<20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Teräksen lämpötilaksi otetaan siis (Kuva 2).

$$T_{S,15} = 735 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tätä lämpötilaa vastaavat materiaaliominaisuudet ovat taulukon 2 mukaan (lineaarinen interpolointi)

$$f_{yT735} = 350 \text{ MPa} * (0.143 - (0.143 - 0.105) * 0.35) = 0.129 * 350 \text{ MPa} = 45 \text{ MPa}$$

$$E_{T735} = 210000 \text{ MPa} * (0.13 - (0.13 - 0.09) * 0.35) = 0.096 * 210000 \text{ MPa} \\ = 20\,685 \text{ MPa}$$



**Kuva 6: Ohutlevyn muoto köysirakenteena**

Köysikäyrän yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon:

$$y(x) = 4 * f * x^2 / L^2$$

Jossa f on taipuma keskellä jännettä, L tukiväli ja origo sijaitsee keskellä jännettä.

Köysikäyrän taipumaa laskettaessa on otettava huomioon sekä lämpölaajenemisesta, että venymästä aiheutuvat osuudet. Eli lämpölaajenemisen osa:

$$\delta L_T / L = 1.2 * 10^{-5} * T_S + 0.4 * 10^{-8} * T_S^2 - 2.416 * 10^{-4} = \\ = (1.2 * 10^{-5} * 735 + 0.4 * 10^{-8} * 735^2 - 2.416 * 10^{-4}) = 0.0107$$

Eli pitenemä 6 m pellissä on:

$$\delta L_T = 0.0107 * 6000 = 64.4 \text{ mm}$$

Profiilipellin keskikohdan taipuman ja pitenemän välille voidaan johtaa yhteys

$$f_T = (3 * \delta L_T * L / 8)^{0.5} = (3 * 64.4 * 6000 / 8)^{0.5} = 380 \text{ mm}$$

Profiilipellin pitenemä lämpötilan noususta aiheuttaa siis profiilipeltiin vetovoiman H:

$$H = q * L^2 / 8 / f_T = 1.5 * 6^2 / 8 / 0.380 = 17.7 \text{ kN/m}$$

Tästä vetovoimasta aiheutuu siis lisävenymä peltiin, joka on likimäärin:

$$\begin{aligned} \delta L_H &= 2 * H / E_{T735} / A * (L / 2 + 8 * f_T^2 / 3 / L) * L \\ &= 2 * 17.7 / 20685 / 1200 * (6000 / 2 + 8 * 380^2 / 3 / 6000) * L = 26.2 \text{ mm} \end{aligned}$$

Eli uusi venymä on nyt

$$\delta L_{\text{tot}} = \delta L_T + \delta L_H = 64.4 \text{ mm} + 26.2 \text{ mm} = 90.6 \text{ mm}$$

Tämän venymän aiheuttama uusi kokonaistaipuma on:

$$f_{\text{tot}} = (3 * \delta L_{\text{tot}} * L / 8)^{0.5} = (3 * 90.6 * 6000 / 8)^{0.5} = 451.5 \text{ mm}$$

Uutta kokonaistaipumaa vastaava vetovoima on siis:

$$H_{\text{tot}} = q * L^2 / 8 / f_{\text{tot}} = 1.5 * 6^2 / 8 / 0.451.1 = 14.9 \text{ kN/m}$$

Koska kokonaistaipuma kasvoi, pieneni vastaavasti profiilipellissä vaikuttava vetovoima. Itoimalla muutama kierros saadaan lopullisiksi suureiksi:

$$\begin{aligned} \delta L_{\text{lop}} &= 87.03 \text{ mm} \\ f_{\text{lop}} &= 451.7 \text{ mm} \\ H_{\text{lop}} &= 15.3 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Pellissä vaikuttava vetovoima on siis keskimääräinen vetovoima köydessä ja siitä aiheutuu tuelle rasitus

$$N_{T,\text{max}} = H / \cos \alpha$$

Kulma  $\alpha$  voidaan laskea derivoimalla köysikäyrän yhtälö.

$$y'(x) = 8 * f * x / L^2$$

Kallistuma tuella saadaan siis arvolla  $L/2$  eli vetovoima tuella on

$$N_{T,\text{max}} = H / \cos (\arctan (8 * f_{\text{lop}} * (L/2) / L^2))$$

$$N_{T,\text{max}} = 15.3 / \cos (\arctan (8 * 451.7 * 3000 / 6000^2)) = 15.9 \text{ kN/m}$$

Vetojäännitys pellissä on siis, jos oletetaan pellin pinta-alaksi  $1200 \text{ mm}^2/\text{m}$  (Vastaa suurin piirtein profiilipeltiä 113/0.9 tai 120/0.85)

$$N_{T,\max}/A = 15900/1200 = 13.3 \text{ MPa} < 45 \text{ MPa} \Rightarrow \text{kestää}$$

## LÄHTEET:

1. Eurocode 1 (SFS-ENV 1991-1) Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat
2. Eurocode 3 (SFS-ENV 1993-1-1) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
3. Eurocode 3 (SFS-ENV 1993-1-2) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-2 Yleiset säännöt. Rakenteellinen palomitoitus
4. Eurocode 3 (SFS-ENV 1993-1-3) Teräsrakenteiden suunnittelu Osa 1-3 Yleiset säännöt. Teräsohutlevyrakenteiden mitoitus
5. Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa B7 Teräsrakenteet
6. Suomen Rakentamismääräyskokoelma osa B6 Teräsohutlevyrakenteet
7. Tampereen teknillinen korkeakoulu: Teräsristikon lämpötilan nousu 30 minuutin standardipalossa, (tutkimusselostus 404/99/207)
8. Tampereen teknillinen korkeakoulu: Kantavan teräsohutlevyn palomitoitusesimerkki (raportti 802/99, lyhennelmä liitteenä 1)
9. Teknillinen korkeakoulu: Esitys ohutlevyteräksen materiaalimalliksi korkeissa lämpötiloissa (julkaisematon, lyhennelmä liitteenä 2)

## LIITE 1: Lyhennelmä TTKK:n raportista Teräsristikon lämpötilan nousu 30 minuutin standardipalossa,(tutkimusselostus 404/99/207)

Tampereen teknillisessä korkeakoulussa tehtiin ristikon täysmittakaavakoe syksyllä 1999 (tutkimusselostus 404/99/207 päivätty 1.10.1999). Kokeessa mitattiin ristikon eri osien lämpötiloja ja niiden eroja eri osissa sauvoja. Tulosten keskiarvot on koottu seuraavaan taulukkaan.

**Taulukko L1:** Ristikon ei osien lämpötilat 15 minuutin polttokokeen jälkeen

Sauva /koko	Laskennallinen lämpötila	Lämpötila liitosalueella	Lämpötila keskellä sauvaa	Ero liitos / keskiosa	Huom.
Dg2 80*80*5	661	677	726	50	poltin
Ver3 60*60*4	686	668	712	44	poltin
Dg 4 80*80*4	684	623	684	61	
AP 100*100*5	659	-	651		
YP 100*100*5	659	-	604		

Huom: Poltin ollut kokeessa lähellä sauvaa. Vain lämpötilaero seuvan eri osissa merkityksellinen

- Taulukosta nähdään mm.:
- Diagonaalien ja alapaarten lämpötilat noudattivat hyvin standardipalokäyrän ja normin mukaan laskettuja lämpötiloja.
- Diagonaalisauvojen lämpötila oli lähellä liitosaluetta noin 50 astetta sauvan keskiosaa alhaisempi. Tämä antaa lisävarmuutta sekä liitokselle, että nurjahduspituudelle.
- Yläpaarten lämpötila noin 50 astetta laskennallista alhaisempi. Tämä johtuu yläpaarteeseen kiinnitetyn profiilipellin varjostus yms. seikoista. Tämä laskennallista lämpötilaa alempi lämpötila lisää varmuutta sekä puristetun yläpaarten mitoitukseen että jäykkyyseroa paarten ja diagonaalien välille.

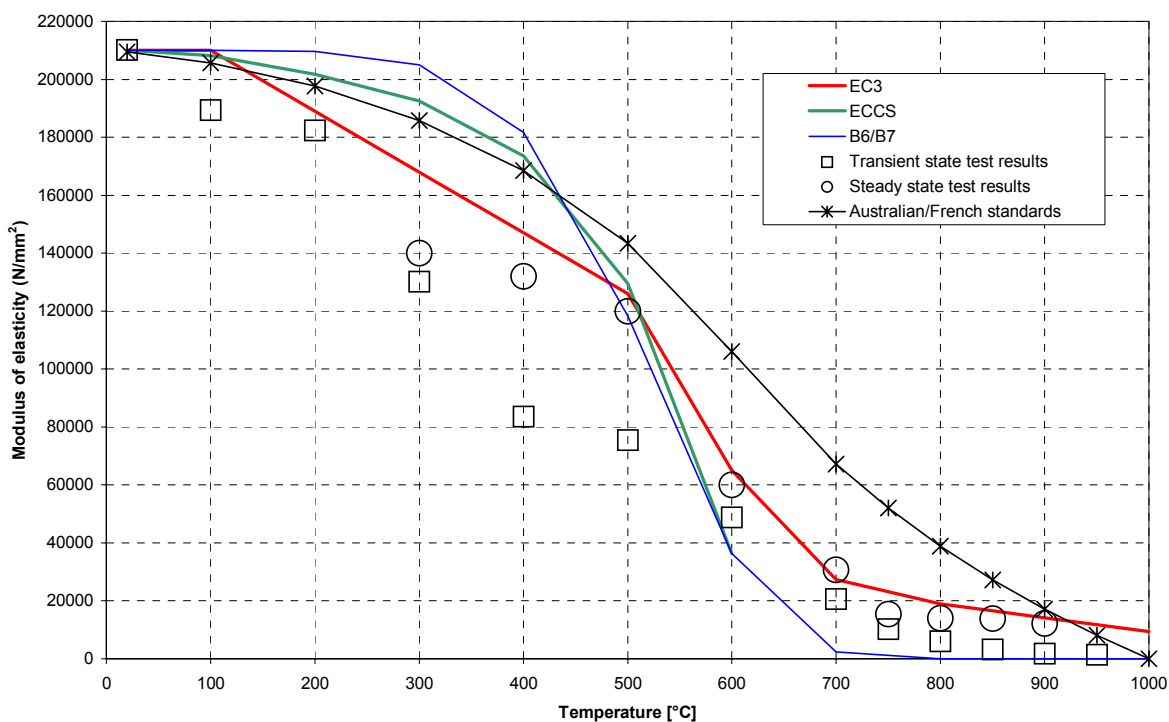


## LIITE 2: Esitys ohutlevyteräksen materiaalmalliksi korkeissa lämpötiloissa

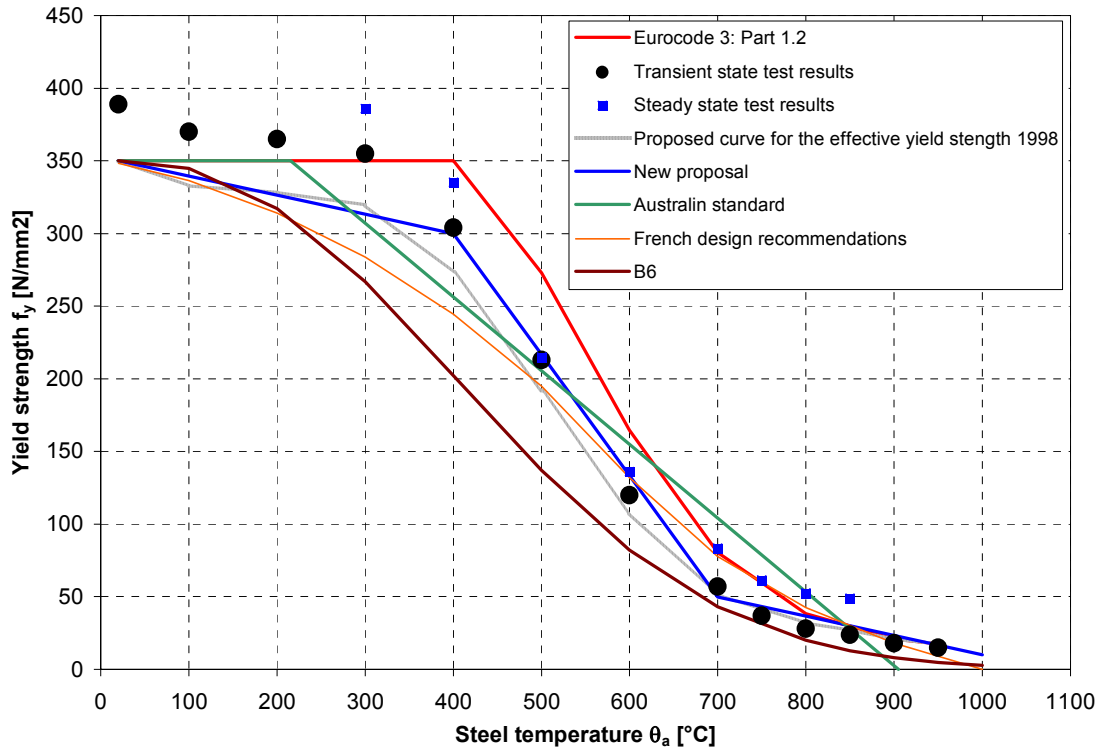
Kylmävalssattujen ohutlevyrakenneterästen (nimellislujuus enintään 350N/mm<sup>2</sup>) kimmokertoimelle käytetään Eurocode 3: Part 1.2:ssa annettuja redusointikertoimia. Myötölujuudelle  $f_y$  (2% kokonaisvenymä) käytetään seuraavan taulukon mukaisia arvoja lämpötila-alueella 20°C-1000°C.

**Taulukko L2: Kylmävalssattujen ohutlevyrakenneterästen mekaaniset ominaisuudet lämpötiloissa 20°C-1000°C.**

Teräksen lämpötila [°C]	$E_{a,\theta} / E_a$	$E_{a,\theta} / E_a$	$f_{y,\theta} / f_y$	$f_{y,\theta} / f_y$
	EC 3:Part 1.2	Ehdotus	EC 3:Part 1.2	Ehdotus
20	1.0000	1.0000	1.0000	1.000
100	1.0000	1.0000	1.0000	0.970
200	0.9000	0.9000	1.0000	0.932
300	0.8000	0.8000	1.0000	0.895
400	0.7000	0.7000	1.0000	0.857
500	0.6000	0.6000	0.7800	0.619
600	0.3100	0.3100	0.4700	0.381
700	0.1300	0.1300	0.2300	0.143
800	0.0900	0.0900	0.1100	0.105
900	0.0675	0.0675	0.0600	0.067
1000	0.0450	0.0450	0.0400	0.029



**Kuva L1: Ohutlevyrakenneteräksen S350GD+Z kimmokertoimen vertailua.**



Kuva L2: Ohutlevyrakenneteräksen S350GD+Z myötörajan vertailua.